COMMISSION EUROPÉENNE

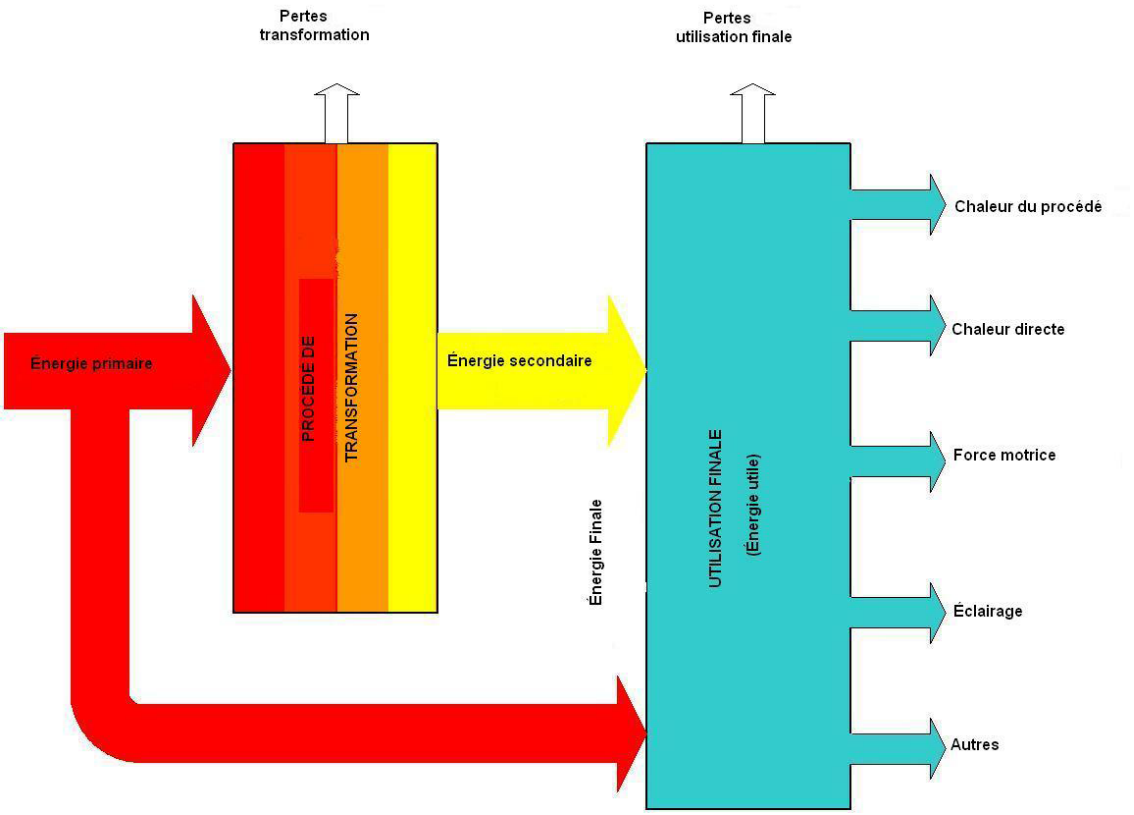
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère
de l'Écologie,
de l'Énergie,
du Développement
durable
et de la Mer

Document de référence sur les meilleures techniques disponibles

Efficacité énergétique

Février 2009



Ce document est la traduction de la version anglaise publiée par la Commission européenne qui seule fait foi.

Traduction V 1

Le présent document s'intègre dans une série de documents prévus dont la liste est donnée ci-dessous (au moment de la rédaction, la première série de ces documents est terminée et en cours de révision) :

Document de référence sur les Meilleures techniques disponibles applicables aux …	**Code**
Grandes installations de combustion	LCP
Raffineries	REF
Aciéries	I&S
Transformation des métaux ferreux	FMP
Industrie des métaux non ferreux	NFM
Forges et fonderies	SF
Gestion des résidus et des stériles des activités minières	STM
Industrie du ciment et de la chaux	CL
Verreries	GLS
Céramiques	CER
Chimie organique	LVOC
Chimie fine organique	OFC
Polymères	POL
Industrie du chlore et de la soude	CAK
Chimie inorganique – ammoniac, acides et engrais	LVIC-AAF
Chimie inorganique – produits solides et autres	LVIC-S
Chimie inorganique de spécialités	SIC
Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique	CWW
Traitement des déchets	WT
Incinération des déchets	WI
Gestion des résidus et des stériles des activités minières	MTWR
Industrie papetière	PP
Textile	TXT
Tannerie	TAN
Abattoirs et à l'équarrissage	SA
Industries agro-alimentaires et laitières	FDM
Élevage intensif de volaille et de porcins	ILF
Traitement de surface utilisant des solvants	STS
Systèmes de refroidissement industriels	CV
Émissions dues au stockage des matières dangereuses ou en vrac	ESB
Efficacité énergétique	ENE
Documents de référence sur les …	
Principes généraux de surveillance	MON
Aspects économiques et effets multi-milieux	ECM

La version électronique des documents provisoires et des documents finalisés est accessible au public ; elle peut être téléchargée à l'adresse suivante : http://eippcb.jrc.es.

RÉSUMÉ

Le présent document de référence (BREF) sur les meilleures techniques disponibles (MTD) rend compte de l'échange d'informations sur les meilleures techniques disponibles, le suivi qui leur est associé et leur récente évolution, mené en application de l'article 17, paragraphe 2, de la directive 2008/1/CE (directive IPPC). Le présent résumé, qu'il convient de lire à la lumière de la préface du BREF qui en explique les objectifs, l'utilisation et les termes juridiques, décrit les principales constatations faites ainsi que les principales conclusions relatives aux MTD. Il peut être lu et appréhendé comme un document autonome, mais, en tant que résumé, il ne rend pas compte de toutes les complexités du texte complet du BREF. Il n'a donc pas vocation à se substituer au BREF intégral en tant qu'outil pour la prise de décisions sur les meilleures techniques disponibles.

Efficacité énergétique
L'énergie est une priorité pour l'Union européenne (UE), pour trois raisons corrélées :

- le changement climatique : la combustion de combustibles fossiles pour produire de l'énergie est la principale source anthropique de gaz à effet de serre,
- l'utilisation continue et à grande échelle de combustibles fossiles non renouvelables et la nécessité de parvenir à une durabilité,
- la sécurité d'approvisionnement : l'UE importe plus de 50 % de ses réserves de combustibles et on s'attend à ce que cette proportion atteigne plus de 70 % dans les 20 à 30 prochaines années.

Aussi de nombreuses déclarations relatives à ces thèmes ont-elles été faites au plus haut niveau politique, telles que :

«Ensemble, nous nous efforçons de montrer la voie en matière de politique énergétique et de protection climatique et de contribuer à lutter contre la menace globale que représente le changement climatique.» Déclaration de Berlin (Conseil des ministres, 50e anniversaire du traité de Rome, Berlin, le 25 mars 2007).

Une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'énergie est le moyen le plus rapide, le plus efficace et le plus rentable de traiter ces questions. Il existe divers instruments, notamment juridiques, qui permettent de mettre en œuvre une plus grande efficacité énergétique. Le présent document a été rédigé en tenant compte de ces autres initiatives.

Mandat
Le présent document a été spécifiquement mandaté par une demande spéciale dans la communication de la Commission sur la mise en œuvre du programme européen sur le changement climatique (PECC) (COM (2001)580 final), concernant l'efficacité énergétique dans les installations industrielles. Le PECC demandait de promouvoir la mise en œuvre efficace des dispositions de la directive IPPC relatives à l'efficacité énergétique et préconisait l'élaboration d'un BREF «horizontal» (document de référence sur les meilleures techniques disponibles) spécifique consacré aux techniques génériques d'efficacité énergétique.

Champ d'application du BREF
La directive IPPC requiert que toutes les installations soient exploitées de façon à utiliser l'énergie de manière efficace, et l'efficacité énergétique est l'un des aspects à prendre en compte lors de la détermination des MTD relatives à un procédé. En ce qui concerne les activités énumérées dans la directive établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté (directive 2003/87/CE du Conseil), les États membres ont la faculté de ne pas imposer d'exigences en matière d'efficacité énergétique applicables aux unités de combustion et aux autres unités émettant du dioxyde de carbone sur le site. Toutefois, dans de tels cas, les exigences en matière d'efficacité énergétique continuent de s'appliquer à toutes les autres activités associées sur le site.

Le présent document présente donc des orientations et des conclusions quant aux techniques d'efficacité énergétique qui sont considérées comme étant compatibles avec les MTD au sens générique pour toutes les installations couvertes par la directive IPPC. Le présent document fait également référence à d'autres BREF dans lesquels des techniques particulières d'efficacité énergétique ont déjà fait l'objet de discussions détaillées et peuvent être appliquées à d'autres secteurs. En particulier :

- le BREF relatif aux grandes installations de combustion porte sur l'efficacité énergétique liée à la combustion et précise que les techniques considérées peuvent être appliquées aux installations de combustion d'une capacité inférieure à 50 MW.
- il existe un BREF relatif aux systèmes de refroidissement industriel.

Le présent BREF :

- ne contient pas d'informations propres aux procédés industriels et activités mis en œuvre dans les secteurs couverts par d'autres BREF,
- n'établit pas de MTD spécifiques à un secteur.

Toutefois, un résumé des MTD sectorielles en matière d'efficacité énergétique a été établi à partir des autres BREF et est disponible pour information sur l'espace de travail de l'EIPPCB [283, EIPPCB]

Le présent document a été préparé en réponse à la demande qui avait été formulée de promouvoir les dispositions de la directive IPPC relatives à l'efficacité énergétique. Il place l'utilisation efficace de l'énergie en tête des priorités, en conséquence de quoi il ne porte pas sur les ressources énergétiques renouvelables ou durables, qui sont traitées ailleurs. Il convient toutefois de noter que l'utilisation de sources d'énergie durables et/ou de la chaleur «perdue» ou excédentaire peut être plus durable que l'utilisation de combustibles primaires, même si l'efficacité énergétique est moindre lors de l'utilisation.

Structure et contenu du présent document

L'efficacité énergétique est une question horizontale dans la procédure d'autorisation IPPC et, comme il est précisé dans le guide d'élaboration des BREF, le présent document ne respecte pas totalement la structure habituelle. En particulier, du fait de la grande diversité des secteurs industriels et des activités traités, il n'y a pas de chapitre consacré à la consommation ou aux émissions. Certaines valeurs indicatives sont données en ce qui concerne les économies d'énergie potentielles pour des techniques à considérer au titre des MTD et de nombreux exemples sont présentés en annexe afin d'aider les utilisateurs à déterminer les techniques les plus efficaces pour atteindre l'efficacité énergétique dans une situation donnée.

Le chapitre 1 donne des informations de contexte relatives à la consommation énergétique industrielle et aux questions d'efficacité énergétique dans le cadre IPPC. Il donne ensuite une introduction générale à des sujets essentiels tels que les aspects économiques et les effets croisés, aux termes utilisés dans le domaine de l'efficacité énergétique (tels que : énergie, chaleur, travail, puissance) ainsi qu'aux lois importantes de la thermodynamique. La première loi en particulier énonce que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite (elle est transformée d'une forme en une autre). Elle peut donc être comptabilisée dans le cadre d'un procédé ou d'une installation, permettant ainsi de calculer l'efficacité énergétique. La deuxième loi montre qu'aucune transformation d'énergie ne peut donner un travail utile à 100 % et qu'il y a toujours des pertes sous forme d'énergie ou de chaleur de basse énergie. En conséquence, aucun procédé et aucune machine ne peut être efficace à 100 %. Ce chapitre examine ensuite les indicateurs d'efficacité énergétique, l'importance de la définition de l'efficacité énergétique et les problèmes qu'elle pose, ainsi que les limites des systèmes et des unités auxquelles ils se rapportent. Le chapitre démontre également le besoin d'optimiser l'efficacité énergétique au niveau des systèmes et des installations et non au niveau d'un composant.

Le chapitre 2 considère les techniques permettant d'assurer l'efficacité énergétique et qui peuvent être appliquées au niveau d'une installation. Il présente d'abord les systèmes de management de l'efficacité énergétique (SM2E) puis les techniques qui facilitent la mise en œuvre d'un SM2E. Ces techniques comprennent entre autres : l'importance de la planification des actions et des investissements de manière intégrée afin de minimiser en continu l'impact d'une installation sur l'environnement ; la prise en compte d'une installation et de ses systèmes globalement ; utilisant une conception efficace énergétiquement et sélectionnant des technologies de procédés pour des installations nouvelles ou améliorées ; l'augmentation de l'efficacité énergétique par une plus grande intégration des procédés et une actualisation périodique des SM2E. D'autres techniques utiles aux SM2E sont le maintien d'une expertise suffisante au sein du personnel, la communication concernant les questions d'efficacité énergétique, le contrôle et la maintenance efficaces du procédé, le suivi et la mesure de l'utilisation d'énergie, l'audit énergétique, l'utilisation d'outils analytiques comme la méthode du pincement, les analyses d'exergie et d'enthalpie, la thermo économie, et le suivi et l'établissement de niveaux de référence en matière d'efficacité énergétique pour les installations et les procédés.

Le chapitre 3 considère les techniques d'efficacité énergétique pour les systèmes, les procédés et les équipements utilisant de l'énergie tels que : combustion, vapeur, récupération de chaleur, cogénération, alimentation électrique, sous-systèmes entraînés par un moteur électrique, systèmes de pompage, chauffage, climatisation et ventilation, éclairage, et séchage et séparation. Lorsque la combustion joue un rôle important dans un processus IPPC (dans les fours de fusion par exemple), les techniques utilisées sont présentées dans les BREF verticaux (sectoriels) correspondants.

Meilleures techniques disponibles

Le chapitre consacré aux MTD (chapitre 4) identifie les techniques qui sont considérées comme MTD au niveau européen sur la base des informations fournies aux chapitres 2 et 3. Le texte qui suit est un résumé de ce chapitre 4, dont le texte intégral demeure le texte final porteur des conclusions relatives aux MTD.

Aucune valeur associée d'économie d'énergie ou d'efficacité énergétique ne saurait être dérivée et/ou adoptée à partir du présent document horizontal. Les MTD en matière d'efficacité énergétique et les niveaux de consommation d'énergie associés sont présentés dans les BREF sectoriels spécifiques (verticaux) appropriés. Les MTD pour une installation donnée sont ainsi une combinaison des MTD spécifiques décrites dans les BREF sectoriels pertinents, des MTD spécifiques des activités associées éventuellement présentées dans d'autres BREF sectoriels (par exemple le BREF GIC pour la combustion et la vapeur) et des MTD génériques présentées dans le présent document.

L'objectif de la directive IPPC est de parvenir à une prévention et à une réduction intégrées de la pollution garantissant un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble et notamment l'efficacité énergétique et l'utilisation prudente des ressources naturelles. La directive IPPC prévoit un système d'autorisation applicable à certaines installations industrielles, dans lequel tant les exploitants que les autorités sont tenus d'avoir une vue globale et intégrée du potentiel d'une installation à consommer et à polluer. L'objectif global d'une telle approche intégrée doit être d'améliorer la conception et la construction ainsi que la gestion et le contrôle des procédés industriels afin de garantir un niveau élevé de protection pour l'environnement dans son ensemble. Le point central de cette approche est le principe général énoncé à l'article 3 de la directive, qui indique que les exploitants doivent prendre toutes les mesures préventives appropriées pour lutter contre la pollution, en particulier par l'application des «**meilleures techniques disponibles**» leur permettant d'améliorer leur performance environnementale et notamment leur efficacité énergétique.

L'annexe IV de la directive IPPC contient une liste des «aspects à prendre en considération en général ou dans les cas particuliers pour la détermination des meilleures techniques disponibles, compte tenu des coûts et des avantages pouvant résulter d'une action ainsi que des principes de précaution et de prévention». Ces aspects comprennent les informations publiées par la Commission conformément à l'article 17, paragraphe 2 (documents de référence sur les MTD ou BREF).

Les autorités compétentes responsables de l'octroi d'autorisations sont tenues de prendre en compte les principes généraux établis à l'article 3 lors de la détermination des conditions d'autorisation. Ces conditions doivent inclure des valeurs limites d'émission qui peuvent être, le cas échéant, complétées ou remplacées par des paramètres ou des mesures techniques équivalents. Aux termes de l'article 9, paragraphe 4, de la directive :

(sans préjudice de l'article 10 relatif aux meilleures techniques disponibles, aux normes de qualité environnementale et aux respect de ces dernières), les valeurs limites d'émission, les paramètres et les mesures techniques équivalents visés au paragraphe 3 sont fondés sur les meilleures techniques disponibles, sans prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie spécifique, et en prenant en considération les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions locales de l'environnement. Dans tous les cas, les conditions d'autorisation prévoient des dispositions relatives à la minimisation de la pollution à longue distance ou transfrontière et garantissent un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

Conformément à l'article 11 de la directive, les États membres sont tenus de veiller à ce que l'autorité compétente se tienne informée ou soit informée de l'évolution des meilleures techniques disponibles.

Les informations fournies dans le présent document ont vocation à être utilisées lors de la détermination des MTD en matière d'efficacité énergétique dans des cas spécifiques. Lors de la détermination des MTD et de l'établissement des conditions d'autorisation fondées sur celles-ci, il doit toujours être tenu compte de l'objectif global qu'est la recherche d'un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble, dont l'efficacité énergétique est un aspect.

Le chapitre 4 présente les techniques qui sont considérés comme étant compatibles avec les MTD de manière générale. Le but est de donner des indications générales concernant les techniques d'efficacité énergétique qui peuvent être considérées comme un point de référence approprié pour aider à la détermination des conditions d'autorisation fondées sur les MTD ou pour l'établissement de prescriptions contraignantes générales conformément à l'article 9, paragraphe 8. Il y a cependant lieu de préciser que le présent document ne propose pas de valeurs d'efficacité énergétique en vue de l'autorisation. Il est prévu que les nouvelles installations soient conçues pour pouvoir fonctionner aux niveaux associés aux MTD générales présentées ici ou même à des niveaux meilleurs. On estime également que les installations existantes pourraient progresser vers les niveaux associés aux MTD générales et même aller au-delà de ceux-ci en fonction de l'applicabilité technique et économique des techniques dans les différents cas. Dans le cas des installations existantes, il faut, en outre, tenir compte de la viabilité économique et technique de leur amélioration.

Les techniques présentées dans le chapitre relatif aux MTD ne sont pas nécessairement appropriées pour toutes les installations. En revanche, l'obligation d'assurer un niveau élevé de protection de l'environnement et notamment de réduire au minimum la pollution à longue distance ou transfrontière implique que les conditions d'autorisation ne peuvent être définies sur la base de considérations purement locales. Il est donc essentiel que les autorités qui délivrent les autorisations tiennent pleinement compte des informations contenues dans le présent document.

Il importe de garder en tête l'importance de l'efficacité énergétique. Cependant, *«le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent de faire des compromis entre différents types d'impacts sur l'environnement et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales».* De ce fait :

- il n'est pas toujours possible d'optimiser en même temps l'efficacité énergétique de toutes les activités et/ou de tous les systèmes d'une installation
- il peut être impossible d'optimiser l'efficacité énergétique totale tout en réduisant au minimum les autres consommations et émissions (par exemple il peut être impossible de réduire les émissions dans l'air sans utiliser de l'énergie)

- l'efficacité énergétique est susceptible de ne pas être optimale pour un ou plusieurs systèmes afin d'atteindre une efficacité globale maximale au niveau d'une installation donnée
- il est nécessaire de maintenir l'équilibre entre l'optimisation de l'efficacité énergétique et d'autres facteurs comme la qualité du produit, la stabilité du procédé, etc.
- l'utilisation de sources d'énergie durables et/ou de chaleur «perdue» ou excédentaire peut s'avérer plus durable que l'utilisation de combustibles primaires, même si l'efficacité énergétique lors de l'utilisation est moindre.

Des techniques permettant une bonne efficacité énergétique sont donc proposées pour «optimiser l'efficacité énergétique»
L'approche horizontale de l'efficacité énergétique dans tous les secteurs IPPC se fonde sur le postulat que toutes les installations utilisent de l'énergie et que les systèmes et équipements sont communs à de nombreux secteurs IPPC. Il est donc possible d'identifier des options génériques d'efficacité énergétique indépendamment des activités spécifiques. Il en résulte que les MTD définies englobent les mesures les plus efficaces pour atteindre un niveau élevé d'efficacité énergétique en général. Parce qu'il s'agit ici d'un BREF horizontal, les MTD doivent être définies de façon plus générale que dans un BREF vertical, dans lequel on tient compte, par exemple, de l'interaction entre les procédés, les unités et les systèmes au sein d'un site.

Des MTD spécifiques des procédés en matière d'efficacité énergétique et des niveaux de consommation d'énergie associés sont présentés dans les BREF verticaux sectoriels appropriés. La première série de ces BREF étant achevée, ces MTD ont été largement synthétisées dans le document [283, EIPPCB].

Ni le chapitre relatif aux MTD (chapitre 4) ni les chapitres 2 et 3 ne fournissent de listes exhaustives des techniques pouvant être considérées. C'est pourquoi d'autres techniques peuvent donc exister ou être développées et être également valables dans le cadre de l'IPPC et des MTD.

La mise en œuvre des MTD dans des installations et procédés nouveaux ou considérablement améliorés ne pose habituellement pas de problèmes. Dans la plupart des cas, l'optimisation de l'efficacité énergétique présente un intérêt économique. La mise en œuvre des MTD dans une installation existante n'est en général pas si facile en raison de l'infrastructure existante et des circonstances locales : il y a lieu de tenir compte de la viabilité économique et technique de l'amélioration de ces installations. Dans les chapitres 2 et 3, l'applicabilité des techniques est considérée et le chapitre 4 résume cet aspect pour chaque MTD.
Cependant, le présent document n'établit généralement pas de distinction entre les installations nouvelles et les installations existantes. Une telle distinction n'encouragerait pas les exploitants des sites industriels à progresser vers l'adoption des MTD. En règle générale, des mesures d'efficacité énergétique s'accompagnent d'un retour sur investissement et, du fait de la grande importance attachée à l'efficacité énergétique, de nombreuses mesures politiques de mise en œuvre sont disponibles, notamment des incitations financières. Certaines d'entre elles sont mentionnées dans les annexes.

Certaines techniques sont très souhaitables et sont souvent appliquées mais peuvent requérir la disponibilité et la coopération d'une tierce partie (par exemple la cogénération), ce qui n'est pas pris en compte dans la directive IPPC. Il convient de noter que la coopération et l'accord de tierces parties peuvent échapper au contrôle de l'exploitant et ainsi ne pas tomber dans le cadre d'une autorisation IPPC.

MTD générales pour optimiser l'efficacité énergétique au niveau d'une installation
Un élément essentiel pour garantir l'efficacité énergétique au niveau d'une installation est une approche de management formalisé. Les autres MTD appliquées au niveau d'un site facilitent la gestion de l'efficacité énergétique, ce qui fournit des indications plus précises sur les techniques nécessaires pour y parvenir. Ces techniques sont applicables à toutes les installations. Le champ (par exemple niveau de détail, la fréquence d'optimisation, les systèmes à prendre en considération à

chaque instant) et les techniques utilisées sont fonction de la taille et de la complexité de l'installation, ainsi que des besoins énergétiques des systèmes qui la composent.

Management de l'efficacité énergétique

- Les MTD consistent à mettre en œuvre et à adhérer à un système de management de l'efficacité énergétique (SM2E) présentant, suivant les circonstances locales, les caractéristiques suivantes :
  - engagement de la haute direction ;
  - définition d'une politique d'efficacité énergétique pour l'installation par la haute direction ;
  - planification et fixation d'objectifs et de cibles ;
  - mise en œuvre et conduite de procédures en portant une attention particulière sur les aspects suivants :
    - organisation et responsabilités du personnel ; formation, sensibilisation et compétence ; communication ; participation du personnel ; documentation ; bonne maîtrise des procédés ; programmes de maintenance ; préparation aux situations d'urgence et moyens d'action ; respect de la législation et des accords éventuels en matière d'efficacité énergétique.
  - analyse comparative ;
  - vérification des performances et prise de mesures correctives axées sur les aspects suivants :
    - surveillance et mesurage ; mesures correctives et préventives ; tenue d'enregistrements ; réalisation d'audits internes indépendants (si possible) pour déterminer si le SM2E respecte ou non les modalités prévues et s'il est correctement mis en œuvre et entretenu ;
  - réexamen du SM2E par la haute direction pour s'assurer qu'il reste adapté, adéquat et efficace ;
  - prise en compte, lors de la conception d'une nouvelle unité, de l'incidence environnementale que pourrait avoir son démantèlement ;
  - mise au point de techniques permettant d'économiser l'énergie et suivi des progrès en matière de techniques d'efficacité énergétique.

Un SM2E peut optionnellement comprendre les mesures suivantes :

- préparation et publication (avec ou sans validation externe), à intervalles réguliers, d'un relevé d'efficacité énergétique permettant une comparaison annuelle avec les objectifs et les cibles ;
- examen et validation externes du système de management et de la procédure d'audit ;
- mise en œuvre et adhésion à un système volontaire de gestion de l'efficacité énergétique reconnu au niveau national ou international.

Amélioration environnementale continue

- Les MTD consistent à réduire de manière continue l'impact sur l'environnement d'une installation en programmant les actions et les investissements de manière intégrée et à court, moyen et long termes, tout en tenant compte du coût et des bénéfices et des effets croisés.

Ces techniques sont applicables à toutes les installations. «Continue» signifie que les actions sont répétées dans le temps ; par exemple, l'objectif global à long terme de réduction de l'impact sur l'environnement est pris en compte pour toutes les décisions de planification et d'investissement. L'amélioration peut se faire par paliers, plutôt que de façon linéaire, et les effets croisés doivent être pris en compte, par exemple la nécessité d'utiliser davantage d'énergie pour réduire les polluants atmosphériques. L'impact sur l'environnement ne peut jamais être ramené à zéro, et parfois de nouvelles mesures présentent très peu d'intérêt, voire aucun, par rapport aux coûts. En revanche, la viabilité peut aussi varier au fil du temps.

Identification des aspects pertinents d'une installation en matière d'efficacité énergétique et des opportunités d'économies d'énergie

- Les MTD consistent à mettre en évidence, au moyen d'un audit, les aspects d'une installation qui ont une influence sur l'efficacité énergétique. Il importe que cet audit soit compatible avec l'approche par systèmes.

Ces techniques sont applicables à toutes les installations, et doivent précéder toute modernisation ou reconstruction. L'audit peut être externe ou interne.

- Lors de la réalisation d'un audit, les MTD consistent à s'assurer que l'audit identifie les aspects suivants :
  - type et quantité d'énergie utilisée dans l'installation, dans les systèmes qui la composent et par les différents procédés ;
  - équipements consommateurs d'énergie, et type et quantité d'énergie utilisée dans l'installation ;
  - possibilités de minimiser la consommation d'énergie, notamment :
    - contrôle/réduction des temps de fonctionnement, par exemple arrêt en dehors des périodes d'utilisation ;
    - assurance d'une optimisation de l'isolation ;
    - optimisation des utilités, des systèmes et des procédés associés (voir MTD pour les systèmes utilisant de l'énergie) ;
  - possibilités d'utilisation d'autres sources d'énergie plus efficaces, en particulier l'énergie excédentaire provenant d'autres procédés et/ou systèmes ;
  - possibilités d'application de l'énergie excédentaire à d'autres procédés et/ou systèmes ;
  - possibilité d'améliorer la qualité de la chaleur.

- Les MTD consistent à utiliser des méthodes ou outils appropriés pour faciliter la mise en évidence et la quantification des possibilités d'économies d'énergie, notamment :
  - des modèles, des bases de données et des bilans énergétiques ;
  - une technique telle que la méthode de pincement, l'analyse d'exergie ou d'enthalpie, ou la thermo économie ;
  - des estimations et des calculs.

Le choix des outils à utiliser est fonction du secteur et de la complexité du site, et il est examiné dans les chapitres correspondants.

- Les MTD consistent à identifier les opportunités d'optimisation de la récupération d'énergie au sein de l'installation, entre les systèmes de l'installation et/ou avec une ou plusieurs tierces parties.

Cette MTD suppose l'existence d'un usage approprié de la chaleur excédentaire récupérable (type et quantité).

Approche systémique du management de l'énergie

- Les MTD consistent à optimiser l'efficacité énergétique au moyen d'une approche systémique du management de l'énergie dans l'installation. Les systèmes à prendre en considération en vue d'une optimisation globale sont notamment :
  - les procédés des unités (voir BREF sectoriels)
  - les systèmes de chauffage tels que :
    - vapeur
    - eau chaude
  - le refroidissement et le vide (voir le BREF relatif aux systèmes de refroidissement industriel)
  - les systèmes entraînés par un moteur, tels que :
    - air comprimé
    - pompes
  - l'éclairage

- le séchage, la séparation et la concentration.

Fixation et réexamen d'objectifs et d'indicateurs d'efficacité énergétique

- Les MTD consistent à établir des indicateurs d'efficacité énergétique par la mise en œuvre de toutes les actions suivantes :
  - identification d'indicateurs d'efficacité énergétique appropriés pour l'installation et, si nécessaire, pour les différents procédés, systèmes et/ou unités, et mesure de leur évolution dans le temps ou après mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique ;
  - identification et enregistrement de limites appropriées associées aux indicateurs ;
  - identification et enregistrement de facteurs susceptibles d'entraîner une variation de l'efficacité énergétique des procédés, systèmes et/ou unités.

L'énergie secondaire ou finale sert généralement à surveiller les situations en cours. Dans certains cas, plusieurs indicateurs d'énergie secondaire ou finale peuvent être utilisés pour chaque procédé (par exemple à la fois vapeur et électricité). Lors du choix (ou du changement) des vecteurs d'énergie et des utilités, l'indicateur peut aussi être l'énergie secondaire ou finale. Toutefois, il est possible d'utiliser d'autres indicateurs tels que l'énergie primaire ou le bilan carbone pour tenir compte de l'efficacité de la production de tout vecteur d'énergie secondaire et de ses effets croisés, en fonction des circonstances locales.

Analyse comparative

- Les MTD consistent à réaliser des comparaisons systématiques et régulières par rapport à des référentiels sectoriels, nationaux ou régionaux, lorsque des données validées sont disponibles.

L'intervalle entre deux analyses comparatives est propre au secteur, mais il est généralement de plusieurs années, car il est rare que les données d'analyse comparative évoluent rapidement ou considérablement sur une courte période.

Prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception

- Les MTD consistent à optimiser l'efficacité énergétique lors de la planification d'une nouvelle installation, unité ou système ou d'une modernisation de grande ampleur, selon les modalités suivantes :
  - l'efficacité énergétique doit être prise en compte dès les premiers stades de la conception, quelle soit théorique ou pratique, même si les besoins d'investissement ne sont pas encore bien définis, et elle doit être intégrée dans la procédure d'appel d'offres ;
  - mise au point et/ou sélection de techniques d'efficacité énergétique ;
  - il peut s'avérer nécessaire de rassembler des données supplémentaires, dans le cadre du projet de conception ou séparément, pour compléter les données existantes ou pour combler des lacunes dans les connaissances ;
  - les travaux associés à la prise en compte de l'efficacité énergétique au stade de la conception doivent être menés par un expert en énergie ;
  - la cartographie initiale de la consommation énergétique doit aussi permettre de déterminer quelles sont les parties intervenant dans l'organisation du projet qui influeront sur la consommation énergétique future, et d'optimiser, en concertation avec ces parties, l'intégration de l'efficacité énergétique au stade de la conception de la future installation. Il peut s'agir, par exemple, du personnel de l'installation existante chargé de déterminer les paramètres d'exploitation.

Si l'expertise nécessaire en matière d'efficacité énergétique n'est pas disponible en interne (cas des industries qui consomment peu d'énergie, par ex.), il sera fait appel à une expertise externe.

Intégration accrue des procédés

- Les MTD consistent à rechercher l'optimisation de l'utilisation de l'énergie par plusieurs procédés ou systèmes au sein de l'installation, ou avec une tierce partie

Maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique

- Les MTD consistent à maintenir la dynamique du programme d'efficacité énergétique au moyen de diverses techniques, notamment :
  - mise en œuvre d'un système spécifique de management de l'énergie ;
  - comptabilisation de l'énergie sur la base de valeurs réelles (mesurées) ; la responsabilité en matière d'efficacité énergétique incombe ainsi à l'utilisateur/celui qui paie la facture, et c'est également à lui qu'en revient le mérite ;
  - création de centres de profit en matière d'efficacité énergétique ;
  - analyse comparative ;
  - nouvelle façon d'appréhender les systèmes de management existants ;
  - recours à des techniques de gestion des changements organisationnels.

Les techniques des trois premiers types sont appliquées conformément aux données figurant dans les chapitres correspondants. Les techniques des trois derniers types doivent être appliquées à intervalles suffisamment espacés (plusieurs années) pour permettre l'évaluation des progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique.

Maintien de l'expertise

- Les MTD consistent à maintenir l'expertise en matière d'efficacité énergétique et de systèmes consommateurs d'énergie, notamment par les techniques suivantes :
  - recrutement de personnel qualifié et/ou formation du personnel. La formation peut être dispensée en interne, par des experts externes, au moyen de cours formels ou dans le cadre de l'autoformation/développement personnel ;
  - mise en disponibilité périodique du personnel pour effectuer des contrôles programmés ou spécifiques (sur leur installation d'origine ou sur d'autres) ;
  - partage des ressources internes entre les sites ;
  - recours à des consultants dûment qualifiés pour les contrôles programmés ;
  - externalisation des systèmes et/ou fonctions spécialisés.

Bonne maîtrise des procédés

- Les MTD consistent à s'assurer la bonne maîtrise des procédés, notamment par les techniques suivantes :
  - mise en place de systèmes pour faire en sorte que les procédures soient connues, bien comprises et respectées ;
  - les principaux paramètres de performance sont connus, ont été optimisés concernant l'efficacité énergétique, et font l'objet d'une surveillance ;
  - ces paramètres sont documentés ou sont enregistrés.

Maintenance

- Les MTD consistent à réaliser la maintenance des installations en vue d'optimiser l'efficacité énergétique par l'application de toutes les mesures suivantes :
  - définir clairement les responsabilités de chacun en matière de planification et d'exécution de la maintenance ;
  - établir un programme structuré de maintenance, basé sur les descriptions techniques des équipements, sur les normes, etc., ainsi que sur les éventuelles pannes des équipements et leurs conséquences. Il est préférable de programmer certaines activités de maintenance durant les périodes d'arrêt des installations ;
  - faciliter le programme de maintenance par des systèmes appropriés d'archivage des données et par des tests de diagnostic ;
  - mise en évidence, grâce à la maintenance de routine et en fonction des pannes et/ou des anomalies, d'éventuelles pertes d'efficacité énergétique ou de possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique ;
  - détecter les fuites, les équipements défectueux, les paliers usagés, etc., susceptibles d'influencer ou de contrôler la consommation d'énergie, et y remédier dès que possible.

La nécessité de procéder rapidement aux réparations doit être pondérée par l'obligation de maintenir la qualité du produit et la stabilité du procédé, ainsi que par des considérations ayant trait à la santé et à la sécurité.

Surveillance et mesurage

- Les MTD consistent à établir et à maintenir des procédures documentées pour surveiller et mesurer régulièrement les principales caractéristiques des opérations et activités qui peuvent avoir un impact environnemental significatif. Le présent document propose des techniques appropriées à cet effet.

Meilleures techniques disponibles en matière d'efficacité énergétique pour les systèmes, les procédés, les activités ou les équipements consommateurs d'énergie

Les MTD générales susmentionnées insistent sur la nécessité de considérer l'installation dans son ensemble et d'évaluer les besoins et la finalité des différents systèmes, leurs énergies associées et leurs interactions. Elles comprennent également :

- l'analyse comparative du système et de ses performances ;
- la planification des actions et des investissements destinés à optimiser l'efficacité énergétique, compte tenu du coût et des avantages et des effets croisés ;
- pour les nouveaux systèmes, l'optimisation de l'efficacité énergétique dès la conception de l'installation, de l'unité ou du système, ainsi que lors du choix des procédés ;
- pour les systèmes existants, l'optimisation de l'efficacité énergétique du système par son exploitation et sa gestion, y compris sa surveillance et sa maintenance régulières.

Les MTD présentées ci-après sont applicables aux systèmes énumérés ci-dessous, étant entendu que les MTD générales susmentionnées leur sont également appliquées, dans le cadre de l'optimisation de ces systèmes. ***Les MTD en matière d'efficacité énergétique pour les activités, systèmes et procédés couramment associés dans les installations IPPC peuvent se résumer ainsi :***

- Les MTD consistent à optimiser :
  - la combustion
  - les systèmes à vapeur

par des techniques appropriées telles que :
    - les techniques spécifiques présentées dans les BREF verticaux ;
    - les techniques présentées dans le BREF relatif aux grandes installations de combustion et dans le présent document (sur l'efficacité énergétique).

- Les MTD consistent à optimiser les éléments suivants au moyen de techniques telles que celles qui sont décrites dans le présent document :
  - les systèmes d'air comprimé
  - les systèmes de pompes
  - les systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation)
  - l'éclairage
  - les procédés de séchage, séparation et concentration. Pour ces procédés, les MTD consistent également à rechercher les possibilités d'utilisation de la séparation mécanique, en association avec les procédés thermiques.

Autres MTD applicables aux systèmes, procédés ou activités :

Récupération de chaleur

- Les MTD consistent à maintenir l'efficacité des échangeurs de chaleur par :
  - une surveillance périodique de l'efficacité, et
  - la prévention de l'encrassement ou le nettoyage.

Les techniques de refroidissement et les MTD associées sont présentées dans le BREF relatif aux systèmes de refroidissements industriels, selon lequel la principale MTD est de chercher à utiliser la chaleur en excès au lieu de la dissiper par refroidissement. Lorsqu'un refroidissement est nécessaire, il convient de ne pas négliger les avantages d'un refroidissement naturel (par utilisation de l'air ambiant).

Cogénération

- Les MTD consistent à rechercher les possibilités de cogénération, au sein de l'installation et/ou en dehors de celle-ci (avec une tierce partie).

Dans de nombreux cas, les pouvoirs publics (au niveau local, régional ou national) ont favorisé de tels accords ou sont eux-mêmes la tierce partie.

Alimentation électrique

- Les MTD consistent à augmenter le facteur de puissance suivant les exigences du distributeur d'électricité local, en recourant à des techniques telles que celles qui sont décrites dans le présent document, en fonction de leur applicabilité.
- Les MTD consistent à contrôler l'alimentation électrique pour vérifier la présence d'harmoniques et à appliquer des filtres le cas échéant.
- Les MTD consistent à optimiser l'efficacité de l'alimentation électrique en recourant aux techniques décrites dans le présent document, en fonction de leur applicabilité.

Sous-systèmes entraînés par moteur électrique

Le remplacement par des moteurs utilisant l'électricité de manière efficace et par des variateurs de vitesse est une des mesures les plus simples pour améliorer l'efficacité énergétique. Cependant, il importe de prendre en considération l'ensemble du système dans lequel s'intègre le moteur, faute de quoi on s'expose aux risques suivants :

- perte des avantages potentiels liés à l'optimisation de l'utilisation et de la taille des systèmes, et à l'optimisation consécutive des exigences applicables à l'entraînement par moteur ;
- pertes d'énergie si un variateur de vitesse est utilisé dans une situation qui ne s'y prête pas.

- Les MTD consistent à optimiser les moteurs électriques en respectant l'ordre suivant :
  - optimiser l'ensemble du système dans lequel le ou les moteurs s'intègrent (système de refroidissement, par exemple) ;
  - optimiser ensuite le ou les moteurs du système en fonction des impératifs de charge nouvellement définis, par une ou plusieurs des techniques décrites, en fonction de leur applicabilité ;
  - une fois les systèmes consommateurs d'énergie optimisés, optimiser alors les moteurs restants (non optimisés) suivant les techniques décrites et en fonction de critères tels que ceux définis ci-après :

    i) remplacer en priorité les moteurs tournant plus de 2 000 heures par an ;
    ii) les moteurs électriques commandant une charge variable qui fonctionnent à moins de 50 % de leur capacité plus de 20 % de leur temps de fonctionnement et qui sont utilisés plus de 2 000 heures par an mériteraient sans doute d'être équipés d'un variateur de vitesse.

Degré de consensus

Un haut niveau de consensus a été atteint ; aucun avis divergent n'a été enregistré.

Recherche et développement technologique

Dans le cadre de ses programmes de RDT, la Communauté européenne mène et subventionne une série de projets concernant les technologies propres, les nouvelles techniques de recyclage et de traitement des effluents et les stratégies de gestion en la matière. Ces projets sont susceptibles d'apporter une précieuse contribution lors des futurs réexamens du BREF. Les lecteurs sont donc invités à informer l'EIPPCB de tout résultat de recherche présentant de l'intérêt pour ce document (voir également la préface du BREF).

PRÉFACE

1. Statut du présent document

Sauf indication contraire dans le présent document, la « directive » renvoie à la Directive du Conseil 96/61/CE sur la prévention et la réduction intégrées de la pollution telle que modifiée par la directive 2003/87/CE. La directive s'appliquant sans préjudice des dispositions communautaires sur la santé et la sécurité sur le lieu de travail, il en est de même du présent document.

Le présent document est un document de travail du Bureau européen de l'IPPC. Ce n'est pas une publication officielle des Communautés européennes et il ne reflète pas nécessairement la position de la Commission Européenne.

2. Mandat

En outre, le présent document a été spécifiquement mandaté par une demande spéciale dans la communication de la Commission sur la mise en œuvre du programme européen sur le changement climatique (PECC) (COM (2001)580 final), concernant l'efficacité énergétique dans les installations industrielles. Le PECC demandait de promouvoir la mise en œuvre efficace des dispositions de la directive IPPC relatives à l'efficacité énergétique et préconisait l'élaboration d'un BREF «horizontal» (document de référence sur les meilleures techniques disponibles) spécifique consacré aux techniques génériques d'efficacité énergétique.

3. Obligations légales correspondantes de la directive IPPC et définition des MTD

Pour aider le lecteur à comprendre le contexte légal dans lequel le présent document a été rédigé, certaines des dispositions les plus importantes de la directive IPPC, y compris la définition du terme « meilleures techniques disponibles », sont décrites dans cette préface. Cette description est inévitablement incomplète et n'est donnée qu'à titre d'information. Elle n'a aucune valeur légale et ne modifie, ni n'affecte de quelque manière que ce soit les dispositions effectives de la directive.

La directive a pour objectif la prévention et la réduction intégrées de la pollution résultant des activités mentionnées à l'Annexe I, en vue d'aboutir à un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble incluant l'efficacité énergétique et l'utilisation prudente des ressources naturelles. La base légale de la directive a trait à la protection de l'environnement. Sa mise en œuvre devrait également tenir compte d'autres objectifs communautaires, tels que la compétitivité de l'industrie de la Communauté et le découplage entre croissance et consommation en contribuant ainsi au développement durable. Le Champ d'application apporte des informations supplémentaires sur le fondement légal de l'efficacité énergétique dans la directive.

La directive prévoit plus spécifiquement un système d'autorisation pour certaines catégories d'installations, exigeant tant des opérateurs que des régulateurs, qu'ils adoptent une vision globale intégrée du potentiel de consommation et de pollution de l'installation. L'objectif global d'une telle approche intégrée doit être l'amélioration de la gestion et du contrôle des procédés industriels, afin d'assurer un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble. Au cœur de cette approche, figure le principe général mentionné à l'article 3, selon lequel les opérateurs devraient adopter toutes les mesures préventives appropriées contre la pollution, en particulier par l'application des meilleures techniques disponibles leur permettant d'améliorer leur performance environnementale, y compris l'efficacité énergétique.

Le terme « meilleures techniques disponibles » est défini à l'article 2(11) de la directive comme étant « le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère

impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble. » L'article 2(11) poursuit pour clarifier plus encore cette définition comme suit :

- les « techniques » incluent tant la technologie utilisée que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et démantelée ;

- les techniques « disponibles » sont celles mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou non sur le territoire de l'État membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables ;

- les « meilleures » techniques sont les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

En outre, l'Annexe IV de la directive contient une liste de « considérations à prendre en compte en général ou dans des cas particuliers lors de la détermination des meilleures techniques disponibles, compte tenu des coûts et des avantages pouvant résulter d'une action et des principes de précaution et de prévention ». Ces considérations incluent les informations publiées par la Commission en vertu de l'article 16(2).

Les autorités compétentes chargées de la délivrance des autorisations ont l'obligation de tenir compte des principes généraux stipulés à l'article 3 lors de la détermination des conditions d'obtention de l'autorisation. Ces conditions doivent inclure des valeurs d'émission limites, complétées ou remplacées, le cas échéant, par des paramètres équivalents ou des mesures techniques. Conformément à l'article 9(4) de la directive :
(sans préjudice de la conformité avec les normes de qualité de l'environnement) ces valeurs limites d'émission, les paramètres et les mesures techniques équivalent, doivent êtres fondés sur les meilleures techniques disponibles, sans prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie spécifique, et en prenant en considération les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions environnementales locales. Dans tous les cas, les conditions d'autorisation doivent prévoir des dispositions relatives à la minimisation de la pollution à longue distance ou transfrontalière, et garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

Conformément à l'article 11 de la directive, les États membres ont l'obligation de veiller à ce que les autorités compétentes se tiennent informées ou soient informées de l'évolution des meilleures techniques disponibles.

4. Objectif du présent document

Ce document présente des recommandations générales sur la manière de mettre en œuvre les obligations énoncées dans la directive et rappelées au point (3) ci-dessus.
L'article 16(2) de la directive exige que la Commission organise « un échange d'informations entre les États membres et les industries intéressées au sujet des meilleures techniques disponibles, des prescriptions de contrôle y afférentes et de leur évolution » et qu'elle publie les résultats de cet échange.

Le but de cet échange d'informations est indiqué dans la clause 25 de la directive, qui déclare que « le développement et l'échange d'informations au niveau communautaire en ce qui concerne les meilleures techniques disponibles permettront de réduire les déséquilibres au plan technologique dans la Communauté, favoriseront la diffusion au plan mondial des valeurs limites et des techniques utilisées dans la Communauté et aideront les États membres dans la mise en œuvre efficace de la présente directive ».

La Commission (Direction générale de l'environnement) a mis sur pied un forum d'échange d'informations pour le soutien des travaux selon les termes de l'article 16(2) et un certain

nombre de groupes de travail technique ont été créés sous l'égide de ce forum. Tant le forum d'échange d'informations que les groupes de travail technique incluent des représentants des États membres et de l'industrie, comme l'exige l'article 16(2).

Cette série de documents a pour objet d'être le reflet authentique de l'échange d'informations intervenu selon l'article 16(2) et de communiquer des informations de référence aux autorités qui délivrent les autorisations, afin qu'elles en tiennent compte lors de la détermination des conditions d'autorisation. Par la mise à disposition d'informations pertinentes sur les meilleures techniques disponibles, ces documents devraient faire office d'outils de référence pour faire évoluer la performance environnementale, y compris l'efficacité énergétique.

5. Sources d'informations

Le présent document constitue un résumé des informations rassemblées en provenance de différentes sources, y compris en particulier la connaissance des groupes créés pour assister la Commission dans ses travaux, et il a été vérifié par les services de la Commission. Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements aux groupes d'experts et à toutes les personnes ayant apporté leur contribution.

6. Comment comprendre et utiliser ce document

Les informations contenues dans le présent document sont destinées à être utilisées au titre d'une contribution à la détermination des MTD applicables à l'efficacité énergétique dans des cas spécifiques. Lors de la détermination des MTD et des autorisations d'exploitation basées sur celles-ci, il convient, à tout moment, de tenir compte de l'objectif global d'obtention d'un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble incluant l'efficacité énergétique.

Le reste de la présente préface décrit le type d'informations fournies dans chaque section du document.

Le chapitre 1 est une introduction aux termes et concepts utilisés dans le domaine de l'énergie et de la thermodynamique. Il donne les définitions de l'efficacité énergétique pour l'industrie, indique les méthodes pour mettre au point et définir des indicateurs de surveillance de l'efficacité énergétique, et examine l'importance de la définition des limites pour les installations, ainsi que pour les systèmes et/ou les unités qui les composent.

Les chapitres 2 et 3 décrivent de manière plus détaillée les techniques permettant d'assurer l'efficacité énergétique rencontrées dans plusieurs secteurs de l'industrie et qui sont considérées comme étant les plus pertinentes pour déterminer les MTD et les autorisations d'exploitation basées sur les MTD :

- Le chapitre 2 décrit les techniques pouvant être appliquées au niveau d'une installation dans son ensemble.
- Le chapitre 3 décrit les techniques pouvant être appliquées à des systèmes et des équipements spécifiques utilisant une quantité importante d'énergie et que l'on rencontre fréquemment dans les installations.

Ces informations donnent un aperçu de l'efficacité énergétique pouvant être obtenue, des coûts et des effets croisés associés à la technique et elles précisent aussi dans quelle mesure la technique est applicable à la gamme d'installations exigeant des autorisations en vertu de l'IPPC, par exemple les installations existantes ou nouvelles, de petite ou de grande capacité. Les techniques qui sont d'une manière générale considérées comme étant obsolètes n'en font pas partie.

Le chapitre 4 présente les techniques qui, au sens général, sont considérées comme étant compatibles avec les MTD. Il a donc pour objectif de fournir des indications générales sur les

techniques d'efficacité énergétique, qui peuvent être considérés comme un point de référence apte à contribuer à la détermination des conditions d'autorisation basées sur les MTD ou à l'établissement de règles générales obligatoires selon l'article 9(8). Toutefois, il convient de souligner, que le présent document ne propose pas de valeurs d'efficacité énergétique pour les autorisations. La détermination des autorisations appropriées impliquera la prise en compte des facteurs locaux spécifiques au site, telles que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, sa situation géographique et les conditions environnementales locales. Dans le cas d'installations existantes, les faisabilités économique et technique de leur mise à niveau doivent également être prises en compte. En outre, le seul objectif de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera souvent de prendre des décisions de compromis entre les différents types d'impacts environnementaux, ces dernières étant souvent influencées par des considérations locales.

Le chapitre 5 apporte des informations complémentaires sur la politique et les incitations financières, et présente d'autres techniques susceptibles d'être envisagées par les exploitants afin de leur faciliter la mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie pour leur activité dans son ensemble.

En dépit d'une tentative d'aborder quelques-unes de ces questions, il n'est pas possible de les prendre entièrement en considération dans le présent document. Par conséquent, les techniques et les niveaux présentés au chapitre 4 ne seront pas nécessairement adaptés à toutes les installations. En revanche, l'obligation d'assurer un niveau élevé de protection de l'environnement, et notamment de réduire au minimum la pollution à longue distance ou transfrontière implique que les conditions d'autorisation ne peuvent être fixées sur la base de considérations purement locales. Il est donc essentiel que les autorités qui délivrent les autorisations tiennent pleinement compte des informations contenues dans le présent document.

Étant donné que les meilleures techniques disponibles évoluent avec le temps, le présent document sera révisé et mis à jour selon les besoins. Toutes les observations et suggestions devront être soumises au Bureau européen de prévention et de réduction intégrées de la pollution (EIPPCB) auprès de l'Institut de prospective technologique à l'adresse suivante

Edificio Expo, c/Inca Garcilaso, s/n, E-41092 Séville, Espagne
Téléphone : +34 95 4488 284
Fax : +34 95 4488 426
Courriel : JRC-IPTS-EIPPCB@ec.europa.eu
Internet : http://eippcb.jrc.es

Document de référence sur les meilleures techniques disponibles applicables à l'efficacité énergétique

RÉSUMÉ
PRÉFACE
CHAMP D'APPLICATION
1 INTRODUCTION ET DÉFINITION
1.1 Introduction
1.1.1 L'énergie dans le secteur industriel de l'UE
1.1.2 Les impacts de l'utilisation de l'énergie
1.1.3 Contribution de l'efficacité énergétique à une réduction des conséquences du réchauffement climatique et à une amélioration du développement durable
1.1.4 Efficacité énergétique et directive IPPC
1.1.5 Efficacité énergétique dans la prévention et régulation intégrées de la pollution
1.1.6 Aspects économiques et effets croisés
1.2 Énergie et lois de la thermodynamique
1.2.1 Énergie, chaleur, puissance et travail
1.2.2 Lois de la thermodynamique
1.2.2.1 Première loi de la thermodynamique : la transformation de l'énergie
1.2.2.2 Deuxième loi de la thermodynamique : augmentation de l'entropie
1.2.2.3 Bilan d'exergie : combinaison de la première et de la deuxième loi
1.2.2.4 Diagrammes de propriétés
1.2.2.5 Autres informations
1.2.2.6 Identification des irréversibilités
1.3 Définitions des indicateurs d'efficacité énergétique et de l'amélioration de l'efficacité énergétique
1.3.1 Efficacité énergétique et évaluation selon la directive IPPC
1.3.2 Utilisation efficace et inefficace de l'énergie
1.3.3 Indicateurs d'efficacité énergétique
1.3.4 Introduction à l'utilisation des indicateurs
1.3.5 Importance des systèmes et des limites des systèmes
1.3.6 Autres terminologies importantes connexes
1.3.6.1 Énergie primaire, énergie secondaire et énergie finale
1.3.6.2 Pouvoirs calorifiques et efficacités des combustibles
1.3.6.3 Gestion côté offre et côté demande
1.4 Indicateurs de l'efficacité énergétique dans l'industrie
1.4.1 Introduction : définition des indicateurs et d'autres paramètres
1.4.2 Efficacité énergétique dans les unités de production
1.4.2.1 Exemple 1. Cas simple
1.4.2.2 Exemple 2. Cas type
1.4.3 Efficacité énergétique d'un site
1.5 Éléments à prendre en compte pour définir des indicateurs d'efficacité énergétique
1.5.1 Définition de la limite des systèmes
1.5.1.1 Conclusions sur les systèmes et les limites des systèmes
1.5.2 Autres points importants à prendre en considération au niveau de l'installation
1.5.2.1 Enregistrement des méthodes utilisées pour l'établissement de rapports
1.5.2.2 Production et utilisation de l'énergie en interne
1.5.2.3 Valorisation des déchets et des gaz de torchère
1.5.2.4 Facteur de charge (réduction de la consommation d'énergie spécifique avec une augmentation de la production)
1.5.2.5 Changement de techniques de production et de développement de produit
1.5.2.6 Intégration de l'énergie
1.5.2.7 Utilisation inefficace de l'énergie contribuant au développement durable et/ou à l'efficacité globale d'un site
1.5.2.8 Chauffage et climatisation des locaux

1.5.2.9 Facteurs régionaux
1.5.2.10 Chaleur sensible
1.5.2.11 Autres exemples
2 TECHNIQUES À PRENDRE EN CONSIDÉRATION POUR PARVENIR À L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE AU NIVEAU D'UNE INSTALLATION
2.1 Systèmes de management de l'efficacité énergétique (SM2E)
2.2 Planification et définition d'objectifs et de cibles
2.2.1 Poursuite des améliorations au plan environnemental et effets croisés
2.2.2 Approche systémique du management énergétique
2.3 Prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED)
2.3.1 Sélection de la technologie des procédés
2.4 Intégration accrue des procédés
2.5 Maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique
2.6 Maintien de l'expertise – ressources humaines
2.7 Communication
2.7.1 Diagrammes de Sankey
2.8 Bonne maîtrise des procédés
2.8.1 Systèmes de contrôles de procédés
2.8.2 Systèmes de gestion de la qualité (contrôle, assurance)
2.9 Maintenance
2.10 Surveillance et mesurage
2.10.1 Techniques de mesure indirecte
2.10.2 Estimations et calculs
2.10.3 Systèmes de mesure et de mesure avancée
2.10.4 Mesure de débit avec faible chute de pression dans les canalisations
2.11 Audits et diagnostics énergétiques
2.12 Méthodologie du pincement
2.13 Analyse de l'enthalpie et de l'exergie
2.14 Thermoéconomie
2.15 Modèles énergétiques
2.15.1 Modèles énergétiques, bases de données et bilans
2.15.2 Optimisation et management modélisé des utilités
2.16 Analyse comparative
2.17 Autres outils
3 TECHNIQUES À PRENDRE EN CONSIDÉRATION POUR PARVENIR À L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES SYSTÈMES, LES PROCÉDÉS OU LES ACTIVITÉS UTILISANT DE L'ÉNERGIE
3.1 Combustion
3.1.1 Réduction de la température des gaz de combustion
3.1.1.1 Installation d'un préchauffeur d'air ou d'eau
3.1.2 Brûleurs récupératifs et régénératifs
3.1.3 Réduction du débit massique des gaz brûlés par une réduction de l'air en excès
3.1.4 Régulation et contrôle des brûleurs
3.1.5 Choix du combustible
3.1.6 Oxy-combustion (oxycombustible)
3.1.7 Réduction des pertes de chaleur grâce à l'isolation
3.1.8 Réduction des pertes de chaleur par les ouvertures du four
3.2 Systèmes à vapeur
3.2.1 Caractéristiques générales de la vapeur
3.2.2 Présentation générale des mesures visant à améliorer la performance des systèmes à vapeur
3.2.3 Dispositifs d'étranglement et utilisation des turbines à contre-pression
3.2.4 Techniques d'exploitation et de contrôle
3.2.5 Préchauffage de l'eau d'alimentation (incluant l'utilisation d'économiseurs)
3.2.6 Prévention et élimination des dépôts de tartre sur les surfaces de transfert de chaleur
3.2.7 Minimisation des purges de la chaudière

3.2.8 Optimisation du taux de mise à l'air libre du désaérateur
3.2.9 Minimisation des pertes dues aux cycles courts des chaudières
3.2.10 Optimisation des systèmes de distribution de vapeur
3.2.11 Calorifugeage des canalisations vapeur et des canalisations de retour du condensat
3.2.11.1 Installation de plaques d'isolation amovibles sur les vannes et les raccords3.2.12 Mise en place d'un programme de contrôle et de réparation pour les purgeurs de vapeur
3.2.13 Collecte et retour du condensat à la chaudière pour réemploi
3.2.14 Réemploi de la vapeur de détente
3.215 Récupération de l'énergie à partir des purges de la chaudière
3.3 Récupération de chaleur et refroidissement
3.3.1 Échangeurs de chaleur
3.3.1.1 Surveillance et maintenance des échangeurs de chaleur
3.3.2 Pompes à chaleur (y compris recompression mécanique de la vapeur (MVR)
3.3.3 Refroidisseurs et systèmes de refroidissement
3.4 Cogénération
3.4.1 Différents types de cogénération
3.4.2 Trigénération
3.4.3 Refroidissement urbain
3.5 Alimentation électrique
3.5.1 Correction du facteur de puissance
3.5.2 Harmoniques
3.5.3 Optimisation de l'approvisionnement
3.5.4 Management de l'efficacité énergétique des transformateurs
3.6 Sous-systèmes entraînés par moteur électrique
3.6.1 Moteurs à haut rendement (EEM)
3.6.2 Dimensionnement correct
3.6.3 Variateurs de vitesse
3.6.4 Pertes dans les transmissions
3.6.5 Réparation des moteurs
3.6.6 Rebobinage
3.6.7 Avantages obtenus pour l'environnement, effets croisés, applicabilité et autres considérations concernant les techniques d'efficacité énergétique pour les moteurs électriques
3.7 Systèmes d'air comprimé (SAC)
3.7.1 Conception du système
3.7.2 Entraînements à vitesse variable (EEV)
3.7.3 Moteurs à haut rendement (HEM)
3.7.4 Modules de pilotage centralisé des systèmes d'air comprimé
3.7.5 Récupération de chaleur
3.7.6 Réduction des fuites des systèmes d'air comprimé
3.7.7 Maintenance des filtres
3.7.8 Alimentation des compresseurs avec de l'air frais extérieur
3.7.9 Optimisation du niveau de pression
3.7.10 Stockage de l'air comprimé à proximité des utilisations à forte fluctuation
3.8 Systèmes de pompage
3.8.1 Inventaire et évaluation des systèmes de pompage
3.8.2 Choix des pompes
3.8.3 Réseau de canalisation
3.8.4 Maintenance
3.8.5 Contrôle et régulation du système de pompage
3.8.6 Moteur et transmission
3.8.7 Avantages obtenus pour l'environnement, effets croisés, applicabilité et autres considérations concernant les techniques d'efficacité énergétique pour les systèmes de pompage
3.9 Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)
3.9.1 Chauffage et refroidissement des locaux

3.9.2	Ventilation
3.9.2.1	Optimisation de la conception d'un système de ventilation nouveau ou modernisé
3.9.2.2	Amélioration d'un système de ventilation existant à l'intérieur d'une installation
3.9.3	Refroidissement gratuit (free-cooling)
3.10	Éclairage
3.11	Procédés de séchage, de séparation et de concentration
3.11.1	Sélection de la technologie ou de la combinaison de technologies optimales
3.11.2	Procédés mécaniques
3.11.3	Techniques de séchage thermique
3.11.3.1	Calcul des besoins en énergie et du rendement énergétique
3.11.3.2	Chauffage direct
3.11.3.3	Chauffage indirect
3.11.3.4	Vapeur surchauffée
3.11.3.5	Récupération de la chaleur dans les procédés de séchage
3.11.3.6	Recompression mécanique de la vapeur ou pompes à chaleur avec évaporation
3.11.3.7	Optimisation de l'isolation du système de séchage
3.11.4	Énergies radiantes
3.11.5	Régulation assistée par ordinateur/automatisation des procédés de séchage thermique
4	MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES
4.1	Introduction
4.2	Meilleures techniques disponibles pour parvenir à l'efficacité énergétique au niveau d'une installation
4.2.1	Management de l'efficacité énergétique
4.2.2	Planification et définition d'objectifs et de cibles
4.2.2.1	Amélioration environnementale continue
4.2.2.2	Identification des aspects pertinents d'une installation en matière d'efficacité énergétique et des opportunités d'économies d'énergie
4.2.2.3	Approche systémique du management de l'énergie
4.2.2.4	Fixation et réexamen d'objectifs et d'indicateurs d'efficacité énergétique
4.2.2.5	Analyse comparative
4.2.3	Prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED)
4.2.4	Intégration accrue des procédés
4.2.5	Maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique
4.2.6	Maintien de l'expertise
4.2.7	Bonne maîtrise des procédés
4.2.8	Maintenance
4.2.9	Surveillance et mesurage
4.3	Meilleures techniques disponibles en matière d'efficacité énergétique pour les systèmes, les procédés, les activités ou les équipements consommateurs d'énergie
4.3.1	Combustion
4.3.2	Systèmes à vapeur
4.3.3	Récupération de chaleur
4.3.4	Cogénération
4.3.5	Alimentation électrique
4.3.6	Sous-systèmes entraînés par moteur électrique
4.3.7	Systèmes d'air comprimé (SAC)
4.3.8	Systèmes de pompage
4.3.9	Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)
4.3.10	Éclairage
5	TECHNIQUES ÉMERGENTES POUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
5.1	Combustion sans flamme (oxydation sans flamme)
5.2	Stockage d'énergie par air comprimé
6	CONCLUSIONS
6.1	Chronologie des travaux

6.2 Sources de l'information
6.3 Degré de consensus
6.4 Lacunes et recouvrements des connaissances et recommandations concernant la collecte et la recherche d'information future
6.4.1 Lacunes et recouvrements des données
6.4.2 Thèmes suggérés pour la recherche et les travaux futurs

RÉFÉRENCES

GLOSSAIRE
7 ANNEXES
7.1 Énergie et lois de la thermodynamique
7.1.1 Principes généraux
7.1.1.1 Caractérisation des systèmes et des procédés
7.1.1.2 Formes de stockage et de transfert énergétique
7.1.1.2.1 Stockage d'énergie
7.1.1.2.2 Transfert d'énergie
7.1.2 Première et seconde lois de la thermodynamique
7.1.2.1 Première loi de la thermodynamique : équilibre énergétique
7.1.2.1.1 Équilibre énergétique pour un système fermé
7.1.2.1.2 Bilan énergétique des systèmes ouverts
7.1.2.1.3 Rendements associés à la première loi : rendement thermique et coefficient de performance
7.1.2.2 Seconde loi de la thermodynamique : entropie
7.1.2.2.1 Entropie
7.1.2.2.2 Bilan d'entropie pour systèmes fermés
7.1.2.3 Bilan d'entropie pour un système ouvert
7.1.2.4 Analyse de l'exergie
7.1.2.4.1 Exergie
7.1.2.4.2 Bilans d'exergie
7.1.2.4.3 Rendement associé à la deuxième loi thermodynamique : rendement exergétique
7.1.3 Diagrammes de propriétés et tables, banques de données et programmes informatiques
7.1.3.1 Diagrammes des propriétés
7.1.3.2 Tables de propriétés, banques de données et programmes de simulation
7.1.3.3 Identification des inefficacités
7.1.4 Nomenclature
7.14.1 Bibliographie
7.2 Études de cas d'irréversibilités thermodynamiques
7.2.1 Cas 1. Dispositifs d'étranglement
7.2.2 Cas 2. Échangeurs de chaleur
7.2.3 Cas 3. Procédés de mélangeage
7.3 Exemple d'application de l'efficacité énergétique
7.3.1 Craqueur d'éthylène
7.3.2 Production de monomère d'acétate de vinyle (VAM)
7.3.3 Laminoir à chaud d'une aciérie
7.4 Exemples de mise en œuvre de systèmes de management de l'efficacité énergétique
7.5 Exemple de procédés d'efficacité énergétique centralisés
7.6 Exemple de maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique : Excellence opérationnelle
7.7 Surveillance et mesurage
7.7.1 Mesures quantitatives – réalisation de mesures
7.7.2 Utilités basées sur un modèle - optimisation et gestion
7.7.3 Modèles, bases de données et bilans énergétiques

7.8 Autres outils utilisés comme outils d'audit et à l'appui d'autres techniques employées au niveau du site
7.8.1 Outils d'audit et de management de l'énergie
7.8.2 Protocole de mesure et de vérification
7.9 Analyse comparative
7.9.1 Raffineries d'huile minérale
7.9.2 Agence autrichienne de l'énergie
7.9.3 Schéma pour les PME en Norvège
7.9.4 Accords de type volontaire fondés sur des analyses comparatives aux Pays-Bas
7.9.5 Analyse comparative dans l'industrie du verre
7.9.6 Allocation d'énergie / d'émissions de CO2 entre différents produits dans un procédé complexe comportant des étapes successives
7.10 Exemples du chapitre 3
7.10.1 Vapeur
7.10.2 Récupération de chaleur
7.10.3 Cogénération
7.10.4 Trigénération
7.11 Gestion de la demande
7.12 Sociétés de services énergétiques (ESCO)
7.13 Site Internet de la Commission européenne et Plans d'action nationaux en matière d'efficacité énergétique (NEEAP)
7.14 Système européen d'échange de quotas d'émissions (ETS)
7.15 Optimisation des systèmes de transport
7.15.1 Audit énergétique des chaînes de transport
7.15.2 Gestion de l'énergie dans le transport routier
7.15.3 Amélioration du conditionnement pour optimiser l'utilisation des transports
7.16 Ventilation européenne des différentes sources d'énergie
7.17 Correction du facteur de puissance électrique

Liste des figures

Figure 1 : Utilisation des BREF sectoriels verticaux avec des BREF horizontaux
Figure 1.1 : Pourcentage de la demande en énergie primaire de l'UE - Industries de transformation
Figure 1.2 : Augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis 1750 exprimée en ppm d'équivalent CO2 selon divers scénarios
Figure 1.3 : Consommation d'énergie de l'industrie chimique de 1975 à 2003
Figure 1.4 : Système thermodynamique
Figure 1.5 : Diagramme Pression – Température (phase)
Figure 1.6 : Définition des énergies primaire, secondaire et finale
Figure 1.7 : Vecteurs énergétiques dans une production simple
Figure 1.8 : Vecteurs énergétiques d'une unité de production
Figure 1.9 : Entrées et sorties d'un site
Figure 1.10 : Limite du système – ancien moteur électrique
Figure 1.11 : Limite du système – Nouveau moteur électrique
Figure 1.12 : Limite du système – nouveau moteur électrique et ancienne pompe
Figure 1.13 : Limite du système – Nouveau moteur électrique et nouvelle pompe
Figure 1.14 : Nouveau moteur électrique et nouvelle pompe avec une sortie constante
Figure 1.15 : Nouveau moteur électrique, nouvelle pompe et ancien échangeur de chaleur
Figure 1.16 : Nouveau moteur électrique, nouvelle pompe et deux échangeurs de chaleur
Figure 1.17 : Consommation d'énergie en fonction de la température extérieure

Figure 2.1 : Amélioration continue d'un système de management de l'efficacité énergétique
Figure 2.2. : Exemple de variations possibles de la consommation d'énergie dans le temps
Figure 2.3 : Exemples de total des coûts de propriété pour des équipements industriels types (sur une durée de vie de 10 ans)

Figure 2.4 : Potentiels d'économie et investissements dans la phase conception par rapport à la phase opérationnelle
Figure 2.5 : Domaines à traiter en phase de conception plutôt qu'en phase opérationnelle
Figure 2.6 : Organisation recommandée, incluant un expert en énergie dans la planification et la conception de nouvelles installations
Figure 2.7 : Diagramme de Sankey : combustibles et pertes dans une usine type
Figure 2.8 : Structure d'un système de mesure avancé
Figure 2.9 : Propriétés des modèles d'audits énergétiques
Figure 2.10 : Schéma d'un audit énergétique de type exhaustif
Figure 2.11 : Deux flux chauds
Figure 2.12 : Courbe composite chaude
Figure 2.13 : Courbes composites faisant apparaître le pincement et les objectifs énergétiques
Figure 2.14 : Représentation schématique des systèmes au-dessus et au-dessous du pincement
Figure 2.15 : Transfert de chaleur par pincement depuis le puits de chaleur vers la source de chaleur
Figure 2.16 : Économies d'énergie identifiées par la méthodologie du pincement
Figure 2.17 : Facteur de puissance d'un dispositif en fonction du facteur de charge

Figure 3.1: Bilan énergétique d'une installation de combustion
Figure 3.2 : Schéma d'un système de combustion avec préchauffeur d'air
Figure 3.3 : Principe de fonctionnement des brûleurs régénératifs
Figure 3.4 : Différentes régions de combustion
Figure 3.5 : Génération de vapeur et système de distribution type
Figure 3.6 : Système de régulation moderne pour optimiser l'emploi d'une chaudière
Figure 3.7 : Préchauffage de l'eau d'alimentation
Figure 3.8 : Diagramme d'une pompe à chaleur à compression
Figure 3.9 : Diagramme d'une pompe à chaleur à absorption
Figure 3.10: Installation MVR simple
Figure 3.11: COP en fonction de l'élévation de température pour un système MVR type
Figure 3.12 : Centrale à contre-pression
Figure 3.13 : Centrale à condensation avec extraction
Figure 3.14 : Turbine à gaz avec chaudière de récupération de chaleur
Figure 3.15 : Centrale électrique à cycle combiné
Figure 3.16 : Moteur à combustion interne ou à pistons
Figure 3.17 : Comparaison entre le rendement d'une centrale électrique à condensation et d'une centrale électrique de production combinée de chaleur et d'électricité
Figure 3.18 : Comparaison de la trigénération à une production d'énergie séparée pour un grand aéroport
Figure 3.19 : La trigénération permet d'optimiser l'exploitation de l'usine pendant toute l'année
Figure 3.20 : Refroidissement urbain en hiver grâce à la technologie de refroidissement gratuit
Figure 3.21 : Refroidissement urbain par technologie à absorption pendant l'été
Figure 3.22 : Puissance réactive et apparente
Figure 3.23 : Diagramme d'un transformateur
Figure 3.24 : Relation entre les pertes dans les composants en fer, en cuivre, le rendement et le facteur de charge
Figure 3.25: Schémas de deux systèmes de pompage : classique et à bon rendement énergétique
Figure 3.26 : Moteur de compresseur avec une sortie nominale de 24 MW
Figure 3.27 : Rendement des moteurs à induction triphasés
Figure 3.28 : Rendement d'un moteur électrique en fonction de la charge
Figure 3.29 : Coût d'un nouveau moteur comparé à celui d'un rebobinage
Figure 3.30 : Coûts d'un moteur électrique sur sa durée de vie
Figure 3.31 : Composants types d'un système d'air comprimé (SAC)
Figure 3.32 : Types de compresseurs
Figure 3.33 : Différents profils de demande

Figure 3.34 : Différents types de régulation des compresseurs
Figure 3.35 : Débit rendement maximal par rapport à la hauteur de charge, puissance et rendement
Figure 3.36 : Capacité de la pompe en fonction de la hauteur de charge
Figure 3.37 : Hauteur de charge de la pompe en fonction du débit
Figure 3.38 : Exemple de consommation d'énergie de deux systèmes de régulation de pompes rotodynamiques
Figure 3.39 : Coûts d'une pompe industrielle de taille moyenne sur sa durée de vie
Figure 3.40 : Schéma d'un système CVC
Figure 3.41: Système de ventilation
Figure 3.42 : Organigramme : optimisation de la consommation d'énergie dans les systèmes de ventilation
Figure 3.43 : Schéma d'un exemple de mise en œuvre du refroidissement gratuit
Figure 3.44 : Consommation d'énergie relative des procédés de séparation
Figure 3.45 : Plages de consommation d'énergie secondaire spécifique de différents types de sécheurs lors de la vaporisation de l'eau

Figure 5.1. : Principe de fonctionnement des brûleurs régénératifs
Figure 5.2 : Puissance calorifique nette obtenue lors des essais d'un brûleur classique et d'un brûleur HiTAC

Figure 7.1 : Diagramme température-entropie
Figure 7.2 : Processus d'étranglement de la vapeur
Figure 7.3 : Diagrammes T-S et h-S pour le processus d'étranglement de la vapeur de l'exemple
Figure 7.4 : Échangeur de chaleur à contre-courant
Figure 7.5 : Processus de resurchauffe d'un flux de vapeur
Figure 7.6 : Diagrammes T-s et h-s pour le processus de resurchauffe de la vapeur de l'exemple
Figure 7.8 : Chambre de mélange de deux flux
Figure 7.9 : Diagramme T-s pour le procédé de mélangeage de l'exemple
Figure 7.10 : Entrées et sorties d'une usine de monomère d'acétate de vinyle (VAM)
Figure 7.11 : Schéma de procédé d'un laminoir à chaud
Figure 7.12 : Consommation d'énergie spécifique dans un laminoir
Figure 7.13 : Variations de la consommation d'énergie spécifique d'un laminoir
Figure 7.14 : Schéma du procédé utilisé dans la raffinerie d'alumine Eurallumina
Figure 7.15 : Cycle opérationnel de réchauffeurs
Figure 7.16 : Système de récupération de la chaleur relié au système de chauffage urbain
Figure 7.17 : Explication de la puissance réactive et apparente

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur indicatifs pour divers combustibles

Tableau 2.1 : Décomposition des informations pour les systèmes et techniques décrits dans les chapitres 2 et 3
Tableau 2.2 : Exemples d'activités liées à la prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception d'un nouveau site industriel
Tableau 2.3 : Économies obtenues et investissements dans cinq projets pilotes de prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED)
Tableau 2.4 : Projet pilote EUREM : économie par participant
Tableau 2.5 : Exemples de chute de pression provoquée par différents systèmes de mesure
Tableau 2.6 : Méthodologie du pincement : quelques exemples d'application et d'économies
Tableau 2.7 : Agents moteurs de la démarche des sociétés pour utiliser un optimiseur

Tableau 3.1 : Décomposition des informations pour les systèmes et techniques décrits dans les Chapitre 2 et 3
Tableau 3.2 : Présentation générale des techniques pour améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes de combustion figurant dans les BREF LCP et ENE
Tableau 3.3 : Calcul du coefficient de Siegert pour différents types de combustibles
Tableau 3.4 : Économies possibles grâce au préchauffage de l'air de combustion
Tableau 3.5 : Énergie utilisée pour générer de la vapeur dans plusieurs industries
Tableau 3.6 : Techniques d'efficacité énergétique courantes pour les systèmes à vapeur industriels
Tableau 3.7 : Valeurs pour : gaz naturel comme combustible, 15 % d'excès d'air et température finale de la cheminée de 120 °C
Tableau 3.8 : Différences de transfert de chaleur
Tableau 3.9 : Contenu en énergie d'une purge
Tableau 3.10 : Déperdition thermique par 30 mètres de canalisation vapeur non isolée
Tableau 3.11 : Économies d'énergie approximative en watt grâce à l'installation de coquille isolante amovible pour vanne (W)
Tableau 3.12 : Pertes de vapeur occasionnées par des fuites sur des purgeurs de vapeur
Tableau 3.13 : Diverses phases de fonctionnement des purgeurs de vapeur
Tableau 3.14 : Facteurs d'exploitation concernant les pertes de vapeur des purgeurs de vapeur
Tableau 3.15 : Facteur de charge des pertes de vapeur
Tableau 3.16 : Pourcentage d'énergie totale présente dans le condensat à pression atmosphérique et vapeur de détente
Tableau 3.17 : Énergie récupérée dans les pertes dues aux purges
Tableau 3.18: Exemples de conditions requises pour les procédés et de MTD
Tableau 3.19 : Exemples de caractéristiques de sites et de MTD
Tableau 3.20 : Liste des technologies de cogénération et des rapports électricité/chaleur par défaut
Tableau 3.21 : Estimation de la consommation d'électricité de l'industrie dans l'UE 25 en 2002
Tableau 3.22 : Mesures d'économie d'énergie dans les sous-systèmes d'entraînement
Tableau 3.23 : Mesures d'économies d'énergie dans les systèmes d'air comprimé
Tableau 3.24 : Composants types d'un système d'air comprimé
Tableau 3.25 : Exemple d'économies de coût
Tableau 3.26 : Économies obtenues grâce à l'alimentation du compresseur avec de l'air froid extérieur
Tableau 3.27 : Caractéristiques et rendement des différents types de lampes
Tableau 3.28 : Économies réalisables à partir des systèmes d'éclairage
Tableau 3.29: Types d'évaporateurs et consommations spécifiques

Tableau 4.1 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes de combustion
Tableau 4.2 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes à vapeur
Tableau 4.3 : Techniques de correction du facteur de puissance électrique pour améliorer l'efficacité énergétique
Tableau 4.4 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les alimentations électriques

Tableau 4.5 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les moteurs électriques
Tableau 4.6 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes d'air comprimé
Tableau 4.7 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes de pompage
Tableau 4.8 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation
Tableau 4.9 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes d'éclairage
Tableau 4.10 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les procédés de séchage, séparation et concentration

Tableau 7.1 : Quelques valeurs de dérivées
Tableau 7.2 : Valeurs maximum pour les mélanges
Tableau 7.3 : Capacité mondiale de production d'acrylamide : 105 tonnes/an
Tableau 7.4 : Comparaison des procédés de production d'acrylamide
Tableau 7.5 : Comparaison de la consommation d'énergie exprimée en MJ/kg acrylamide
Tableau 7.6 : Comparaison de la production de CO2 - Kg CO2/kg acrylamide
Tableau 7.7 : Économie d'énergie réalisée grâce à un système à encre EB
Tableau 7.8 : Modèle électrique simple
Tableau 7.9 : Données d'un modèle d'énergie thermique (côté générateurs)
Tableau 7.10 : Données d'un modèle d'énergie thermique (côté utilisateurs)
Tableau 7.11 : Facteurs d'exploitation concernant les pertes de vapeur des purgeurs de vapeur
Tableau 7.12 : Facteur de charge des pertes de vapeur
Tableau 7.13 : Potentiel de valorisation énergétique d'un condenseur d'évacuation pour plusieurs vitesses vapeur et diamètres de tuyaux
Tableau 7.14 : Pourcentage de vapeur obtenue par masse de condensat en fonction de la pression du condensat et de la pression de la vapeur
Tableau 7.15 : Données techniques de la centrale de trigénération de l'aéroport Barajas
Tableau 7.16 : Avantages et inconvénients de la location d'un équipement pour système à air comprimé (CAS)
Tableau 7.17 : Avantages et inconvénients de la fourniture d'un système à air comprimé (CAS) via une société de services énergétiques (ESCO)
Tableau 7.18 : Avantages et inconvénients concernant la fourniture d'énergie via une société de services énergétiques (ESCO)

CHAMP D'APPLICATION

Le présent document et les autres BREF de la série (voir la liste au verso de la page de titre) sont destinés à couvrir les questions relatives à l'efficacité énergétique en application de la directive IPPC. L'efficacité énergétique (ENE) ne se limite pas à l'un ou l'autre des secteurs industriels mentionnés dans l'Annexe 1 de la directive en tant que tel, mais elle constitue une question horizontale qu'il convient de prendre en compte dans tous les cas (comme décrit ci-dessous). La directive comporte des références directes et indirectes à l'énergie et à l'efficacité énergétique dans les préambules et les articles énoncés ci-après (par ordre d'apparition dans la Directive) :

- (Considérant) 1. Considérant que les objectifs et les principes de la politique communautaire en matière d'environnement, tels que définis à l'article 130 R du traité, visent notamment à la prévention, à la réduction et, dans la mesure du possible, à l'élimination de la pollution, en agissant par priorité à la source, ainsi qu'à assurer une gestion prudente des ressources naturelles, dans le respect du principe du pollueur payeur et de la prévention de la pollution; (*en règle générale, la majeure partie de l'énergie en Europe provient de ressources naturelles non renouvelables)*

- (Considérant) 2. Considérant que le cinquième programme d'action en matière d'environnement, … dans leur résolution du 1er février 1993 concernant un programme communautaire de politique et d'action en matière d'environnement et de développement durable (4), accorde la **priorité à la réduction intégrée de la pollution, en tant qu'élément important de l'évolution vers un équilibre plus durable entre activité humaine et développement socio-économique, d'une part, et les ressources et la capacité régénératrice de la nature, d'autre part** ;

- Article 2(2) : on entend par « pollution » l'introduction directe ou indirecte …de vibrations, de **chaleur** ou de bruit susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité de l'environnement… *(les vibrations, la chaleur ou le bruit sont des manifestations de l'énergie)*

- Article 3 : Les États membres prennent les dispositions nécessaires pour que les autorités compétentes s'assurent que l'installation sera exploitée de manière à ce que :
  (d) **l'énergie soit utilisée de manière efficace**

- Article 6.1 : Les États membres prennent les mesures nécessaires afin qu'une demande d'autorisation adressée à l'autorité compétente comprenne une description de :
- des matières premières et auxiliaires, des substances et **de l'énergie utilisées dans ou produites** par l'installation

- Article 9.1 : Les États membres s'assurent que l'autorisation comprend toutes les mesures nécessaires pour remplir les conditions de l'autorisation, visées aux articles 3 et 10, **(qui comprend l'efficacité énergétique, voir (b) ci-dessus)**

- Annexe IV (alinéa 9). L'une des considérations à prendre en compte en général ou dans un cas particulier lors de la détermination des meilleures techniques disponibles est la consommation et la nature des matières premières (y compris de l'eau) utilisées dans le procédé **et leur efficacité énergétique.**

La Directive IPPC a été modifiée par la directive du Conseil 2003/87/CE du 13 Octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté (Directive sur les quotas (ETS)) :

- Article 9(3) : Pour les activités énumérées à l'annexe I de la directive 2003/87/CE, les États membres ont la faculté **de ne pas imposer d'exigence en matière d'efficacité énergétique**

en ce qui concerne **les unités de combustion et les autres unités émettant du dioxyde de carbone** sur le site.

L'efficacité énergétique est une question prioritaire à l'intérieur de l'Union européenne et le présent document sur l'efficacité énergétique possède des liens avec d'autres instruments politiques et juridiques communautaires. Les exemples clés sont :

Instruments politiques :

- la Déclaration de Berlin de mars 2007
- le Plan d'action pour l'efficacité énergétique : réaliser le potentiel d'octobre 2007 COM(2006)545 FINAL
- le Livre vert sur l'efficacité énergétique COM(2005)265 final du 22 juin 2005
- Communication de la Commission sur la mise en œuvre du programme européen sur le changement climatique [COM(2001)580 final] (PECC) concernant l'efficacité énergétique dans les installations industrielles (qui a mandaté spécifiquement le présent document, voir Préface)
- le Livre vert de la Commission du 29 novembre 2000 : « Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement » (COM(2000) 769 final)

Instruments juridiques :

- Directive du Conseil 2004/8/CE du 11 février 2004 concernant la promotion de la cogénération sur la base de la demande de chaleur utile dans le marché intérieur de l'énergie et modifiant la directive 92/42/CEE
- la directive du Conseil 2006/32/CE du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et abrogeant la directive 93/76/CEE du Conseil
- la directive cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception des produits consommateurs d'énergie, EuP (2005/32/CE)

Autres outils de mise en œuvre des politiques :

- Plan d'action pour une politique industrielle durable
- Boîte à outils pour l'efficacité énergétique pour les PME (PME-environnement) mis au point dans le cadre du règlement EMAS (Système communautaire de management environnemental et d'audit)
- Études et projets sous l'égide du programme Énergie intelligente pour l'Europe et du sous-programme SAVE (Efficacité énergétique et utilisation rationnelle de ressources), qui traitent de l'efficacité énergétique dans les bâtiments et dans l'industrie.

Le présent document assure également la liaison avec les BREF concernant des secteurs industriels spécifiques (BREF verticaux), en particulier le BREF relatif aux Grandes installations de combustion (LCP), où l'efficacité énergétique est un sujet de première importance). Il possède aussi une frontière commune avec les BREF traitant des Systèmes de refroidissement industriel (CV) et des Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique (CWW) (BREF « horizontaux », applicables à plusieurs secteurs).

L'efficacité énergétique dans ce document

Les déclarations de principe placent la politique énergétique (y compris une baisse de la consommation) et la protection du climat (plus particulièrement, la réduction de l'impact des gaz de combustion) parmi les premières priorités de l'Union européenne.

La directive IPPC a été modifiée pour prendre en compte la directive[1] ETS, établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté (et pour introduire des modifications prenant en compte la convention d'Aarhus). Toutefois, l'utilisation efficace de l'énergie reste l'un de ses fils conducteurs. En résumé, pour les activités énumérées à l'Annexe I de la directive 2003/87/CE, les États-membres ont la faculté de ne pas imposer d'exigences en matière d'efficacité énergétique applicables aux unités de combustion et autres unités émettant directement du dioxyde de carbone sur le site. Cette souplesse ne s'applique pas aux unités ne rejetant pas directement du dioxyde de carbone sur le même site.

Le présent document comporte des orientations quant à l'efficacité énergétique pour toutes les installations IPPC (et les unités qui les composent).

Ces lignes directrices peuvent aussi s'avérer utiles pour des exploitants et des industries hors du champ d'application de la directive IPPC.

La directive IPPC porte sur les activités définies dans son Annexe 1, ainsi que sur toute activité liée techniquement et s'y rapportant directement. Elle ne porte pas sur les produits. Dans ce contexte, l'efficacité énergétique exclut donc toute considération d'efficacité énergétique des produits, y compris lorsqu'une consommation accrue d'énergie dans l'installation peut contribuer à obtenir un produit plus performant au plan de l'efficacité énergétique. (Par exemple, lorsqu'un surplus d'énergie est utilisé pour fabriquer des aciers plus résistants, permettant de réduire la quantité d'acier utilisée pour la construction de véhicules automobiles avec pour résultats des économies de carburant). Quelques mesures fondées sur de bonnes pratiques susceptibles d'être appliquées par les exploitants mais qui sont hors du champ d'application du système d'autorisation de l'IPPC sont présentées et examinées dans les annexes (par ex. transport, voir Annexe 7.15).

L'utilisation efficace de l'énergie et le découplage entre consommation d'énergie et croissance est un objectif clé des politiques de développement durable. La directive IPPC considère l'énergie comme une ressource en tant que telle et demande qu'elle soit utilisée de manière efficace sans s'attacher à en spécifier l'origine. C'est pourquoi, le présent document étudie l'efficacité énergétique toutes sources d'énergie confondues, et leur utilisation dans l'installation en vue d'élaborer des produits ou fournir des services. Il ne considère pas le remplacement des combustibles primaires par des combustibles secondaires ou par des sources d'énergies renouvelables, comme une amélioration de l'efficacité énergétique. Le remplacement des combustibles fossiles par d'autres options est certes une démarche importante, offrant des avantages tels qu'une nette diminution des émissions de CO_2 et de certains autres gaz à effet de serre, une amélioration en termes de développement durable ou de sécurité des approvisionnements, mais ces aspects sont traités par ailleurs. Certains BREF portant sur des secteurs particuliers étudient l'utilisation des combustibles secondaires et des déchets en tant que sources d'énergie.

Certains documents de référence utilisent les termes « management de l'efficacité énergétique », « gestion de l'efficacité énergétique » et d'autres les termes « management de l'énergie » ou « gestion de l'énergie ». Dans le présent document, sauf indication contraire, ces deux expressions doivent être entendues comme signifiant « l'utilisation efficace de l'énergie physique ». Ces deux expressions peuvent également avoir le sens de « la gestion des coûts énergétiques » : normalement, la réduction de la consommation d'énergie se traduit par une réduction des coûts. Toutefois, il existe des techniques de gestion de la consommation d'énergie (notamment celles consistant à effacer les pics de demande) pour rester dans les tranches inférieures des grilles tarifaires des fournisseurs, et pour réduire les coûts sans pour autant réduire la consommation totale d'énergie. Ces techniques ne font pas partie de l'efficacité énergétique telle que définie dans la directive IPPC.

[1] Directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil. Voir Annexe 0

Le présent document a été élaboré après la première version de tous les autres BREF. Il est donc prévu qu'il serve de référence pour l'efficacité énergétique à l'occasion de la révision des BREF (voir la section Mandat de la Préface).

Aspects de l'efficacité énergétique traités dans le présent document

Chapitre	Sujets traités
0	Introduction et définitions
1.1	Introduction à l'efficacité énergétique dans l'UE et dans le présent document.
	Aspects économiques et effets croisés (traité de manière plus détaillée dans le REF ECM (Aspects économiques et effets croisés))
1.2	Terminologie de l'efficacité énergétique, par ex définition des termes énergie, travail, puissance et introduction aux lois de thermodynamique
1.3	Les indicateurs de l'efficacité énergétique et leur utilisation
	Importance de la définition des unités, des systèmes et des limites
	Autres termes apparentés, par ex. énergies primaires et secondaires, pouvoirs calorifiques, etc.
1.4	Utilisation des indicateurs de l'efficacité énergétique dans l'industrie selon une approche par le haut, ou par le site dans son ensemble et problèmes rencontrés
1.5	Approche par le bas de l'efficacité énergétique et problèmes rencontrés
	Importance d'une approche systémique pour améliorer l'efficacité énergétique
	Points importants concernant la définition de l'efficacité énergétique
2	Techniques à prendre en compte à des fins d'efficacité énergétique au niveau d'une installation
	Importance d'une vision stratégique de la globalité du site, de la définition d'objectifs et de la planification des actions à entreprendre avant d'investir (d'autres) ressources dans les activités d'économie d'énergie
2.1	Management de l'efficacité énergétique grâce à des systèmes de management spécifiques ou existants
2.2	Planification et établissement d'objectifs et de cibles par : • une amélioration continue des conditions environnementales • une prise en compte de la globalité de l'installation et des systèmes qui la composent
2.3	Prise en compte de l'efficacité énergétique au stade de la conception pour les installations nouvelles ou modernisées, incluant : • une sélection des technologies des procédés de fabrication les plus efficaces
2.4	Amélioration de l'intégration entre les procédés, les systèmes et les installations pour accroître l'utilisation efficace de l'énergie et des matières premières
2.5	Maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique sur de longues périodes
2.6	Maintien d'une expertise suffisante à tous les niveaux pour garantir l'efficacité énergétique des systèmes, non pas seulement en matière de gestion d'énergie, mais également au plan de la connaissance des procédés et des systèmes
2.7	Communication des initiatives et des résultats en matière d'efficacité énergétique, incluant : • l'utilisation des diagrammes de Sankey
2.8	Procédés de contrôle efficaces : s'assurer que les procédés sont exploités d'une manière aussi efficace que possible, pour accroître l'efficacité énergétique, minimiser les produits hors spécification, etc. en utilisant à la fois : • des systèmes de contrôle des procédés • des systèmes de management de la qualité (statistiques)
2.9	Importance de la planification des interventions de maintenance et d'une prise en compte rapide des réparations imprévues, qui gaspillent de l'énergie, comme par exemple des fuites de vapeur ou d'air comprimé.
2.10	La surveillance et la mesure sont des points essentiels, incluant : • des techniques qualitatives • des mesures quantitatives, au moyen de systèmes de mesures directs et avancés • l'application d'une nouvelle génération de dispositifs de mesure des débits • l'utilisation de modèles, bases de données et bilans énergétiques • l'optimisation des utilités au moyen de contrôles logiciels et de mesures avancées
2.11	L'audit énergétique est une technique essentielle pour identifier les domaines d'utilisation de l'énergie, des possibilités d'économies d'énergie, et vérifier les résultats des actions entreprises
2.12	La technologie du pincement est un outil utile lorsqu'il existe sur un site des flux de chauffage et de refroidissement, pour définir les possibilités d'intégration d'un échange d'énergie
2.13	Les analyses de l'exergie et de l'enthalpie sont des outils utiles pour évaluer les possibilités d'économies d'énergie et utilisation éventuelle du surplus d'énergie à d'autres procédés et/ou systèmes
2.14	La thermoéconomie associe des analyses thermodynamiques et économiques pour comprendre où il est possible de réaliser des économies d'énergie et de matières premières
2.15	Les modèles énergétiques comprennent :

	• l'utilisation de modèles, bases de données et bilans • l'utilisation d'une modélisation sophistiquée pour optimiser le management des utilités y compris l'optimisation énergétique
2.16	L'analyse comparative est un outil essentiel pour l'évaluation de la performance d'une installation, d'un procédé ou d'un système, moyennant une vérification par rapport à des niveaux d'utilisation de l'énergie en interne ou en externe ou des méthodes efficaces au plan énergétique
3	Techniques à prendre en compte en vue de l'efficacité énergétique au niveau d'un système et des parties qui le composent. Sont examinées les techniques à prendre en compte lors de l'optimisation des systèmes et les techniques concernant les équipements n'ayant pas été optimisés dans le cadre d'une révision du système
3.1	Les principales techniques de combustion sont traitées dans le BREF LCP (Grandes installations de combustion). Ce document met en évidence les techniques clés et présente des techniques supplémentaires ainsi que d'autres détails
3.2	Systèmes à vapeur
3.3	Récupération de la chaleur en utilisant des échangeurs de chaleur et des pompes à chaleur *Remarque : Les systèmes de refroidissement sont traités dans le BREF CV (Systèmes de refroidissement industriel)*
3.4	Présentation des principaux types de cogénération, de la trigénération et de son utilisation dans le chauffage urbain et le froid
3.5	La façon dont l'énergie électrique est utilisée dans une installation peut entraîner des inefficacités énergétiques dans les systèmes d'approvisionnement interne et externe
3.6	Présentation générale des sous-systèmes entraînés par moteur électrique, bien que les systèmes spécifiques soient examinés de manière plus détaillée (voir Sections 3.7 et 3.8)
3.7	Utilisation et optimisation des systèmes à air comprimé (CAS)
3.8	Systèmes de pompage et optimisation des systèmes de pompage
3.9	Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)
3.10	Éclairage et optimisation de l'éclairage
3.11	Procédés de séchage et de séparation et leur optimisation
4	Conclusions sur les MTD applicables aux techniques d'efficacité énergétique
Annexes	Données supplémentaires et exemples plus détaillés

Frontière commune entre le présent document et d'autres BREF

Le présent document présente :

- des orientations horizontales et des conclusions quant aux techniques d'efficacité énergétique qui sont considérées comme étant les MTD au sens générique applicable à l'efficacité énergétique pour toutes les activités énumérées à l'annexe 1 de la directive IPPC
- des références à d'autres BREF dans lesquels des techniques particulières d'efficacité énergétique ont déjà fait l'objet de discussions détaillées et peuvent être appliquées à d'autres secteurs. Par exemple :
  - le BREF LCP (Grandes installations de combustion) porte sur l'efficacité énergétique liée à la combustion et précise que les techniques considérées peuvent être appliquées aux installations de combustion d'une capacité inférieure à 50 MW.
  - le BREF CV (Systèmes de refroidissement industriel)
- des informations supplémentaires sur des techniques décrites dans d'autres BREF, lorsque cela est jugé utile (par ex. le BREF OFC (Chimie fine organique) et le BREF SIC (Chimie inorganique de spécialités) traite déjà de la méthodologie « pinch » (pincement)).

Le présent BREF :

- ne contient pas d'informations propres aux secteurs couverts par d'autres BREF, Par exemple :
  - l'efficacité énergétique des procédés de fabrication des produits chimiques inorganiques en grands volumes est traitée dans le BREF LVIC-S (Chimie inorganique - produits solides et autres) et dans le BREF LVIC-AAF (Chimie inorganique - ammoniac, acides et engrais)
  - l'efficacité énergétique des solutions de galvanoplastie est traitée dans le BREF STM (Traitement de surface des métaux et des matières plastiques)
- n'établit pas de MTD spécifiques à un secteur.

Toutefois, un résumé des MTD sectorielles, établi à partir d'autres BREF est inclus à l'annexe 13 à titre d'information.

Le présent document donne des orientations générales, et peut donc aussi apporter des informations utiles à des industries qui ne sont pas mentionnées dans la Directive IPPC.

Comment utiliser le présent document conjointement aux BREF de secteurs verticaux

Il convient de respecter les étapes ci-après pour tirer le meilleur parti possible des informations sur les (meilleures) techniques (disponibles) concernant des sujets couverts à la fois dans les BREF verticaux et horizontaux (voir Figure 1). Les exemples choisis sont en rapport avec l'efficacité énergétique (ENE) :

Étape 1 : consulter les informations contenues dans le **BREF sectoriel vertical concerné**

Identifier les techniques appropriées et les MTD dans le BREF du secteur vertical, par exemple pour l'efficacité énergétique. S'il contient suffisamment de données, utiliser les meilleures techniques disponibles et les données justificatives dans la préparation de l'autorisation.

Étape 2 : identifier, consulter et ajouter des informations émanant d'autres BREF verticaux pour des activités associées ayant lieu sur le site

Certains autres BREF verticaux sont susceptibles de contenir des techniques à prendre en compte et des MTD concernant des activités au sein d'une installation qui ne sont pas couvertes par le BREF vertical du secteur.

En particulier, pour l'efficacité énergétique, le BREF LCP (Grandes installations de combustion) donne des informations et des MTD sur la combustion et sur le développement et l'utilisation de la vapeur.

D'autres BREF verticaux peuvent aussi comprendre des informations pointues spécifiques portant sur des techniques pouvant être utilisées en dehors du secteur auquel elles s'appliquent pour faciliter la mise en œuvre des MTD.

Étape 3 : identifier, consulter et ajouter des informations contenues dans les **BREF horizontaux concernés**.

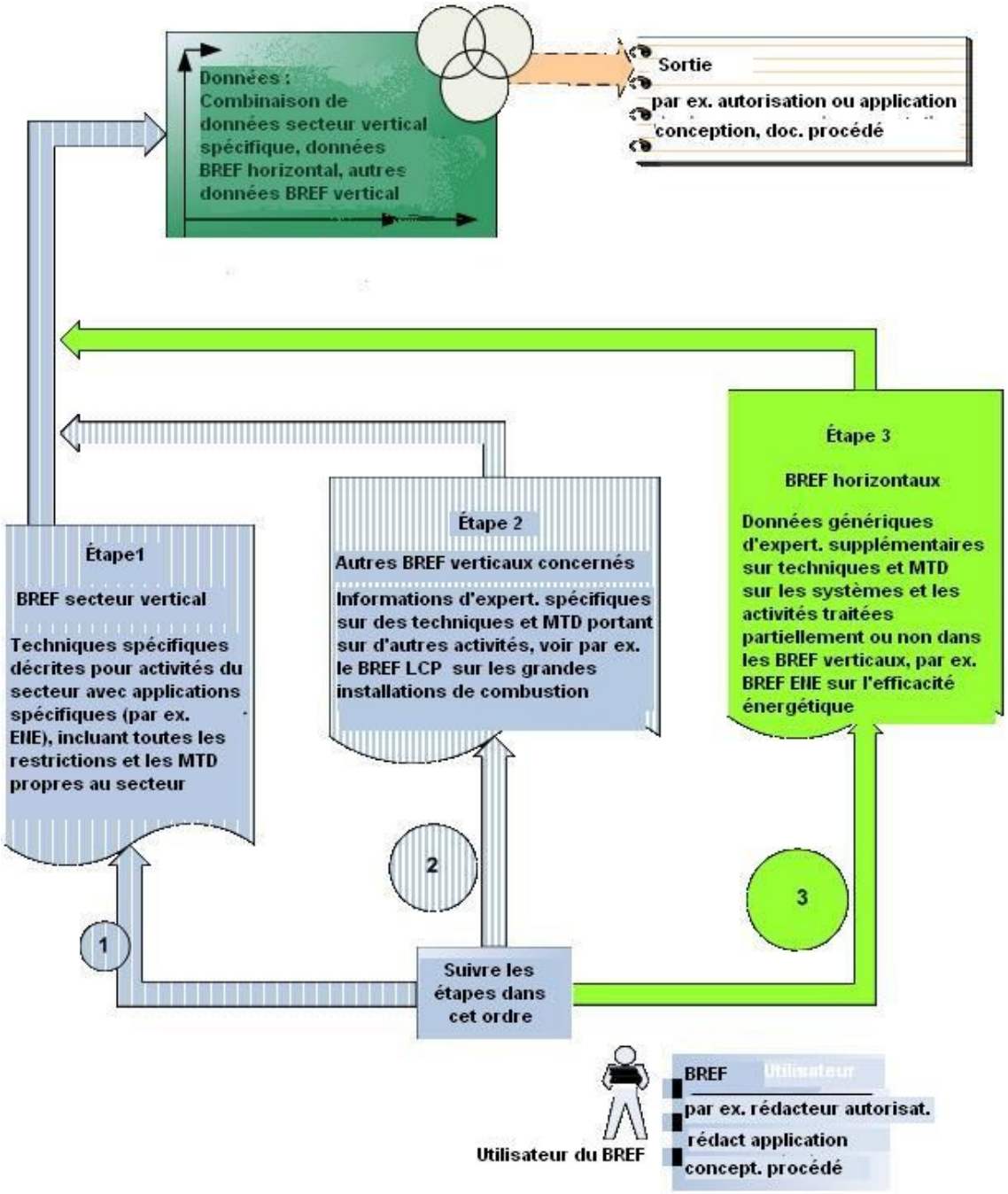
Pour s'assurer que les données génériques d'expert sont utilisées pour faciliter la mise en œuvre des MTD dans le secteur vertical spécifique, consulter aussi les BREF horizontaux[2]. L'installation peut avoir des systèmes ou des activités qui ne sont pas abordés dans le BREF vertical.

Par exemple, le BREF sur l'efficacité énergétique contient les meilleures techniques disponibles et les techniques à prendre en compte pour :

- la gestion de l'énergie, notamment systèmes de management, audit, formation, surveillance, contrôle et maintenance
- les principaux systèmes consommant de l'énergie dans de nombreuses installations, tels que les systèmes à vapeur, la récupération de chaleur, la cogénération, la fourniture d'une

[2] Les dénommés BREF horizontaux sont : Efficacité énergétique (ENE), Systèmes de refroidissement industriel (CV), Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique (CWW), Aspects économiques et effets multi-milieux (ECM), Principes généraux de surveillance (MON), et Émissions dues au stockage des matières dangereuses ou en vrac (ESB)

alimentation électrique, les sous-systèmes entraînés par moteur, les systèmes à air comprimé (CAS), les systèmes de pompes, les systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation), l'éclairage, et les systèmes de séchage et de séparation.



Application : demande d'autorisation

Figure 1 : Utilisation des BREF sectoriels verticaux avec des BREF horizontaux

1 INTRODUCTION ET DÉFINITION

[3, FEAD and Industry, 2005] [97, Kreith, 1997]
http ://columbia.thefreedictionary.com/energy][TWG [127, TWG, 145, CE, 2000]

1.1 Introduction

1.1.1 L'énergie dans le secteur industriel de l'UE

« Nous avons la ferme intention de progresser ensemble dans le domaine de la politique énergétique et de la protection du climat et de contribuer à la lutte contre la menace que fait peser le changement climatique sur la planète. » Déclaration de Berlin (25 Mars 2007)

En 2004, la consommation énergétique industrielle dans l'UE-25 était de 319 Mtep (millions de tonnes d'équivalent pétrole, 11 004 PJ) ou d'environ 28 % de la consommation énergétique finale annuelle de l'UE, et de 30 % de la demande[3] en énergie primaire.

Les centrales thermiques (électricité) publiques consomment 27 % des combustibles primaires. Les deux principaux consommateurs énergétiques suivants sont l'industrie sidérurgique et l'industrie chimique qui consomment respectivement 19 % et 18 % de la consommation énergétique industrielle totale. Ils sont suivis de l'industrie du verre, de l'industrie des matériaux céramiques et de l'industrie de la construction qui représentent 13 %, et de l'industrie du papier et de l'imprimerie qui représente 11 %. L'industrie produit environ 25 % de sa consommation électrique. Les chiffres récents ne montrent pas de variation significative d'une année sur l'autre (c'est-à-dire entre 2000 et 2004). La Figure 1.1 présente d'autres chiffres sur les industries IPPC.

Selon le Registre européen des émissions de polluant (EPER), les principaux émetteurs IPPC sont responsables d'environ 40 % de la totalité des émissions européennes de CO_2, d'environ 70 % de la totalité des émissions de SO_x et d'environ 25 % de la totalité des émissions de NO_x [145, CE, 2000, 152, CE, 2003] [251, Eurostat].

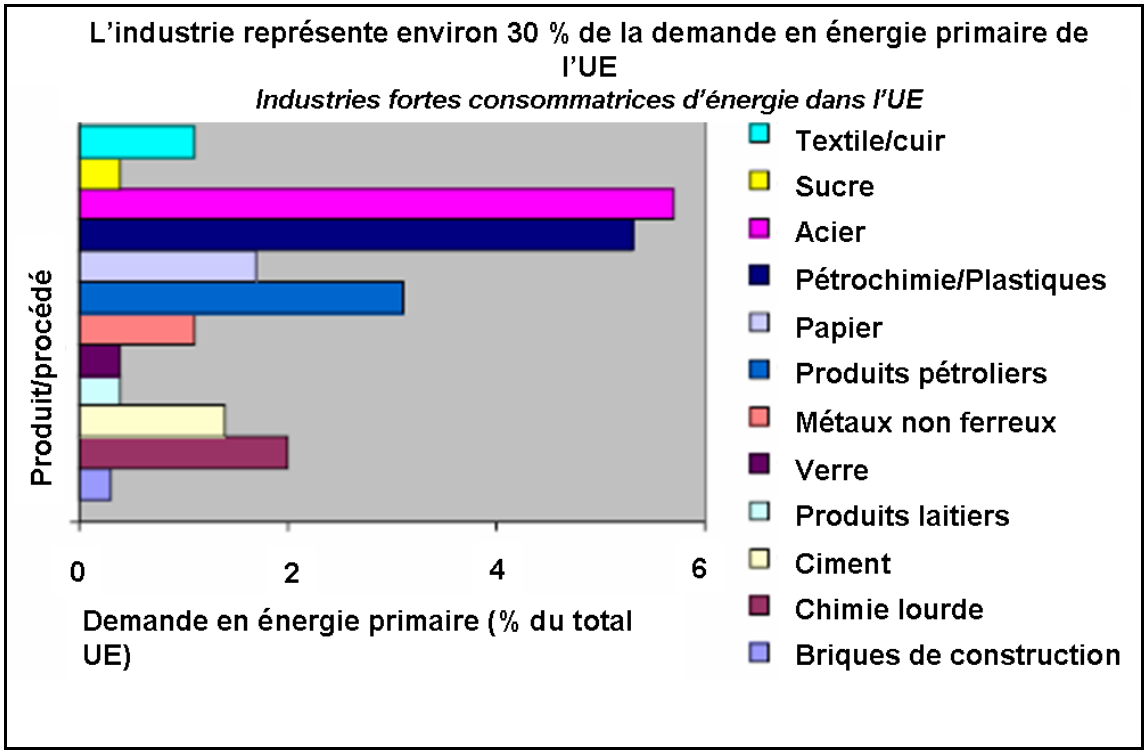


Figure 1.1 : Pourcentage de la demande en énergie primaire de l'UE - Industries de transformation [145, CE, 2000]

[3] Voir Section 1.3.6.1 pour une présentation des énergies primaires, secondaires et finales

1.1.2 Les impacts de l'utilisation de l'énergie

Réchauffement climatique
Certains gaz contribuent au réchauffement de l'atmosphère par absorption du rayonnement émanant de la surface de la terre, et renvoi de ce rayonnement dans l'espace sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde. La partie de ce rayonnement qui est réémise vers l'atmosphère et vers la surface de la terre est dénommée « l'effet de serre », en raison de son effet de réchauffement. Les principaux gaz à effet de serre (GES) sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'ozone (O_3), et, entres autres, le protoxyde d'azote (N_2O). Ce processus de réchauffement est naturel et indispensable à la conservation de l'écosystème terrestre.

Toutefois, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone, le principal gaz à effet de serre (anthropique), a augmenté de 34 % comparé aux valeurs de l'époque préindustrielle en raison des activités humaines, avec une accélération de cette augmentation depuis 1950. Les concentrations d'autres gaz à effet de serre ont également augmenté par suite des activités humaines. Les principales sources de cette augmentation sont le CO_2 et les oxydes d'azote provenant de la combustion de combustibles fossiles dans l'industrie (incluant la production d'électricité), les activités des ménages et le transport. (Il existe d'autres sources, notamment le changement d'utilisation des terres et l'agriculture qui libèrent du CO_2 et du CH_4, ainsi que certains procédés et utilisations spécifiques produisant l'émission d'autres gaz à effet de serre anthropiques).

Les concentrations actuelles de CO_2 et de CH_4 sont les plus importantes jamais observées au cours des 420 000 dernières années tandis que la concentration de N_2O n'a jamais été dépassée depuis au moins 1 000 ans. Les projections de base du GIEC (2001) montrent que les concentrations de gaz à effet de serre sont susceptibles de dépasser le niveau de 550 ppm d'équivalent de CO_2 dans les prochaines décennies (avant 2050), voir Figure 1.2. [252, EEA, 2005] Selon un scénario de base de 2006, les émissions de CO_2 seront équivalentes à approximativement deux fois et demi le niveau actuel d'ici à 2050 [259, IEA, 2006].

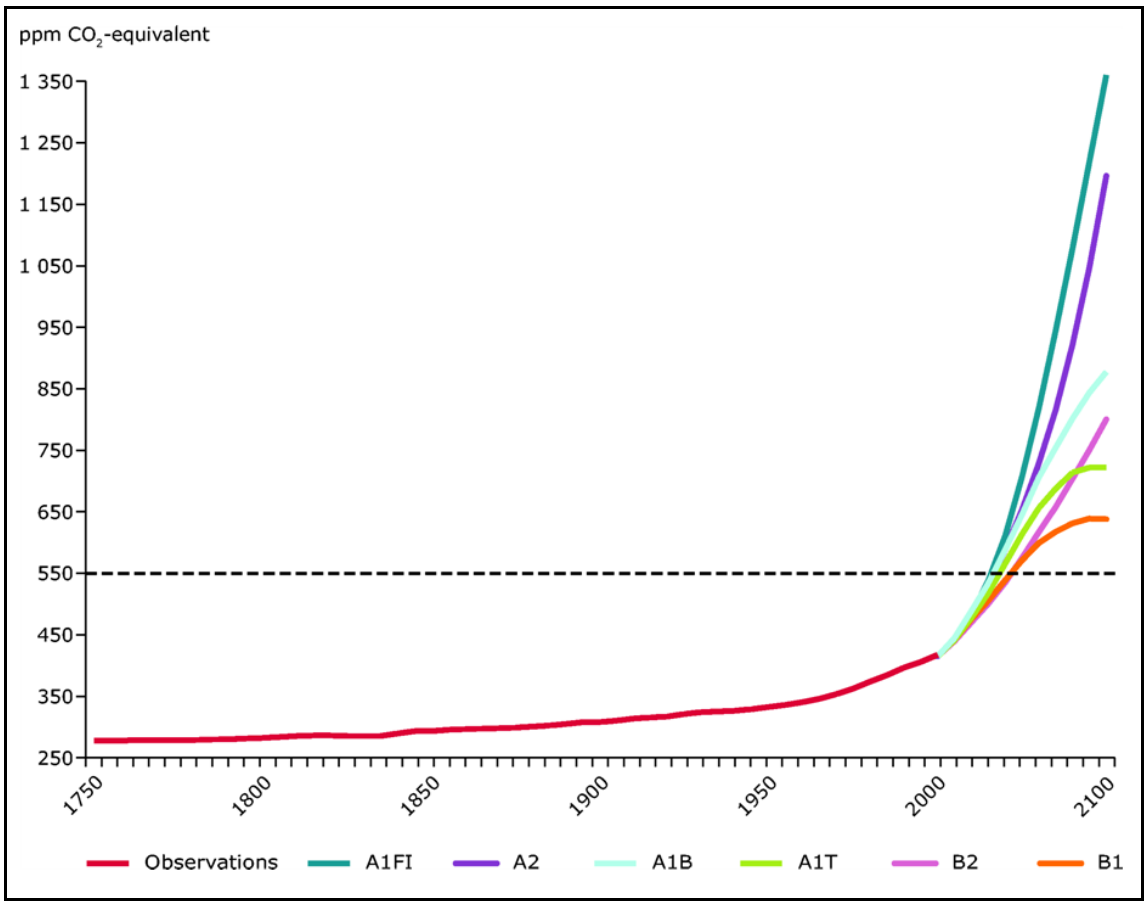


Figure 1.2 : Augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis 1750 exprimée en ppm d'équivalent CO_2 selon divers scénarios [252, EEA, 2005]

Les effets de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) et du réchauffement climatique qui s'ensuit sont maintenant largement reconnus (divers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)) [262, UK_Treasury]. Pour l'UE, alors que des informations détaillées sont toujours en nombre limité, les projections de changement de climat laissent prévoir des impacts très étendus et des effets économiques. Les effets économiques nets globaux sont encore nettement incertains ; toutefois, il existe un modèle de répartition bien marqué avec des effets plus nocifs dans l'Europe méditerranéenne et du sud-est [252, EEA, 2005].

Dépendance des combustibles fossiles et sécurité d'approvisionnement

En 2001, la structure énergétique de l'UE est restée fortement dépendante des combustibles fossiles (79 % de la consommation brute interne), et comprenait une proportion significative de pétrole et de gaz importés. L'UE importe plus de 50 % de ses ressources énergétiques et il est prévu que ces importations augmentent jusqu'à plus de 70 % au cours des 20 à 30 prochaines années [145, CE, 2000].

1.1.3 Contribution de l'efficacité énergétique à une réduction des conséquences du réchauffement climatique et à une amélioration du développement durable

Selon les nombreuses études réalisées en 2000 [145, CE, 2000], l'UE pourrait économiser au moins 20 % de sa consommation d'énergie actuelle avec un bon rapport coût-efficacité, équivalent à 60 000 millions d'euros par année, ou la consommation d'énergie cumulée de l'Allemagne et de la Finlande en 2000 [140, CE, 2005]. Ce document fait également ressortir

que les économies d'énergie sont, sans doute, le moyen le plus rapide, le plus efficace avec le meilleur rapport coût-efficacité, de réduire des émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer ainsi la qualité de l'air. L'efficacité énergétique est également un facteur de première importance pour la gestion des ressources naturelles (dans le cas présent, des sources d'énergie) et le développement durable, et joue un rôle important dans la réduction de la dépendance européenne par rapport à ces ressources. Une telle initiative, bien que nécessitant des investissements considérables, devrait apporter une contribution majeure aux objectifs de Lisbonne, en créant environ un million de nouveaux emplois et en augmentant la compétitivité [145, CE, 2000, 152, CE, 2003]. En conséquence, l'UE a annoncé un Plan d'action sur l'efficacité énergétique pour économiser jusqu'à 20 % de la consommation d'énergie de l'Union (environ 39 Mtep), et 27 % de l'énergie des industries de transformation d'ici 2020. Cela devrait réduire les coûts directs dans l'UE de 100 000 millions d'euros annuellement d'ici 2020 et économiser environ 780 millions de tonnes de CO_2 par an [142, CE, 2007].

De nombreux secteurs ont considérablement amélioré leur efficacité énergétique au cours des 20 dernières années. A cet égard, les effets moteurs dominants sont la productivité, la qualité des produits et les nouveaux marchés. La législation en matière d'efficacité énergétique de l'UE est récente (voir la Préface), bien que cette législation existe depuis plus longtemps dans certains États membres. Les évolutions entreprises par l'industrie l'ont été en grande partie à leur initiative et sont habituellement dictées par des considérations de coût, mais elles ont également été réalisées conjointement à des initiatives de l'UE et des États membres (voir la Préface et l'Annexe 7.13). Par exemple, l'industrie chimique de l'UE est l'une des plus grosses consommatrices de gaz parmi les industries de transformation de l'UE, et l'énergie représente jusqu'à 60 % des coûts de production. Toutefois, la consommation énergétique spécifique de l'industrie chimique a été réduite de 55 % entre 1975 et 2003.

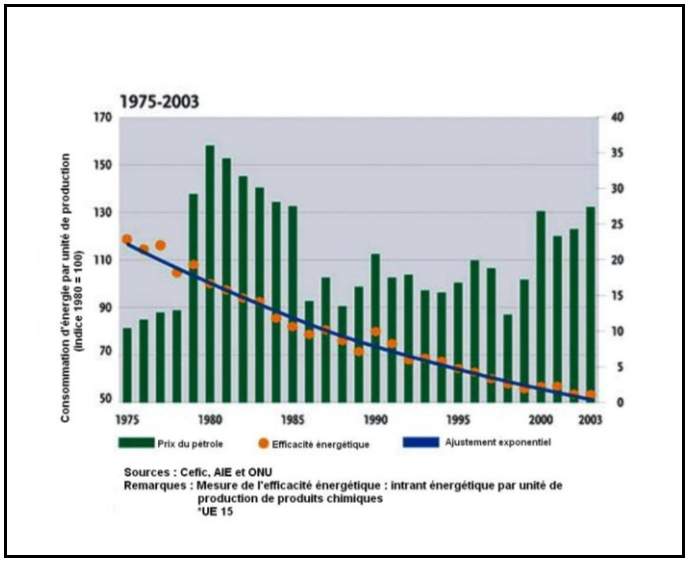


Figure 1.3 : Consommation d'énergie de l'industrie chimique de 1975 à 2003

Toutefois, la nécessité de soutenir les améliorations de l'efficacité énergétique est vitale. Des projections, fondées sur les technologies existantes, et surtout sur une amélioration de l'efficacité énergétique (un autre facteur étant l'abandon des combustibles fossiles pour la production d'électricité et les transports), montrent que les émissions de CO_2 liées à l'énergie peuvent être ramenées à leurs niveaux de 2006 à l'horizon 2050 et que l'accroissement de la demande en pétrole peut être réduit. Les gains d'efficacité énergétique sont un enjeu prioritaire pour un avenir énergétique plus durable et sont souvent la manière la plus économique, la plus rapide et la plus écologique de réduire des émissions et d'infléchir des demandes croissantes en énergie. Dans des scénarios projetés en 2006, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les secteurs des bâtiments, de l'industrie et du transport, conduit à une diminution de l'énergie utilisée allant de 17 à 33 % par rapport au scénario de référence projeté pour l'horizon 2050.

L'efficacité énergétique représente entre 45 et 53 % de la réduction totale des émissions de CO_2 par rapport au scénario de référence pour l'horizon 2050, en fonction du scénario considéré. Dans un scénario dans lequel les gains d'efficacité globale par rapport au scénario de référence ne sont que de 20 % d'ici 2050, les émissions totales de CO_2 augmentent de plus de 20 % par rapport aux autres scénarios [259, IEA, 2006].

1.1.4 Efficacité énergétique et directive IPPC

Le contexte juridique de l'efficacité énergétique et du présent document est entièrement délimité dans la Préface et dans le Champ d'application. Les autorités responsables de l'octroi d'autorisations et les exploitants doivent savoir ce que signifie une utilisation efficace de l'énergie, la manière dont elle peut être obtenue, mesurée ou évaluée et par conséquent, la manière dont il faut en tenir compte pour l'octroi d'une autorisation.

Les activités industrielles couvertes par la directive IPPC sont énumérées à l'Annexe 1 de cette dernière. Les procédés/unités/sites de production soumis à la directive IPPC sont par exemple :

- une centrale électrique à gaz, dans laquelle on introduit du gaz comme matière première (entrée) et qui produit en sortie de l'électricité. L'énergie utilisée est l'énergie disponible contenue dans le gaz. Une énergie thermique de faible valeur est également générée (en même temps que l'électricité), et elle est habituellement perdue en refroidissement. Si elle peut être utilisée (par ex. dans un réseau de chauffage urbain), alors l'efficacité énergétique est améliorée ;
- une raffinerie, alimentée en pétrole brut qu'elle transforme en essence, carburant diesel, fioul et en un certain nombre d'autres produits. Une partie des hydrocarbures traités dans la raffinerie est brûlée en interne afin de fournir l'énergie nécessaire au procédé de conversion. Habituellement, il est également nécessaire d'importer une partie de l'électricité, sauf si une centrale de cogénération est installée à l'intérieur de la raffinerie, auquel cas la raffinerie peut devenir un exportateur net d'électricité ;
- un vapocraqueur est alimenté en matières liquide et gazeuse provenant d'une raffinerie et les convertit en éthylène et en propylène, plus un certain nombre de sous-produits. Une partie de l'énergie consommée est générée en interne dans le procédé, complétée par des importations de vapeur, d'électricité et de combustible ;
- la matière première d'un laminoir dans une aciérie comprend des brames d'acier plates d'approximativement 2 décimètres d'épaisseur qui sont ensuite enroulées en bobine ayant une épaisseur de quelques millimètres. Le laminoir comprend des fours, des équipements de laminage, des équipements de refroidissement et des systèmes auxiliaires ;
- un incinérateur de déchets (en Europe du Nord) est alimenté avec 150 000 tonnes de déchets après recyclage de matériaux et récupération de la fraction biologique provenant d'une population de 500 000 personnes. L'incinérateur peut générer 60 000 MWh d'électricité par an, dont 15 000 MWh/an sont utilisés en interne et 45 000 MWh/an sont exportés vers le réseau électrique, alimentant la consommation électrique domestique de 60 000 habitants. S'il existe aussi une demande de chaleur, l'incinérateur peut fonctionner en mode de cogénération (c'est-à-dire comme une centrale de production combinée de chaleur et d'électricité, CHP) : la vapeur haute pression permet de générer de l'électricité et la vapeur basse ou moyenne pression restante est utilisée pour le chauffage ou le refroidissement urbain, ou par l'industrie. Il est plus efficace de générer de la chaleur, et lorsque cette chaleur est utilisée en dehors de l'installation, l'électricité générée est moindre. S'il existe une demande de chaleur suffisante, la centrale peut être construite de manière à fournir uniquement de la chaleur. La fourniture et les parts respectives entre électricité générée et chaleur produite dépendent de l'existence éventuelle d'une utilisation de la chaleur ainsi que d'autres conditions contractuelles,
- une installation d'élevage intensif de volailles (poulets) disposant de 40 000 emplacements élève des poussins jusqu'à la taille requise par l'abattoir (5 à 8 semaines). Les unités utilisent de l'énergie pour les systèmes d'alimentation et d'apport d'eau, d'éclairage, de nettoyage du lisier et des litières ainsi que pour la ventilation/le chauffage/le

refroidissement. Le lisier est habituellement épandu sur le sol mais peut être utilisé comme matière première dans une centrale de génération de biogaz sur site ou hors du site. Le biogaz peut être utilisé pour chauffer les locaux d'élevage des volailles,

- une installation d'héliogravure de publication comprenant 5 presses à imprimer avec 40 unités d'encrage produit des catalogues et des magazines de haute qualité. Elle utilise de l'énergie électrique pour les moteurs d'entraînement des presses, les systèmes hydrauliques et à air comprimé mis en œuvre dans les procédés d'impression, du gaz naturel pour le séchage et de la vapeur pour régénérer son système de récupération du toluène (grâce à un système de traitement des déchets par absorption du solvant).

Toutes les installations IPPC ont des activités associées et des systèmes auxiliaires utilisant de l'énergie, notamment des systèmes pour les appareils hydrauliques, la lubrification, l'air comprimé, la ventilation, le chauffage, le refroidissement et les pompes, les ventilateurs, les moteurs qui la composent, etc. Elles comprennent aussi des ateliers de maintenance, des locaux pour le personnel, des bureaux, des vestiaires et des zones de stockage, etc. qui devront être chauffés ou climatisés, approvisionnés en eau chaude, en éclairage, etc.

1.1.5 Efficacité énergétique dans la prévention et le contrôle intégrés de la pollution

Les techniques d'efficacité énergétique sont disponibles à partir d'un large éventail de sources, et dans de nombreuses langues. Ce document étudie les concepts-clés et les techniques dans la perspective d'une prévention et d'un contrôle régulation intégrés de la pollution pour l'ensemble de l'installation. L'échange d'informations a montré que, alors que des techniques individuelles peuvent être appliquées et sont susceptibles d'entraîner des économies d'énergie, c'est en ayant une vision stratégique globale du site et des systèmes qui le composent que des améliorations majeures de l'efficacité énergétique peuvent être réalisées. Par exemple, le remplacement des moteurs électriques d'un système à air comprimé peut permettre d'économiser environ 2 % de l'énergie en entrée, tandis qu'une révision complète de l'ensemble du système pourrait permettre de réaliser jusqu'à 37 % d'économie (voir section 3.7). En réalité, le fait de se concentrer sur des techniques au seul niveau d'une pièce (d'un composant) qui la constitue, peut être trop prescriptif. Dans certains cas, cela peut empêcher ou retarder des décisions nettement plus favorables à l'environnement, en consacrant des ressources financières et autres à des investissements qui n'ont pas été optimisés pour l'efficacité énergétique.

De la même manière, dans certains cas, l'application de techniques d'efficacité énergétique au niveau d'un système ou d'un composant peut également maintenir ou accroître des effets croisés (effets défavorables pour l'environnement). On peut citer à titre d'exemple une installation de traitement de surface (application de revêtement) utilisant des solvants organiques. Il est possible de remplacer les composants individuels (par ex. les moteurs) par des moteurs ayant un meilleur rendement énergétique, voire même d'optimiser le système d'extraction des solvants et de traitement des effluents gazeux (WGT) afin de minimiser la consommation d'énergie, mais une avancée majeure pour l'environnement serait de modifier une partie ou la totalité du procédé au profit d'un procédé sans solvant ou à faible teneur en solvant (lorsque ceci est applicable techniquement). Dans ce cas, le procédé mis en place risque d'utiliser davantage d'énergie pour le séchage ou le durcissement que le procédé d'application de revêtement d'origine, mais il pourrait en résulter des économies d'énergie majeures car il est alors possible de s'affranchir du système d'extraction des solvants et de traitement des effluents gazeux (WGT). En outre, la quantité totale des émissions de solvant émanant du site pourrait être réduite (voir section 2.2.1 et le BREF STS (Traitement de surface utilisant des solvants organiques).

Détails de la configuration du document
Les détails sur la composition du présent document sont énoncés dans le Champ d'application.

Les explications et les définitions terminologiques du présent chapitre et des autres chapitres sont une introduction aux sujets abordés et concernent l'IPPC ainsi que d'autres industries généralement à un niveau d'expertise hors énergie. Des informations et des explications scientifiques plus approfondies (ainsi que les formules et les développements mathématiques) se trouvent à l'Annexe 7.1 et dans les manuels ou les documents de référence standard sur la thermodynamique.

1.1.6 Aspects économiques et effets croisés

L'énergie devrait être considérée comme toute autre matière première précieuse nécessaire à la bonne marche d'une entreprise et non pas simplement comme une dépense générale et de maintenance de l'entreprise. L'énergie a des coûts et des impacts sur l'environnement ; sa gestion doit être saine pour accroître la rentabilité et la compétitivité d'une entreprise, mais aussi pour atténuer la gravité de ces impacts.

La politique de l'UE accorde une grande importance à l'efficacité énergétique (dans des déclarations telles que la Déclaration de Berlin, où elle est la seule question environnementale soulevée [141, EU, 2007]). Lorsqu'on considère les aspects économiques et les effets croisés d'une mise en œuvre des MTD dans une installation, l'importance de l'efficacité énergétique doit être prise en compte eu égard aux exigences de l'Art 10 (4), c'est-à-dire des valeurs limites d'émission (ELV) et des paramètres équivalents.

Selon la Commission, il est vraisemblable que les mesures intégrées aux processus auront généralement un impact positif ou plus ou moins neutre sur la rentabilité des entreprises[4]. Il est inévitable que certaines MTD n'aient absolument aucune retombée, mais leurs bénéfices sociaux l'emportent sur les coûts engagés par l'exploitant, en accord avec le principe du pollueur-payeur.

La détermination des MTD implique une évaluation des coûts nets estimés de la mise en œuvre d'une technique par rapport aux avantages environnementaux obtenus du fait de sa mise en œuvre. Un deuxième test économique porte sur la question de savoir si la technique peut être introduite dans le secteur approprié dans des conditions économiquement viables. Ce test d'accessibilité ne peut légitimement être appliqué qu'à l'échelle d'un secteur européen, et non d'installations[5] [152, CE, 2003].

L'efficacité énergétique a pour avantage que les mesures visant à réduire l'impact sur l'environnement ont habituellement des retombées financières. Si des chiffres ont été communiqués dans les échanges d'informations, les coûts de chaque technique sont indiqués dans les chapitres ci-après (ou sont indiqués dans le BREF du secteur vertical concerné). La question soulevée est souvent celle des coûts-bénéfices, et la rentabilité économique de chaque technique peut apporter des informations permettant d'évaluer les coûts-bénéfices. Dans le cas d'installations existantes, la viabilité économique et technique de leur mise à niveau doit être prise en compte. Même le simple objectif de garantir un niveau élevé de protection pour l'environnement dans son ensemble implique souvent de faire un compromis entre les différents types d'impacts environnementaux, et ces compromis sont souvent influencés par des considérations locales (comme indiqué dans la Préface). Par exemple, dans certains cas, la consommation d'énergie peut être accrue pour réduire d'autres impacts environnementaux par suite de la mise en œuvre de la directive IPPC (par ex. utilisation d'un traitement des effluents gazeux pour réduire les émissions dans l'air).

[4] COM (2003) 354 final states : Les mesures en bout de chaîne, en revanche, ont souvent un impact à court terme négatif sur la rentabilité. Il n'existe toutefois aucune mesure en bout de chaîne pour l'efficacité énergétique ; l'analogie la plus proche étant les remplacements faciles par simple substitution, comme pour les moteurs. Les retombées environnementales et/ou économiques obtenues ne seront probablement pas optimales. Voir Section 1.5.1.

[5] «Secteur» doit être compris comme un niveau assez poussé de fragmentation, par exemple le secteur de production du chlore ou de la soude caustique plutôt que l'ensemble du secteur chimique.

Les aspects économiques et les effets croisés sont présentés de manière détaillée dans le REF ECM (Aspects économiques et effets croisés), avec notamment des options permettant d'évaluer les effets croisés, et de calculer les coûts-bénéfices. Les exemples pratiques ci-après ont été identifiés dans le cadre des échanges d'informations et peuvent s'avérer utiles :

- Dans plusieurs États membres, une technique est considérée comme ayant un coût-bénéfice viable si elle a un retour sur investissement (ROI) de 5 à 7 ans ou un retour sur investissement (ROI) d'environ 15 % (des chiffres différents sont utilisés dans différents États membres ou différentes régions) [249, TWG, 2007].

- Pour l'efficacité énergétique, de nombreuses techniques peuvent être évaluées quant à leur bénéfice économique sur le coût de leur durée de vie. Par exemple, sur le coût de la durée de vie des moteurs électriques, 2,5 % représente le coût d'acquisition, 1,5 % correspond au coût de maintenance, 96 % correspond au coût de l'énergie consommée.

- Un État membre a publié un rapport plébiscité à l'échelle internationale sur l'importance économique d'une atténuation des changements climatiques. En cherchant à évaluer les coûts potentiels des dégâts provenant du réchauffement climatique, l'État membre utilise les chiffres de 70 GBP/t (100 EUR/t) de carbone pour 2000, plus 1 GBP/t/an (1,436 EUR/t/an) d'inflation annuelle (19 GBP/t (27,28 EUR/t) de CO2 plus 0,27 GBP/t (0,39 EUR/t) d'inflation annuelle) (avec un taux de conversion de 1 GBP = 1,436 EUR, 1er avril 2006). Ces chiffres peuvent être utilisés lorsqu'on compare les externalités ou les coûts sociétaux des effets croisés. [262, UK_Treasury, 2006]

http ://www.hm-treasury.gov.uk/documents/taxation_work_and_welfare/taxation_and_the_environment/tax_env_GESWP140.cfm

- Un rapport international récent montre que les niveaux de CO_2 pourraient être ramenés/maintenus aux niveaux actuels en utilisant les technologies existantes avec une amélioration de l'efficacité énergétique. Le coût affecté à cet objectif est de 25 USD (20,68 EUR) par tonne de CO_2, ce qui ajoute environ 0,02 USD (0,017 EUR) par kWh au coût de l'électricité générée par la combustion du charbon et environ 0,07 USD/litre (0,058 EUR/litre, 0,28 USD/gallon) au coût de l'essence. Le coût moyen par tonne de réduction des émissions de CO_2 pour l'ensemble du portefeuille technologique, une fois que toutes les technologies sont entièrement commercialisées, est inférieur à 25 USD (20,68 EUR). Il est inférieur au niveau de commercialisation par tonne de CO_2 dans les périodes initiales du schéma d'échange de quotas des émissions de l'UE (à un taux de change de 1 USD = 0,827 EUR, avril 2006) [259, IEA, 2006].

Calculateurs utilisés pour calculer les économies de coût

Différents calculateurs logiciels ont été mis au point. Ils aident à calculer les économies à réaliser mais présentent certains inconvénients dont il faut tenir compte dans le cadre de leur emploi.

- Ils reposent souvent sur un remplacement de pièces d'équipement individuelles, par exemple, moteurs, pompes, sources d'éclairage, sans considérer la globalité du système dans lequel fonctionne cet équipement. Cela peut se solder par un échec et ne pas permettre d'obtenir les rendements énergétiques maximum pour le système et l'installation (voir Sections 1.3.5 et 1.5.1.1).
- Certains calculateurs sont élaborés par des sources indépendantes, comme des agences gouvernementales, tandis que d'autres sont des produits du commerce et risquent de ne pas être totalement indépendants.

Des exemples d'outils de calcul sont indiqués à la Section 2.17 et dans des sites Internet tels que :

- http://www.energystar.gov/ia/business/cfo_calculator.xls
- http://www.martindalecenter.com/Calculators1A_4_Util.html

1.2 Énergie et lois de la thermodynamique

[2, Valero-Capilla, 2005, 3, FEAD and Industry, 2005, 97, Kreith, 1997, 154, Columbia_Encyclopedia, 227, TWG]

L'énergie est une entité primaire et il est difficile de la définir en termes simples, dans la mesure où sa définition la plus correcte s'énonce en termes mathématiques. Dans la langue parlée, elle peut être définie comme l'aptitude ou la capacité à effectuer un travail (elle pourrait également être décrite comme la capacité à produire un changement ou une « énergie disponible »). La thermodynamique est l'étude de l'énergie et de ses transformations et il existe des concepts fondamentaux, ou lois, de la thermodynamique. Une certaine connaissance des principes de la thermodynamique est indispensable pour comprendre l'énergie et l'efficacité énergétique. La présente section a pour objet de donner une explication relativement simple avec un minimum de référence aux mathématiques impliquées. En conséquence, elle n'est pas précise au plan scientifique, et une explication plus détaillée et plus précise est donnée à l'Annexe 7.1 [269, Valero, 2007]. Il est également possible d'obtenir davantage d'informations dans des manuels standards (voir Annexe 7.1.4.1 pour des exemples).

1.2.1 Énergie, chaleur, puissance et travail

L'énergie se mesure en termes de ce changement d'un « système » d'un état à un autre, en joules dans le système international (SI). L'énergie peut prendre de multiples formes et est dénommée en fonction de l'action (ou du travail) réalisée par une force spécifique. Il existe 6 formes principales d'énergie généralement utilisées dans l'industrie :

(i) **L'énergie chimique** est l'énergie qui lie les atomes ou les ions entre eux. Dans les activités industrielles, elle est stockée dans des combustibles à base de carbone, et libérée par une réaction chimique (dans ce cas une oxydation, généralement par une combustion, qui libère du dioxyde de carbone). L'énergie libérée est habituellement convertie en d'autres formes utilisables, telles que l'énergie mécanique (par ex. moteurs à combustion), ou l'énergie thermique (par ex. chauffage direct).

(ii) **L'énergie mécanique** est associée à un déplacement (tel que l'expansion dans les cylindres des moteurs à combustion interne) et peut être utilisée directement pour entraîner des machines, par exemple des générateurs électriques, des véhicules, des camions, etc. Elle s'utilise aussi couramment pour alimenter les générateurs afin de produire de l'énergie électrique. L'énergie mécanique comprend **l'énergie de la houle** et **l'énergie marémotrice**.

(iii) **L'énergie thermique** est l'énergie cinétique interne des particules de matière. Elle peut être considérée soit comme l'énergie thermodynamique (ou énergie interne), soit comme un synonyme de chaleur. Toutefois, la chaleur est en réalité l'action de transférer l'énergie thermique d'un système (ou d'un objet) à un autre. L'énergie thermique peut être libérée par des réactions chimiques telles qu'une combustion, des réactions nucléaires, une résistance à l'énergie électrique (comme dans les fours électriques), ou une dissipation mécanique (telle qu'une friction).

(iv) **L'énergie électrique** est la capacité des forces électriques à effectuer un travail au cours des réorganisations des positions de charges (par exemple lorsqu'une charge électrique circule dans un circuit). Elle est étroitement liée à **l'énergie magnétique** qui est une forme d'énergie présente dans tout champ électrique ou champ magnétique (volume contenant un rayonnement électromagnétique), et est souvent associée au déplacement d'une charge électrique. Le rayonnement électromagnétique comprend **les énergies lumineuses.**

(v) L'énergie gravitationnelle est le travail effectué par la gravité. Si elle peut être observée dans l'industrie, par exemple, dans le déplacement de chutes de matière, son rôle dans l'efficacité énergétique est limité à certains calculs énergétiques. Le levage et le pompage, etc. sont réalisés par des machines utilisant de l'énergie électrique

(vi) L'énergie nucléaire est l'énergie contenue dans les noyaux des atomes ; elle peut être libérée par fission ou par fusion des noyaux. Les centrales de production d'électricité utilisant l'énergie nucléaire sont en dehors du champ d'application de l'IPPC et l'énergie nucléaire n'est pas traitée dans le présent document. Toutefois, l'électricité générée par la puissance nucléaire fait partie des formes d'énergie utilisées en Europe, voir Annexe 7.16.

Potentiel et énergie cinétique

Toutes les énergies énumérées ci-dessus sont des énergies potentielles, où l'énergie est stockée d'une manière quelconque, par exemple dans les liaisons chimiques d'une substance stable, dans un matériau radioactif. L'énergie potentielle gravitationnelle est l'énergie stockée en raison de la position d'un objectif par rapport à d'autres objets, par exemple de l'eau stockée derrière un barrage. L'énergie cinétique est l'énergie due au mouvement d'un corps ou de particules. L'exemple classique est un pendule, où l'énergie potentielle maximale est stockée dans le pendule au sommet de son arc, et où l'énergie cinétique est maximale lorsqu'il est au point le plus bas de l'arc. Comme on peut le voir à partir de cet exemple de base, les énergies se transforment d'une forme en une autre. La plupart des interactions fondamentales de la nature peuvent être liées à une certaine forme d'énergie potentielle, bien que certaines énergies ne puissent pas être facilement classées sur ce principe, comme la lumière.

Chaleur, transfert de chaleur et travail

La chaleur (Q) peut être définie comme une énergie en transit d'une masse à une autre par suite d'une différence de température entre ces deux masses. Elle représente la quantité d'énergie transférée dans un système fermé pendant un processus par un moyen autre que le travail. Le transfert d'énergie se produit uniquement dans le sens des températures décroissantes. La chaleur peut être transférée de trois manières différentes :

(i) **la conduction** est le transfert d'énergie à partir de la plus grande partie des particules énergétiques d'une substance vers les particules adjacentes qui sont moins énergétiques en raison des interactions entre les particules. La conduction peut se produire dans des solides, des liquides et des gaz,
(ii) **la convection** est le transfert d'énergie entre une surface solide à une certaine température et un gaz ou un liquide adjacent en déplacement à une autre température,
(iii) **le rayonnement thermique** est émis par la matière par suite des changements des configurations électroniques des atomes ou des molécules qu'elle contient. L'énergie est transportée par des ondes électromagnétiques et ne nécessite aucun milieu intervenant pour se propager et peut même se dérouler dans le vide.

En thermodynamique, **le travail (W)** est défini comme la quantité d'énergie transférée vers (ou depuis) un système depuis (ou vers) son environnement. Il s'agit du travail mécanique (la quantité d'énergie transférée par une force), qui est exprimé historiquement comme l'élévation d'un corps à une certaine hauteur.

Énergie et puissance

Dans les textes Anglais (aux États-Unis et aux Royaume-Uni), les termes « énergie » et « puissance » sont fréquemment source de confusion et utilisés de manière interchangeable. En physique et en mécanique, l'« énergie » et la « puissance » ont des significations différentes. La puissance est l'énergie par unité de temps (le taux de transfert d'énergie en travail). Le watt (W) est l'unité de puissance (et de flux radiant) du système international des unités (SI) ; le joule (J) est l'unité d'énergie, de travail et de quantité de chaleur du système international des unités (SI): un watt équivaut par conséquent à un joule par seconde.

Les expressions « flux de puissance » et « consommer une quantité de puissance électrique » sont toutes deux incorrectes et devraient être « flux d'énergie » et « consommer une quantité d'énergie électrique ».

Le joule n'est pas une unité très pratique, parce que trop petite, pour effectuer des mesures et en conséquence, ses multiples sont couramment utilisés pour exprimer la production ou la consommation d'énergie des équipements, des systèmes et des installations (et par conséquent le rendement énergétique industriel), notamment : les kilojoules (kJ), les mégajoules (MJ) ou les gigajoules (GJ).

La consommation électrique et la puissance délivrée sont exprimées en watt et là encore, cette unité étant trop petite pour être utilisée dans la plupart des usages industriels, on a parfois recours à ses multiples, à savoir le kilowatt (kW), le mégawatt (MW) et le gigawatt (GW)[6].

D'une manière générale, cela n'a aucun sens d'indiquer la puissance nominale (usage) d'un appareil comme étant de « 100 watts par heure » étant donné qu'un watt est déjà un taux de fourniture de travail ou d'utilisation de l'énergie de 1 joule d'énergie par seconde. Le watt étant à proprement parler un taux (énergie rapportée à un temps), point n'est besoin de lui adjoindre une indication de temps (sauf s'il s'agit de présenter un changement de puissance au fil du temps, analogue à une accélération). Une unité SI dérivée, le wattheure (c'est-à-dire watt x heure) sert aussi à exprimer une quantité d'énergie. Comme le watt et le joule sont des unités petites, difficilement utilisables dans les applications énergétiques industrielles, des multiples tels que le kilowattheure (kWh), le mégawattheure (MWh) et le gigawatt-heure (GWh)[7] sont fréquemment utilisés comme unités d'énergie, en particulier par les compagnies de fourniture d'électricité et les consommateurs d'énergie. Un kilowattheure est la quantité d'énergie équivalente à une puissance de un kilowatt utilisée pendant une heure et 1 kWh = 3,6 MJ. L'utilisation du kWh plutôt que du MJ est probablement historique, et particulière à ce secteur et cette application[8].

Parmi les autres termes employés, il faut citer le mégawatt électrique (MW_e), qui fait référence à la puissance électrique et le mégawatt thermique (MW_{th}), qui fait référence à la puissance thermique ; et que leurs indices permettent de distinguer. Ce ne sont pas des unités standard du système international des unités (SI) et elles ne sont théoriquement pas nécessaires (le Bureau international des poids et mesures, BIPM, les considère comme incorrectes), mais ce sont des termes d'usage courant dans le métier, en particulier lorsque ces deux types d'énergie sont utilisées et/ou produites comme dans la génération d'électricité et la production chimique.

1.2.2 Lois de la thermodynamique

---

[6] Une UC Pentium 4 consomme environ 82 W. Une personne travaillant dur physiquement produit environ 500 W. Des automobiles types produisent entre 40 et 200 kW de puissance mécanique. Une locomotive diesel-électrique moderne produit environ 3 MW de rendement de puissance mécanique.

[7] Le gigawatt-heure (GWh) qui est 10^6 fois plus grand que le kWh s'utilise pour mesurer la capacité de production des centrales électriques de grande puissance, ou la consommation électrique des grandes installations (MWh est une unité souvent trop petite pour cela)

[8] Un kilowatt-heure est la quantité d'énergie équivalente à une puissance d'un kilowatt développée pendant une heure

1 kWh = 1000 W * 3600 secondes = 3 600 000 W-secondes = 3 600 000 J = 3,6 MJ

L'unité habituelle pour mesurer l'énergie électrique est le watt-heure, qui est la quantité d'énergie tirée par une charge de un watt (par exemple, une minuscule ampoule d'éclairage) en une heure. Le kilowatt-heure (kWh), qui est 1000 fois plus grand qu'un watt-heure (égal à un seul élément d'un chauffage électrique) est une taille utile pour mesurer l'énergie consommé par les ménages et les petites entreprises mais aussi pour la production d'énergie des petites centrales électriques. Une maison type utilise plusieurs centaines de kWh par mois. Le mégawatt-heure (MWh) qui est 1000 fois plus grand que le kilowatt-heure, s'utilise pour mesurer la capacité de production des centrales électriques de grande puissance ou la consommation d'énergie des grandes installations.

Comme il ressort de la Section 1.2.1, une forme d'énergie peut être transformée en une autre forme à l'aide d'une machine ou d'un dispositif et la machine peut être amenée à effectuer un travail (voir Annexe 7.1.1).

Les relations et les concepts de ces diverses énergies sont définis mathématiquement selon qu'il s'agit de systèmes « fermés » ou « ouverts ». Les systèmes « fermés » ne permettent aucun échange de particules avec le milieu extérieur mais demeurent en contact avec lui. Ils peuvent échanger de l'énergie sous forme de travail et de chaleur à travers la limite (voir la Figure 1.4).

En réalité, les systèmes industriels sont « ouverts ». Les propriétés du système doivent aussi être définies, notamment la température, la pression et la concentration des composants chimiques, ainsi que leurs taux de variation.

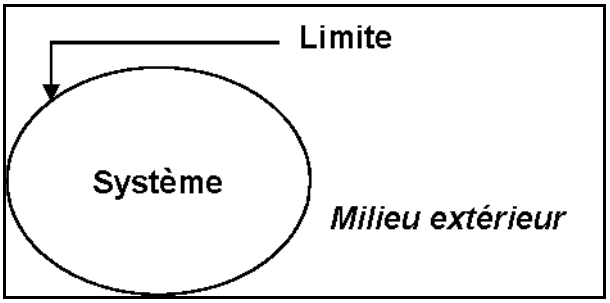


Figure 1.4 : Système thermodynamique

1.2.2.1 Première loi de la thermodynamique : la transformation de l'énergie

Cette loi énonce que *l'énergie ne peut être ni créée ni détruite.* Elle peut être uniquement transformée. Cela signifie que le flux total d'énergie dans un processus[9] stable d'un système défini doit être égal au flux total sortant du système.

Les termes « *production d'énergie* » ou « *génération d'énergie* » (bien que techniquement incorrects) sont malheureusement d'usage courant et apparaissent dans le présent document (dans la mesure où l'emploi de l'expression « *transformation d'énergie* » est peu fréquent dans les applications industrielles et risque de sembler insolite à certains lecteurs. L'expression « *utilisation de l'énergie* » est largement utilisée et n'implique ni la création ni la destruction d'énergie. Ces expressions sont généralement considérées comme signifiant la transformation d'une forme d'énergie dans d'autres formes d'énergie ou de travail.

Pour un système fermé, la première loi implique que la transformation de l'énergie du système est égale au transfert d'énergie net vers le système sous forme de chaleur et de travail, à savoir :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W \quad \text{(exprimé en joules, dans le système SI)}$$

Où : U_1 = l'énergie interne avant transformation
U_2 = l'énergie interne après transformation
Q = chaleur : Q>0 reçue par le système
W = travail : W>0 produit par le système

La théorie de la relativité combine l'énergie et la masse, c'est pourquoi l'énergie et la matière sont toutes deux conservées, et les flux d'énergie et de matière vers ou depuis un système défini doivent s'équilibrer. Dans les réactions de fusion et de fission nucléaire, comme la masse est transformée uniquement en énergie il est donc possible de calculer les bilans d'énergie (et de

[9] Un processus est stable lorsque le comportement récemment observé d'un système ne se modifie pas, par exemple lorsque le flux d'électricité ou de matière à l'intérieur d'un réseau demeure constant (avec les mêmes paramètres physiques tels que la tension, la pression, etc.)

masse) pour les réactions et les procédés. Ceci est à la base des audits et des bilans, voir Section 2.11.

Selon la première loi, le rendement énergétique net, est donné (pour le rendement thermique d'un moteur thermique) par la fraction de la chaleur en entrée transformée en travail net en sortie :

$$\eta = \frac{W_{net,sortie}}{Q_{entrée}}$$

Où : η = rendement
W = travail
Q = chaleur

Il peut également être décrit comme :

$$\text{rendement } \eta = \frac{\text{extrant énergétique}}{\text{intrant énergétique}} = \frac{\text{travail (W)}}{\text{énergie (E)}}$$

Dans le système international des unités (SI), le travail utile (W) fourni par le processus et l'énergie (E) sont tous deux exprimés en joules, aussi le rapport est sans dimension, entre 0 et 1, ou exprimé en pourcentage. (Remarque : ceci ne s'applique pas lorsque la vapeur, la chaleur et la puissance électrique ont été exprimées en équivalents comme dans le BREF WI (Incinération des déchets) ou dans le projet de révision WFD. [254, EIPPCB, 2005, 255, CE, et al., 2005]

1.2.2.2 Deuxième loi de la thermodynamique : augmentation de l'entropie

La seconde loi énonce que *l'entropie* (voir ci-dessous) *d'un système isolé thermodynamiquement tend à augmenter au fil du temps.*

Pour un processus réversible d'un système fermé, ***l'entropie*** peut être définie comme :

$$\underbrace{S_2 - S_1}_{\substack{Variation \\ d'entropie}} = \underbrace{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)}_{\substack{Transfert\ d'entropie \\ dans\ un\ processus \\ réversible}} \text{ (En unités SI = J/K)}$$

Où : S = Entropie
Q = Chaleur
T = Température

Cette loi décrit la qualité d'une quantité particulière d'énergie et la direction de l'univers et de tous les processus. Le terme mathématique *entropie* peut être expliqué de différentes manières aux fins de comprendre ce concept :

- l'énergie qui est dispersée, « inutile », ou réduite en « chaleur irrécupérable » (dispersée en déplacements moléculaires ou vibrations),
- une mesure de la perte partielle de la capacité d'un système à fournir un travail par suite des effets de l'irréversibilité,

- quantifie le niveau de désordre (caractère aléatoire) entre l'état initial et l'état final d'un système (par exemple les manières dont les molécules sont organisées) : en d'autres termes son augmentation au fil du temps. En conséquence, la pression et la concentration chimique s'écoulent aussi depuis les systèmes haute pression ou à forte concentration vers des systèmes basse pression ou à faible concentration, jusqu'à ce que les systèmes soient à l'équilibre.

Il existe diverses conséquences de cette loi, dont certaines peuvent contribuer à expliquer ce concept[10] :

- dans tout processus ou toute activité, il existe une tendance inhérente à la perte (ou à la dissipation) de l'énergie utile ou du travail utile (par exemple par le biais d'une friction),
- la chaleur se déplace selon des modes prévisibles, par exemple en s'écoulant d'un objet chaud vers un objet froid,
- il est impossible de transférer de la chaleur d'un système froid vers un système chaud sans transformation simultanée d'une certaine quantité d'énergie en chaleur ;
- il est possible de transformer intégralement du travail en chaleur mais non l'inverse ;
- une machine au cours d'un cycle ne peut se borner à recevoir de la chaleur d'un seul réservoir (source isolée) pour produire une quantité de travail nette équivalente ; il ne suffit pas qu'une machine reçoive de la chaleur pour qu'elle produise un travail utile : elle ne fonctionne que si elle en rétrocède simultanément une partie à l'extérieur, à une « source froide » (rien ne peut être obtenu d'un système sans contrepartie). En d'autres termes, il ne peut exister de machine à mouvement perpétuel.

En termes pratiques, cela signifie qu'aucune transformation de l'énergie ne peut être efficace à 100 % (Voir l'explication de la valeur thermique inférieure, ci-dessous, et voir Section 1.3.6.2), mais aussi qu'une réduction de l'augmentation de l'entropie dans un processus spécifié, par exemple dans une réaction chimique, indique qu'il est énergétiquement plus efficace.

L'énergie d'un système peut donc être considérée comme étant la somme de l'énergie « utile » et de l'énergie « inutile ».

L'***enthalpie*** (H) est la teneur en chaleur utile (énergie thermique) d'un système et elle est liée à l'énergie interne (U), à la pression (P) et au volume (V) :

$H = U + PV$ (en unité SI, exprimé en joules)

U est associée aux formes microscopiques d'énergie dans les atomes et les molécules.

Comme un système se transforme en passant d'un état à un autre, la variation d'enthalpie ΔH est égale à l'enthalpie des produits moins l'enthalpie des réactifs :

$$\Delta H = H_{finale} - H_{initiale} \quad \text{(En unités SI = J)}$$

Le ΔH final sera négatif si la chaleur est évacuée à l'extérieur (exothermique), et positif si la chaleur est apportée à partir de l'environnement (endothermique). Pour une réaction dans laquelle un composé est formé de ses éléments composites, la variation d'enthalpie est dénommée **chaleur de formation** (ou **variation d'enthalpie spécifique**) du composé. Il existe des variations d'enthalpie spécifiques pour la combustion, l'hydrogénation, la formation, etc.

Les changements physiques d'état ou de phase de la matière s'accompagnent également de variations d'enthalpie, **dénommées chaleurs latentes** ou **chaleurs de transformation**. Le

[10] Il existe d'autres corollaires de cette loi, notamment le fait que l'univers évolue inéluctablement vers une dégradation du niveau d'ordre qui le caractérise à mesure que le temps passe.

changement associé à la transition solide-liquide est dénommé chaleur de fusion et le changement associé à la transition liquide-gaz est dénommé chaleur de vaporisation.

Un changement d'énergie d'un système peut par conséquent être considéré comme étant la somme de l'énergie « utile » et de l'énergie « inutile ». Pour obtenir un travail, l'interaction des deux systèmes est nécessaire. L'**exergie *(B)*** est le travail utile maximum obtenu si le système est amené à l'équilibre avec l'environnement (par exemple même température, pression, composition chimique, voir Section 1.2.2.4).

Le taux d'exergie par rapport à l'énergie dans une substance peut être considéré comme une mesure de la qualité de l'énergie. Les formes d'énergie telles que l'énergie cinétique, l'énergie électrique, l'**énergie libre de Gibbs** (G) sont récupérables à 100 % en tant que travail, et ont par conséquent une exergie égale à leur énergie. Toutefois, les formes d'énergie telles que le rayonnement et l'énergie thermique ne peuvent pas être totalement transformées en travail, et leur teneur en exergie est inférieure à leur teneur en énergie. La proportion exacte d'exergie dans une substance dépend de la quantité d'entropie par rapport à son environnement immédiat comme déterminé par la deuxième loi de la thermodynamique.

L'exergie nécessite de définir les paramètres du système (température, pression, composition chimique, entropie, enthalpie) et peut être exprimée en fonction des paramètres maintenus constants. L'exergie du flux spécifique (E) d'un courant donné est calculée comme suit :

$E = H - H_0 - T_0 (s - s_0)$, où l'indice 0 signifie les conditions de référence

À titre d'illustration pratique de l'énergie « utile » : 300 kg de vapeur à 400°C à 40 bars et 6 tonnes d'eau à 40°C contiennent la même quantité d'énergie (si l'on suppose une même température de référence), c'est-à-dire 1 GJ. La vapeur à 40 bars peut fournir un travail utile (tel que la production d'électricité, le déplacement d'équipements mécaniques, le chauffage, etc.) mais il existe une utilisation limitée pour l'eau à 40°C. L'exergie du courant basse température peut être élevée mais ceci nécessite une dépense d'énergie. Par exemple, les pompes à chaleur peuvent être utilisées pour accroître l'exergie mais consomment de l'énergie à titre de travail.

1.2.2.3 Bilan d'exergie : combinaison de la première et de la deuxième loi

La première et la deuxième loi peuvent être combinées en une forme qui est utile pour conduire des analyses de l'exergie, du potentiel du travail et des efficacités de la seconde loi entre autres. Cette forme fournit également un aperçu supplémentaire de l'intérieur des systèmes, de leur fonctionnement et de leur optimisation, voir Section 2.13.

Bilan d'exergie d'un système ouvert
Le bilan exergétique à volume constant est égal à :

$$\underbrace{\frac{dE_{cv}}{dt}}_{\substack{\text{Taux}\\ \text{de}\\ \text{variation}\\ \text{d'exergie}}} = \underbrace{\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)\dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{cv} - P_0 \frac{dVcv}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e}_{\substack{\text{Taux}\\ \text{de}\\ \text{transfert}\\ \text{d'exergie}}} - \underbrace{\dot{I}}_{\substack{\text{Taux}\\ \text{de}\\ \text{destruction}\\ \text{d'exergie}}}$$

Où : E_{cv} = exergie à volume constant
T = température
t = temps
Les termes $m_i e_i$ et $m_e s_e$ = les taux de transfert d'exergie vers et depuis le système accompagnant le débit massique (m_i à m_e)

Q_j = vitesse de transfert de la chaleur à l'emplacement de la limite où la température instantanée est T_j
I = taux de destruction d'exergie, ou irréversibilité
P = pression
V = volume
W_{cv} = travail à volume constant

Pour un système à débit stable, on obtient le bilan :

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)\dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{I}$$

Applications industrielles
L'application de l'exergie à des opérations unitaires dans les usines chimiques est en partie responsable de l'énorme croissance de l'industrie chimique au cours du vingtième siècle. A cette époque, on avait pour habitude de l'appeler « travail disponible ».

L'un des objectifs des méthodes faisant appel à l'énergie et à l'exergie en ingénierie est de calculer des bilans entre les entrées et les sorties de plusieurs conceptions possibles avant de construire une unité ou un procédé. Une fois les bilans établis, l'ingénieur souhaite souvent sélectionner le procédé le plus efficace. Toutefois, cela ne se fait pas directement (voir Section 2.13) :

- un rendement énergétique ou une efficacité selon la première loi va déterminer le procédé le plus rentable en se fondant sur une perte d'énergie aussi faible que possible par rapport aux entrées d'énergie,
- un rendement exergétique ou une efficacité selon la seconde loi va déterminer le procédé le plus efficace en se fondant sur une perte et une destruction de travail aussi faible que possible à partir d'une entrée de travail disponible donnée.

Un rendement exergétique plus élevé implique la construction d'une installation plus onéreuse, et l'établissement préalable d'un bilan entre investissement de capitaux et efficience de production.

1.2.2.4 Diagrammes de propriétés

Si les propriétés d'un système sont mesurées (par exemple température T, pression P, concentration, etc.) et si ses propriétés tendent à rester constantes au fil du temps, on peut dire que le système a atteint un **état d'équilibre**. La condition d'un système à l'équilibre peut être reproduite dans d'autres systèmes (similaires) et définie par un ensemble de propriétés, qui sont les **fonctions d'état** : d'où le nom de **postulat d'état** donné à ce principe. Il s'ensuit que l'état d'un système d'un corps pur peut être représenté dans un diagramme avec deux propriétés indépendantes. Les cinq propriétés de base d'une substance qui sont habituellement représentées sur les diagrammes de propriétés sont : la pression (P), la température (T), le volume spécifique (V), l'enthalpie spécifique (H) et l'entropie spécifique (S). La qualité (X) est représentée en cas de mélange de deux (ou plus de deux) substances. Les diagrammes de propriétés les plus courants sont : pression-température (P-T), pression-volume spécifique (P-V), température-volume spécifique (T-V), température-entropie (T-S) ; enthalpie-entropie (H-S) ; et les graphiques température-enthalpie (T-H), qui sont utilisés dans une méthodologie de type « pincement » (voir Section 2.12). Ces diagrammes s'avèrent très utiles pour des graphiques des processus. En outre, les trois premiers diagrammes sont utiles pour expliquer les relations entre les trois phases de la matière.

Diagrammes pression-température (phase)

Les diagrammes de phase représentent les conditions d'équilibre entre des phases qui sont distinctes au plan thermodynamique.

Le diagramme P-T (Figure 1.5) d'un corps pur comporte des régions correspondant à des *régions à phase unique* (phases solide, liquide, gazeuse), où la phase du corps est fixée par les conditions de température et de pression.

Les lignes (appelées *limites de phase*) correspondent aux régions (ou aux conditions, qui sont, dans ce cas P et T) dans lesquelles il existe deux phases à l'équilibre. Dans ces zones, la pression et la température ne sont pas indépendantes et une seule variable intensive (P ou T) est requise pour fixer l'état du corps. La ligne de sublimation sépare les régions « solide » et « vapeur », la ligne de vaporisation sépare les régions « liquide » et « vapeur » et la ligne de fonte ou fusion sépare les régions « solide » et « liquide ».

Ces trois lignes se rencontrent au *point triple*, où toutes les phases coexistent simultanément à l'équilibre. Dans ce cas, il n'y a pas de variables intensives indépendantes : il y a uniquement une pression et une température pour un corps au niveau de son triple point.

Le *point critique* se trouve à l'extrémité de la ligne de vaporisation. À des pressions et températures au-dessus du point critique, on dit que le corps est à l'état supercritique, pour lequel aucune distinction claire ne peut être effectuée entre les phases liquides et vapeur. Ceci reflète le fait qu'à des pressions et des températures extrêmement élevées, les phases liquide et gazeuse deviennent impossibles à distinguer. Pour l'eau, le point critique se situe approximativement à 374 °C (647 K) et 22,064 MPa. À ce stade, on dit qu'un corps situé à gauche de la ligne de vaporisation est à l'état de liquide sous-refroidi ou comprimé ; et lorsqu'il est à droite de cette même ligne, le corps est à l'état de vapeur surchauffée.

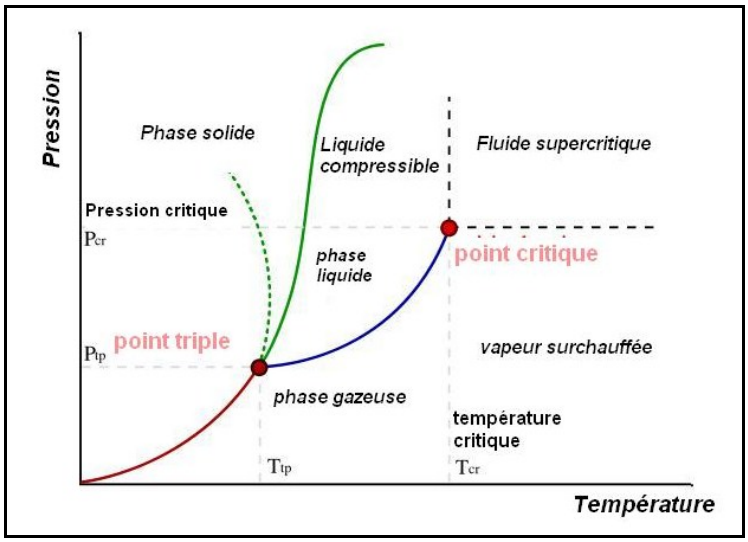


Figure 1.5 : Diagramme Pression – Température (phase)
[153, Wikipedia]

1.2.2.5 Autres informations

Il est possible de trouver des informations plus approfondies dans les manuels standard de thermodynamique, de physique et de chimie, etc.

Un large éventail de documents et de bases de données fournit des informations et des tables contenant les valeurs des propriétés thermodynamiques de diverses substances ainsi que des diagrammes de leurs relations entre elles. Ces données sont dérivées de données expérimentales. Les propriétés les plus couramment énumérées dans les tables sont : le volume spécifique,

l'énergie interne, l'enthalpie spécifique, l'entropie spécifique et la chaleur spécifique. Les tables de propriétés peuvent être consultées dans des manuels de thermodynamique, sur Internet, etc.

Comme deux variables intensives doivent être connues pour fixer l'état dans des régions à phase unique, les propriétés V, U, H et S sont énumérées par rapport à la température à des pressions sélectionnées pour la vapeur surchauffée et un liquide comprimé. S'il n'existe aucune donnée disponible pour un liquide comprimé, une approximation raisonnable consiste à traiter le liquide comprimé comme un liquide saturé à la température donnée. Ceci s'explique parce que les propriétés du liquide comprimé dépendent plus fortement de la température que de la pression.

Les tableaux dénommés « tableaux de saturation » s'utilisent pour les états de liquide saturé et de vapeur saturée. Étant donné que dans les régions à deux phases, la pression et la température ne sont pas indépendantes, une seule de ces propriétés suffit à fixer l'état. C'est pourquoi, dans les tableaux de saturation, les propriétés V, U, H et S pour les liquides saturés et la vapeur saturée sont présentées soit par rapport à la température, soit par rapport à la pression. Dans le cas d'un mélange liquide-vapeur saturé, une propriété supplémentaire dénommée qualité doit être définie. La qualité se définit comme la fraction de masse de vapeur dans un mélange saturé liquide-vapeur.

Les détails sur les banques de données et les programmes de simulation thermodynamique se trouvent à l'Annexe 7.1.3.2.

1.2.2.6 Identification des irréversibilités

En thermodynamique, un *processus réversible* est théorique (pour dériver des concepts) et en pratique, tous les systèmes réels sont *irréversibles.* Ils ne peuvent donc pas être inversés spontanément, mais uniquement par l'application d'énergie (une conséquence de la seconde loi). Les conditions d'équilibre mécanique, thermique et chimique d'un système thermodynamique impliquent également trois causes de déséquilibre ou d'irréversibilités (que l'on peut considérer en pratique comme des inefficacités thermodynamiques). Les changements sont provoqués par des forces motrices telles que la température ; la pression, la concentration, etc. ; comme dicté par la seconde loi de la thermodynamique. Plus les forces motrices sont petites, plus la taille des équipements requis est grande, par exemple, la surface d'échange de chaleur lorsque la LMTD (différence moyenne logarithmique des températures) diminue. Le cycle de Carnot, qui correspond au rendement maximal auquel la chaleur peut être transformée en puissance, repose sur le principe zéro force motrice et dans la pratique, les efficacités du cycle de Carnot ne peuvent être obtenues dans des opérations réelles. Pour une explication complémentaire du cycle de Carnot, voir le BREF LCP (Grandes installations de combustion) ([125, EIPPCB] ou un manuel standard.

Les irréversibilités mécaniques apparaissent dans les processus qui impliquent une friction et provoquent couramment des changements de pression.

Les irréversibilités thermiques apparaissent lorsqu'il y a un changement fini de température à l'intérieur du système, comme par exemple, dans tous les échangeurs de chaleur. La chaleur passe spontanément d'un corps chaud à un corps froid, en perdant de ce fait de l'exergie. Là encore, plus le changement de température est grand, plus la perte d'exergie est grande et plus le processus est irréversible.

Les irréversibilités chimiques sont dues à un déséquilibre chimique, se produisant dans des mélanges, des solutions et des réactions chimiques. Par exemple, lorsqu'on mélange de l'eau et du sel, l'exergie du système diminue. Cette perte d'exergie peut être visualisée comme étant la quantité de travail qui a été préalablement nécessaire pour purifier l'eau afin d'en extraire le sel, par exemple par distillation, échange d'ions, filtration sur membrane ou séchage. Toute pollution de l'atmosphère et de l'eau implique des irréversibilités chimiques. Il est très facile

d'opérer une contamination (mélange) mais l'exergie nécessaire pour procéder au nettoyage est importante.

L'analyse thermodynamique des processus irréversibles révèle que pour obtenir une bonne efficacité et économiser de l'énergie, il est nécessaire de contrôler et de minimiser toutes les irréversibilités mécaniques, thermiques et chimiques susceptibles d'apparaître dans l'installation.

Des exemples de chacune de ces irréversibilités sont présentés à l'Annexe 7.2.

Plus les irréversibilités sont grandes, plus la marge d'amélioration de l'efficacité d'un système énergétique est élevée. Les causes d'une conception médiocre au plan énergétique sont imputables à des différences finies (importantes) de pression et/ou de température et/ou de potentiels chimiques, et d'un décalage entre la demande et la satisfaction de cette dernière. Le temps joue également un rôle important dans les systèmes d'efficacité énergétique. Les systèmes énergétiques réduisent spontanément leur pression, température et potentiels chimiques pour atteindre l'équilibre avec leur environnement. Pour éviter ce phénomène, il existe 2 stratégies. L'une consiste à accoupler immédiatement des donneurs d'énergie avec des accepteurs d'énergie (voir, par exemple, Section 2.3). L'autre consiste à effectuer un stockage, en enfermant un système à l'intérieur de parois rigides pour la pression, de parois adiabatiques pour la température et/ou de confiner les systèmes chimiques dans des états métastables. En d'autres termes, confiner les systèmes dans des réservoirs qui maintiennent leurs propriétés intensives constantes au fil du temps.

La thermodynamique a un rôle à jouer pour atteindre la meilleure efficacité énergétique qu'il est possible d'obtenir ; dans la pratique elle est appliquée au moyen de :

- la recherche de l'efficacité énergétique à la conception, voir Section 2.3,
- l'emploi d'outils analytiques tels que des analyses de pincement, de l'exergie et de l'enthalpie, voir Sections 2.12 et 2.13,
- la thermoéconomie, qui associe une analyse thermodynamique à l'économie, voir Section 2.14.

1.3 Définitions des indicateurs d'efficacité énergétique et de l'amélioration de l'efficacité énergétique

1.3.1 Efficacité énergétique et évaluation selon la directive IPPC

[4, Cefic, 2005, 92, Motiva Oy, 2005] [5, Hardell and Fors, 2005]

« L'efficacité énergétique » est une expression couramment utilisée au plan qualitatif pour désigner les moyens d'aborder différents objectifs, tels qu'une politique au niveau national et international, ainsi que des enjeux commerciaux, principalement (comme on peut le voir dans la Préface)[11] :

- réduction des émissions de carbone (protection du climat)
- amélioration de la sécurité des approvisionnements énergétiques (par le biais d'une production durable)
- réduction des coûts (amélioration de la compétitivité des entreprises).

À première vue, « l'efficacité énergétique » semble être simple à comprendre. Toutefois, elle est rarement définie là où elle est utilisée, de sorte que « *l'efficacité énergétique peut avoir des*

[11] L'autre politique d'efficacité énergétique majeure a pour objet la réduction de la situation de précarité liée à l'achat de combustible (par ex. ménages qui ne peuvent se chauffer en hiver). Il s'agit d'une question de société, qui n'est pas directement liée à l'efficacité énergétique industrielle et à l'IPPC.

significations différentes à des moments différents et en différents lieux ou dans des circonstances différentes ». Ce manque de clarté a été qualifié de « *nébuleux et variable* », source « *d'incohérence et confusion* » et là où des économies d'énergie doivent être présentées en termes quantitatifs, l'absence de définition adéquate est « *embarrassante, en particulier lorsque des comparaisons sont effectuées entre des industries majeures ou entre des secteurs industriels* ». Il n'existe aucune définition de « l'efficacité énergétique » dans la directive IPPC, et la présente section porte sur les problèmes relatifs à sa définition dans le contexte d'une installation et d'une autorisation [62, UK_House_of_Lords, 2005, 63, UK_House_of_Lords, 2005].

Comme la directive IPPC traite des procédés de production à l'intérieur d'une installation, le présent document est centré sur l'efficacité énergétique physique au niveau d'une installation. C'est pourquoi, les cycles de vie des produits ou des matières premières, bien que pertinents pour l'évaluation des ressources, ne sont pas pris en compte, (cette question est abordée dans les politiques sur les produits, voir Champ d'application).

L'efficacité économique est également abordée dans le présent document, lorsque l'on dispose de données et/ou lorsque cela est pertinent (comme dans les techniques individuelles, et voir Section 1.5.1). Les rendements thermodynamiques sont traités ci-dessus, et aussi lorsqu'ils interviennent dans les techniques individuelles.

L'efficacité énergétique peut être réduite par des mesures visant à améliorer les impacts environnementaux des produits ou des sous-produits, etc. (voir Section 1.5.2.5). Ce sujet est hors du champ d'application du présent document.

1.3.2 Utilisation efficace et inefficace de l'énergie

[227, TWG]

L'efficacité énergétique (et inversement, l'inefficacité énergétique) des installations peut être considérée de deux manières à savoir[12] :

1. L'énergie récupérée par rapport à l'énergie en entrée. Elle ne peut jamais être égale à 100 % en raison des lois de la thermodynamique, voir Section 1.2.2.6. Les irréversibilités thermodynamiques (voir Section 1.2.2.6) constituent la base des inefficacités (pertes), et comprennent le transfert d'énergie par conduction, convection ou rayonnement (irréversibilités thermiques). Par exemple, un transfert de chaleur ne se produit pas seulement dans la direction souhaitée, c'est-à-dire à destination du procédé mais également vers l'extérieur par le biais des parois du réacteur ou du four, etc. Toutefois, il existe diverses techniques permettant de réduire les pertes, dont bon nombre sont traitées ultérieurement dans le présent document, par exemple la réduction des pertes de chaleur radiante émanant des procédés de combustion.

2. L'utilisation attentive (ou efficace) de l'énergie, comme et quand cela est nécessaire en quantités optimales. L'inefficacité (ou l'utilisation inefficace) provient d'un décalage entre l'offre et la demande d'énergie, et comprend notamment une mauvaise conception, exploitation et maintenance ; la mise sous tension des équipements lorsque cela n'est pas nécessaire, par exemple de l'éclairage ; l'exploitation des procédés à une température supérieure à la température nécessaire ; l'absence de stockage approprié de l'énergie, etc.

[12] En Anglais, il n'existe qu'un seul terme, à savoir « energy efficiency » et son contraire « inefficiency », ce qui peut être source de confusion. D'autres langues possèdent deux termes séparés pour « efficiency/losses », comme en Français : « rendement/pertes énergétiques » et pour « careful/careless use » : efficacités/inefficacités énergétiques '.

1.3.3 Indicateurs d'efficacité énergétique

[5, Hardell and Fors, 2005]

L'efficacité énergétique est définie dans la directive[13] EuP [148, CE, 2005] comme :

« un rapport entre les résultats, le service, la marchandise ou l'énergie que l'on obtient et l'énergie consacrée à cet effet. »

Il s'agit de la quantité d'énergie consommée par unité de produit/sortie, que l'on dénomme « consommation d'énergie spécifique » (SEC) ; et c'est la définition la plus couramment utilisée par l'industrie. (Remarque : la définition ci-après est quant à elle d'usage fréquent dans les industries pétrochimiques et chimiques, mais est dénommée « facteur d'intensité énergétique » (EIF) ou « indicateur d'efficacité énergétique » (EEI) : voir ci-dessous et Annexe 7.9.1).

Sous sa forme la plus simple, la consommation d'énergie spécifique (SEC) peut être définie comme :

$$\text{SEC} = \frac{\text{Énergie utilisée}}{\text{Produits obtenus}} = \frac{(\text{Énergie importée} - \text{Énergie exportée})}{\text{Produits ou sorties obtenus}} \qquad \textbf{Équation 0.1}$$

La consommation d'énergie spécifique est un nombre avec des dimensions (GJ/tonne) et peut être utilisée pour des unités élaborant des produits qui sont mesurés en unités de masse. Pour les industries productrices d'énergie (production d'électricité, incinération des déchets), il est parfois plus judicieux de définir un facteur d'efficacité énergétique comme étant égal à l'énergie produite (GJ)/l'énergie importée (GJ). Les consommations d'énergie spécifique (SEC) peuvent être exprimées sous forme d'autres rapports, tels que énergie/m^2 (par ex. dans les revêtements de bobine, la production automobile), énergie/employé, etc.

L'expression « facteur d'intensité énergétique » (EIF) est également utilisée (voir également la remarque ci-dessus, sur son utilisation dans les industries pétrochimiques). Il est à remarquer que les économistes comprennent habituellement le facteur d'intensité énergétique comme étant le rapport entre l'énergie utilisée et une valeur financière, tel que le chiffre d'affaires, une valeur ajoutée, PIB, etc., par exemple :

$$\text{EIF} = \frac{\text{Énergie utilisée}}{\text{Chiffre d'affaires de l'installation}} = \text{GJ/chiffre d'affaires en EUR} \qquad \textbf{Équation 0.2}$$

Toutefois, comme le coût des sorties s'élève habituellement au fil du temps, le facteur d'intensité énergétique (EIF) peut diminuer sans aucune augmentation de l'efficacité énergétique physique (à moins d'être ramené à un prix de référence). Ce terme devrait de ce fait être évité pour l'évaluation de l'efficacité énergétique physique d'une installation. Le facteur d'intensité énergétique (EIF) est également utilisé au niveau macro (c'est-à-dire Européen et national) et est exprimé comme, par exemple, GJ par unité de PIB (produit intérieur brut) qui peut ensuite être utilisé pour mesurer l'efficacité énergétique de l'économie d'une nation (voir la remarque sur l'utilisation de ce terme faite par les économistes, ci-dessus).

C'est pourquoi les unités utilisées doivent faire l'objet d'une clarification, en particulier pour les comparaisons des industries ou des secteurs
[158, Szabo, 2007].

Il est important de noter la différence entre les énergies primaires (telles que les combustibles fossiles) et les énergies secondaires (ou énergies finales) telles que l'électricité et la vapeur, voir Section 1.3.6.1. D'une manière idéale, une énergie secondaire doit être convertie en la teneur en

[13] Directive EuP, connue sous le nom de directive des produits consommant de l'énergie 2005/32/CE

énergie primaire, et ce terme devient alors la consommation spécifique d'énergie primaire. Il peut être exprimé comme, par exemple, énergie primaire par tonne de produits en MJ/tonne ou GJ/tonne [91, CEFIC, 2005]. Toutefois, il y a des avantages et des inconvénients à cela, qui sont examinés ultérieurement dans la Section 1.3.6.1.

Dénominateur de la consommation d'énergie spécifique et indice de l'efficacité énergétique

Dans le cas le plus simple, l'unité de production élabore un produit principal, qui peut ensuite être utilisé comme le diviseur dans la formule de la consommation d'énergie spécifique (SEC) (Équation 1.1). Dans de nombreux cas, la situation peut être plus complexe, comme lorsqu'il y a plusieurs produits dans des raffineries ou des grandes installations chimiques, où ce mélange de produit varie au fil du temps, ou lorsqu'il n'y a aucun produit évident, et que la sortie est un service, par exemple dans les installations de gestion des déchets. Dans les cas, tels que ceux présentés dans la Section 1.4 ci-dessous, il est possible d'utiliser d'autres critères de production, comme c'est le cas lorsque :

1. il existe plusieurs produits d'égale importance ou un nombre de co-produits importants. La somme de ces produits peut, le cas échéant, être utilisée comme diviseur. Sinon, il convient de décider d'un découpage permettant de conserver un sens tant au bilan énergétique qu'au bilan des produits

$$SEC = \frac{\text{Énergie utilisée}}{\Sigma\ \text{Produits obtenus}} = \frac{(\text{Énergie importée} - \text{Énergie exportée})}{\Sigma\ \text{Produits obtenus}}$$

2. il existe plusieurs flux de produits et le nombre de flux de matières premières (stock d'alimentation) est faible, les matières premières peuvent servir de dénominateur. L'emploi des matières premières comme dénominateur est recommandé si la consommation d'énergie est déterminée principalement par la quantité de matières premières et dans une moindre mesure par les produits (ce qui peut se produire lorsque la qualité des produits dépend du stock d'alimentation). Toutefois, cela ne reflète pas la perte (diminution) d'efficacité énergétique lorsque les matières premières et la consommation d'énergie restent identiques mais que les quantités de production diminuent.

$$SEC = \frac{\text{Énergie utilisée}}{\Sigma\ \text{mat. premières en entrée}} = \frac{(\text{Énergie importée} - \text{Énergie exportée})}{\Sigma\ \text{mat. premières en entrée}}$$

3. il y a plusieurs produits (ou un seul produit avec des spécifications différentes) qui sont fabriqués en lots ou dans le cadre de campagnes. Une usine de fabrication de polymère produisant divers grades de polymères qui sont fabriqués tour à tour et sur des durées différentes selon les besoins du marché, en est un exemple. La consommation d'énergie est propre à chaque grade et les grades de qualité supérieure nécessitent en principe une plus grande quantité d'énergie en entrée. Il peut être utile de définir une efficacité énergétique de référence pour chaque grade (fondée sur la consommation d'énergie moyenne pour le grade en question). La consommation d'énergie spécifique concernée sur une durée spécifique peut ensuite être définie comme :

$$SEC = \frac{\sum_{i-A,B,C} Xi * SEC_{ref,i_}}{\frac{\text{Énergie utilisée dans une unité de production sur la période considérée}}{\text{Somme des produits A, B et C fabriqués pendant cette période}}}$$

Où : Xi = la fraction de grade i sur le total des produits fabriqués pendant la période donnée
$SEC_{ref,i}$ = le facteur d'efficacité énergétique de référence pour le grade i (calculé, par exemple, en faisant la moyenne de l'indicateur d'efficacité énergétique sur une période de référence avec production uniquement du grade i).

4. Il n'existe aucun produit évident, et la sortie est un service, par exemple dans les installations de traitement des déchets. Dans ce cas, le critère de production lié à l'énergie utilisée est l'entrée des déchets :

$$SEC = \frac{\text{(énergie importée pour les besoins du procédé d'incinération - énergie exportée)}}{\text{(tonnes de déchets traités)}}$$

Lorsque les déchets sont surtout combustibles (comme les déchets solides municipaux, MSW), cet indicateur est négatif car une partie du pouvoir calorifique inférieur (LHV) des déchets incinérés est valorisée sous forme d'énergie exportée, et qu'elle est généralement plus importante que l'énergie importée (le cas échéant).

5. Autres cas où le rapport énergie-produit final (ou débit principal) est trop variable pour être utile. Les installations d'imprimerie en sont un exemple, car la quantité des imprimés en entrée/sortie ne reflète pas toujours la consommation d'énergie. Ceci est dû au fait que la quantité d'impression et de séchage varie en fonction de la couverture d'encre et des procédés utilisés, voir le BREF STS (Traitement de surface utilisant des solvants).

Définition de l'amélioration de l'efficacité énergétique
Selon la définition de la directive EuP [147, CE, 2006] l'amélioration de l'efficacité énergétique est un accroissement de l'efficacité énergétique dans les utilisations finales à la suite de modifications d'ordre technologique, comportemental et/ou économique. Les types de modifications qui satisfont à ces critères sont présentés dans la Section 1.5 et les techniques génériques sont décrites dans les Chapitres 2 et 3.

L'amélioration de l'efficacité peut donc être exprimée comme [5, Hardell and Fors] :

- l'obtention d'une valeur de sortie inchangée à un niveau de consommation d'énergie réduit, ou
- l'obtention d'une valeur de sortie accrue sans changement de la consommation d'énergie, ou
- l'obtention d'une valeur de sortie qui, en termes relatifs, surpasse l'augmentation de la consommation d'énergie.

Les indicateurs d'efficacité énergétique ont pour principal objectif de permettre une surveillance du progrès de l'efficacité énergétique d'une unité de production donnée et du taux de production donné au fil du temps et de voir l'impact des mesures et des projets d'amélioration de l'efficacité énergétique sur les performances énergétiques du procédé/de l'unité de production. La consommation d'énergie spécifique (SEC) montre la quantité d'énergie consommée pour une sortie donnée mais une valeur unique ne peut avoir qu'une utilisation limitée sans d'autres données de référence. L'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) peut être utilisé pour montrer

le changement sur une période de temps donnée et s'avère beaucoup plus utile pour la surveillance de l'efficacité énergétique d'un système, d'un procédé ou d'une installation. Il est défini en divisant une consommation d'énergie spécifique de référence ($SEC_{réf}$) par la consommation d'énergie spécifique de l'unité ou du procédé en question. La SEC_{ref} peut être une grandeur de référence qui est généralement acceptée par le secteur industriel auquel appartient le procédé de production, ou la consommation d'énergie spécifique (SEC) du procédé de production pour une année de référence donnée :

$$EEI = \frac{SEC_{ref}}{SEC}$$ **Équation 0.3**

L'indice d'efficacité énergétique est un nombre sans dimension.

Remarque :

- La consommation d'énergie spécifique (SEC) est un nombre qui diminue avec l'augmentation de l'efficacité énergétique tandis que l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) est un nombre qui augmente. En conséquence, la gestion de l'énergie vise à obtenir la consommation d'énergie spécifique (SEC) la plus basse possible et l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) le plus élevé possible.
- L'identification de l'efficacité énergétique réelle dans l'indicateur nécessite parfois de procéder à une correction des facteurs énergétiques.

Cadre temporel
Il convient de choisir un cadre temporel approprié (voir Section 2.16 et le BREF MON (Principes généraux de surveillance). S'il est établi sur une base horaire, l'indicateur d'efficacité énergétique peut présenter de grandes fluctuations pour un procédé continu et ne pas convenir pour un procédé discontinu. Ces fluctuations sont lissées sur des périodes de référence plus longues, comme les années ou les mois. Toutefois, il est important de noter que les variations dans un cadre temporel plus petit doivent être prises en compte, car elles sont susceptibles d'identifier des opportunités d'économies d'énergie.

Outre les deux principaux indicateurs traités ici, il existe aussi d'autres indicateurs et des sous-indicateurs, voir Sections 2.10. et 2.16.

1.3.4 Introduction à l'utilisation des indicateurs

Dans l'industrie, la consommation d'énergie spécifique (SEC) pour une sortie (ou une entrée) donnée est l'indicateur le plus couramment utilisé, et il le sera fréquemment dans le présent document. Sa définition est d'une simplicité trompeuse. Toutefois, l'expérience acquise au cours des tentatives de quantification du concept permettant de surveiller les procédés montre qu'un cadre est nécessaire pour mieux définir et mieux mesurer l'efficacité énergétique. Il existe plusieurs facteurs de complication, à savoir :

- l'énergie n'est pas toujours comptabilisée de la même manière ou en utilisant les mêmes paramètres par les différents exploitants ou personnels
- il est souvent nécessaire de considérer l'efficacité énergétique d'un procédé de production dans le cadre de l'efficacité énergétique d'un site de production impliquant plusieurs procédés de production
- la définition ne fournit aucune information sur le fait que l'énergie soit ou non utilisée ou produite de manière efficace.

Pour être informative et utile, l'efficacité énergétique doit être comparable, par exemple à une autre unité ou installation, ou au fil du temps et pour pouvoir effectuer une comparaison, il doit y avoir des règles ou des conventions. Dans le cas d'une comparaison de l'efficacité

énergétique, il est particulièrement important de définir les limites du système afin de garantir que tous les utilisateurs sont considérés d'une manière égalitaire.

Réduite à sa plus simple expression, la définition ne tient jamais compte de l'efficacité avec laquelle l'énergie est produite ni de l'utilisation de l'énergie « gaspillée » à l'extérieur des limites du système. Ces questions ainsi que d'autres questions doivent être transparentes pour permettre d'évaluer les améliorations de l'efficacité énergétique. Ces questions sont traitées dans les Sections 1.4 et 1.5

Pour l'IPPC, l'efficacité énergétique est considérée selon l'un ou l'autre des points de vue ci-après :

- au niveau d'une installation, lors de l'octroi d'une autorisation, avec possibilité de prise en compte de l'énergie :
  - de l'installation dans son ensemble
  - des procédés/unités/ou systèmes de production individuels
- au niveau européen, pour un secteur ou une activité industrielle lors de la définition des valeurs ENE associées aux MTD (repères), par exemple dans un BREF sectoriel.

La consommation d'énergie spécifique et l'indice d'efficacité énergétique (voir Section 1.3.3) sont des exemples d'indicateurs d'efficacité énergétique. Le caractère approprié des divers procédés d'efficacité énergétique et des divers indicateurs doit être pris en compte sur une base secteur et procédé et peut devoir être apprécié sur une base site par site (voir la présentation dans Analyse comparative, Section 2.16). Toutes les installations industrielles ont leurs propres caractéristiques. Il existe des différences entre les matières premières, les technologies de procédés, les qualités de produits, les mélanges de produits, les méthodes de surveillance, etc. L'âge de l'unité peut aussi avoir un effet important sur l'efficacité énergétique : les nouvelles installations ont généralement une meilleure efficacité énergétique que les anciennes [156, Beerkens, 2004, 157, Beerkens R.G.C. , 2006]. Si l'on prend en compte la plage de variables affectant l'efficacité énergétique, une comparaison entre différentes installations au moyen d'indicateurs d'efficacité énergétique peut conduire à des conclusions erronées, en particulier quand il s'avère difficile (voire même impossible) en pratique de prendre en compte toutes les variables d'une manière appropriée [127, TWG].

Pour évaluer l'efficacité énergétique, il peut être utile de [4, Cefic, 2005] :

- procéder à une évaluation du site pour établir si un indicateur d'énergie spécifique (SEI) peut être défini pour le site dans son ensemble
- fractionner le site en unités de production/d'utilités, si un indicateur d'énergie spécifique (SEI) ne peut être établi pour l'ensemble du site, ou si cela s'avère utile dans l'analyse de l'efficacité énergétique
- définir des indicateurs pour chaque procédé de production et pour le site ou une partie de celui-ci
- quantifier des indicateurs d'énergie spécifique, enregistrer la manière dont ils sont définis et les actualiser, en notant tous les changements survenus au fil du temps (comme dans les produits, les équipements).

1.3.5 Importance des systèmes et des limites des systèmes

La meilleure efficacité énergétique d'un site n'est pas toujours égale à la somme de l'efficacité énergétique optimale des parties qui le composent, si elles sont toutes optimisées séparément. En réalité, si chaque procédé est optimisé indépendamment des autres procédés du site, on risque, par exemple, de produire sur ce site un excès de vapeur qu'il faudra ventiler. Dans le cas d'une intégration des unités, il est possible de faire un bilan de la production de vapeur : les opportunités d'utilisation des sources de chaleur d'un procédé comme apport thermique dans un autre procédé peuvent alors se traduire par une baisse des consommations d'énergie sur le site

dans son ensemble. Il est donc possible d'obtenir des synergies si l'on étudie (dans l'ordre suivant) :

1. Le site dans son ensemble, et la manière dont les divers systèmes et/ou unités sont reliés entre eux (par exemple compresseurs et chauffage). À cette fin, il peut même être envisagé de désoptimiser l'efficacité énergétique d'un ou de plusieurs procédés/unités de production afin d'atteindre l'efficacité énergétique optimale du site dans son ensemble. L'efficacité d'utilisation des procédés, unités, utilités ou activités associées, y compris si elles sont appropriées dans leurs formes actuelles, doit être évaluée.
2. Puis, l'optimisation des divers systèmes et/ou unités (par ex. système à air comprimé (CAS), système de refroidissement, système vapeur).
3. Finalement, l'optimisation du reste des parties qui le composent (par ex. moteurs électriques, pompes, vannes).

Pour comprendre l'importance de la prise en compte du rôle des systèmes dans l'efficacité énergétique, il est capital de comprendre comment la définition d'un système et de ses limites va avoir une influence sur l'obtention d'une efficacité énergétique. Cet aspect est présenté dans la Section 1.5.1 et dans la Section 2.2.2.

En outre, si l'on élargit les limites à l'extérieur des activités d'une société, et si l'on intègre la production et la consommation énergétique industrielle aux besoins de la communauté à l'extérieur du site, il est possible d'accroître davantage l'efficacité énergétique totale, par exemple, en fournissant une énergie de faible valeur à des fins de chauffage dans le voisinage, par exemple en cogénération, voir Section 3.4.

1.3.6 Autres termes importants connexes

Les autres termes utilisés se trouvent dans le Glossaire, à l'Annexe 7.1 ou dans des textes standard.

1.3.6.1 Énergie primaire, énergie secondaire et énergie finale

L'énergie primaire est l'énergie contenue dans les matières combustibles primaires (c'est-à-dire les ressources naturelles avant un quelconque traitement), y compris les déchets combustibles et toutes les autres formes d'énergie alimentant un système en entrée. Le concept est utilisé en particulier dans les statistiques énergétiques dans le cadre de la compilation des bilans énergétiques.

Les énergies primaires sont transformées dans des procédés de transformation de l'énergie en formes d'énergie plus pratiques, telles que l'énergie électrique, la vapeur et des combustibles plus propres. Dans les statistiques énergétiques, ces formes d'énergie consécutives à une transformation sont appelées « énergie secondaire ». L'énergie finale est l'énergie telle qu'elle est reçue par les utilisateurs et ce peut être de l'énergie primaire et de l'énergie secondaire (par ex. utilisation dans une installation du gaz naturel comme énergie primaire et de l'électricité comme énergie secondaire). La relation est expliquée sur la Figure 1.6.

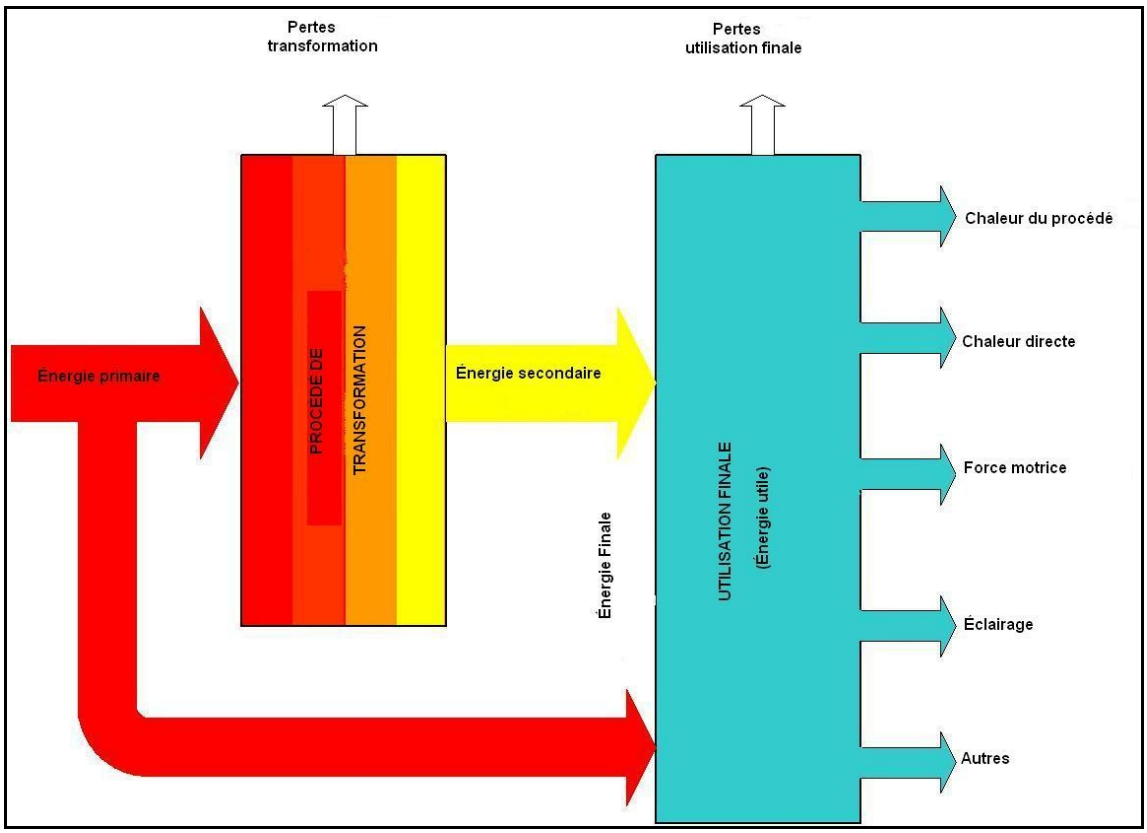


Figure 1.6 : Définition des énergies primaire, secondaire et finale
[260, TWG, 2008]

L'utilisation de l'énergie primaire et de l'énergie secondaire est illustrée dans la Section 1.4.2.1. Si l'on compare les différents vecteurs énergétiques (par exemple vapeur et/ou chaleur générées dans l'installation à partir de matières premières combustibles par comparaison avec l'électricité produite en externe et fournie par l'intermédiaire d'un réseau national), il est important de tenir compte des inefficacités de(s) vecteur(s) énergétique(s) externe(s). Sinon, le vecteur externe peut sembler beaucoup plus efficace comme dans l'exemple de la Section 1.4.2.1.

Exemples de vecteurs énergétiques susceptibles d'être fournis à partir de l'extérieur de l'unité ou de l'installation.

- **Électricité :** l'efficacité varie en fonction du combustible et de la technologie, voir [125, EIPPCB]. Pour les centrales à vapeur classiques, l'efficacité de la production d'électricité à partir de matières combustibles primaires varie entre 36 et 46 %. Pour la technologie à cycle combiné, l'efficacité est comprise entre 55 et 58 %. Avec la cogénération (centrale de production combinée de chaleur et d'électricité, CHP, voir Section 3.4), l'efficacité totale pour l'électricité et la chaleur peut atteindre 85 % ou plus. Pour l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables, l'efficacité est calculée sur une base différente.

- **Vapeur :** la valeur énergétique de la vapeur peut être définie comme $\frac{h_s - h_w}{\eta_b}$

où : h_s = enthalpie de la vapeur
h_w = enthalpie de l'eau d'alimentation de la chaudière (après désaération)
η_b = efficacité thermique de la chaudière.

Toutefois, cette évaluation est trop restreinte. En principe, les entrées d'énergie suivantes doivent aussi être incluses lorsqu'on définit la valeur énergétique de la vapeur :

- Système à vapeur, par exemple :
  - Chaleur ajoutée à l'eau d'alimentation de la chaudière pour l'amener à la température du désaérateur
  - Vapeur vaporisée dans le désaérateur pour éliminer l'oxygène de l'eau d'alimentation de la chaudière

- Auxiliaires, par exemple :
  - énergie requise pour pomper l'eau d'alimentation de la chaudière jusqu'à la pression de service de la chaudière
  - énergie consommée par le ventilateur fournissant une ventilation forcée à la chaudière.

Il y a d'autres facteurs à prendre en compte, tels que les services annexes, etc. Il convient de décrire clairement la méthode servant à définir l'énergie primaire de la vapeur dans la procédure de calcul des indicateurs d'efficacité énergétique et dans les repères énergétiques. Il est important que tout le monde utilise la même base de calcul de l'énergie primaire de la vapeur, voir Section 3.2.1, dans laquelle des normes sont données pour calculer les rendements des chaudières [249, TWG, 2007, 260, TWG, 2008].

Il existe d'autres utilités à prendre en considération de manière similaire, notamment :

- air comprimé : voir Section 3.7
- eau chaude
- eau de refroidissement : voir Section 3.4.3.

D'autres entrées ne peuvent être considérées comme des « utilités » au sens classique du terme. Toutefois, elles peuvent être produites sur le site ou à l'extérieur du site, et/ou l'utilisation qui en est faite et leur effet sur la consommation d'énergie peut-être considérable. Par exemple :

- azote : voir Section 3.7 sur l'air comprimé et la génération d'azote de faible qualité en N_2
- oxygène : lorsqu'il est utilisé dans une combustion, il peut se prévaloir d'accroître l'efficacité de la combustion. Toutefois, si l'énergie consommée pour la production de l'oxygène est prise en compte, une oxy-combustion peut utiliser la même quantité d'énergie voire davantage que celle économisée dans le procédé de combustion, en fonction du four, même si elle présente l'avantage significatif de réduire les émissions de NO_x, voir Section 3.1.6 [156, Beerkens, 2004, 157, Beerkens R.G.C. , 2006].

Toutefois, le calcul des énergies en tant qu'énergie primaire prend du temps (même s'il est facile d'automatiser sur une feuille de calcul les calculs répétitifs dans une situation donnée) et n'est pas exempt de problèmes d'interprétation. Par exemple, une nouvelle installation équipée des technologies les plus efficaces au plan énergétique peut être exploitée dans un pays où les systèmes de génération et distribution d'électricité sont dépassés. Si la faible efficacité des systèmes de production et de distribution d'électricité domestique est prise en compte, l'indicateur d'efficacité énergétique de l'installation comparé à des installations similaires dans d'autres pays peut être médiocre [127, TWG]. Par ailleurs, différentes sources d'électricité ont des efficacités de génération différentes et les parts relatives des différentes sources d'énergie varient en fonction des pays. Ce problème peut être surmonté en utilisant des valeurs standard, telles que la ventilation européenne des différentes sources d'énergie, voir Annexe 7.16. Toutefois, il existe d'autres indicateurs, comme par exemple un bilan carbone, qui permettent de rendre compte de la production du vecteur d'énergie secondaire et des effets croisés, en fonction des circonstances locales.

Depuis le 1er juillet 2004, la directive 2003/54/CE[14] a instauré une divulgation de l'information sur les parts relatives des différentes sources d'énergie (contribution de chaque source d'énergie à la totalité des sources utilisées par les fournisseurs d'électricité). La présentation exacte des

[14] Directive 2003/54/CE, 26 Juin 2003, concernant les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité, abroge la directive 96/92/CE

données fournies est à la discrétion des États membres de l'UE : http ://europa.eu/eur-lex/pri/en/oj/dat/2003/l_176/l_17620030715en00370055.pdf

La note de la Commission européenne sur cette mise en œuvre peut être consultée à l'adresse suivante :
http ://ec.europa.eu/énergie/electricity/legislation/doc/notes_for_implementation_2004/labelling_en.pdf

La directive sur la promotion de la cogénération et les lignes directrices s'y rapportant, précise les valeurs de référence de la production d'électricité et de chaleur (vapeur), y compris des facteurs de correction en fonction des implantations géographiques. La directive précise également la méthodologie permettant de déterminer le rendement du procédé de cogénération.

Il existe d'autres sources de données, notamment celles concernant les répartitions nationales des différentes sources d'énergie : http ://www.berr.gov.uk/énergie/policy-strategy/consumer-policy/fuel-mix/page21629.html

Au lieu de rapporter toutes les énergies à l'énergie primaire, il existe une autre solution consistant à calculer la consommation d'énergie spécifique (SEC) en tant que vecteurs énergétiques-clés : par exemple, dans la Section 6.2.2.4, page 338, du BREF sur l'industrie papetière [125, EIPPCB], les données citées concernant la demande totale en énergie (consommation) sous forme de chaleur (vapeur) et d'électricité pour une usine de production de papier fin non intégrée [276, Agency, 1997] sont les suivantes :

- chaleur du procédé : 8 GJ/t (≈ 2222 kWh/t)
- électricité : 674 kWh/t.

En d'autres termes la consommation s'élève à environ 3 MWh d'électricité et de vapeur par tonne de produits. Si l'on considère la demande en énergie primaire pour la conversion des combustibles fossiles en électricité, la quantité totale nécessaire est de 4 MWh par tonne de papier. Cela suppose un rendement du générateur d'électricité de 36,75 % pour l'énergie primaire. Dans ce cas, la consommation d'électricité de 674 kWh/t correspond à une énergie primaire de 1852 kWh/t (par ex. charbon).

En règle générale, l'énergie primaire peut être utilisée :

- pour établir des comparaisons avec d'autres unités, systèmes, sites à l'intérieur des secteurs, etc.
- lors de la réalisation d'un audit visant à optimiser l'efficacité énergétique et lors de la comparaison des différents vecteurs énergétiques alimentant des unités ou des installations spécifiques (voir Sections 1.4.1 et 1.4.2).

L'énergie primaire calculée sur une base locale (ou nationale) peut servir à des fins de comparaisons spécifiques de site, par exemple :

- si l'on cherche à comprendre les effets locaux (ou nationaux), notamment lorsqu'on compare des installations en différents points d'un secteur ou d'une société ;
- lors de la réalisation d'audits visant à optimiser l'efficacité énergétique et lors de la comparaison de différents vecteurs énergétiques alimentant des unités ou des installations spécifiques (voir Sections 1.4.1 et 1.4.2). Par exemple, si l'on envisage de remplacer une turbine à vapeur par un moteur électrique, il serait optimal d'utiliser le facteur d'efficacité de la production électrique du pays.

L'énergie primaire calculée sur une base régionale (par ex. répartition de l'énergie par sources dans l'UE) peut être utilisée pour :

- la surveillance des activités, des unités ou des installations sur une base régionale, par exemple un secteur industriel.

L'énergie secondaire ou finale peut être utilisée pour :

- surveiller une situation définie en cours
- surveiller l'efficacité des sites et des secteurs industriels, en étant calculée sur la base de vecteurs énergétiques.

Dans la Section 1.4.1, l'énergie finale (ou secondaire) peut-être utilisée afin de comparer les installations dans différents pays, et cela constitue la base des exigences énergétiques spécifiques données dans certains BREF verticaux (par exemple voir le BREF PP). Inversement, l'énergie primaire peut être utilisée pour exprimer les efficacités globales au niveau national (par exemple pour évaluer les différentes efficacités des secteurs industriels dans différents pays).

Il est à remarquer que la commission (dans DG-JRC IPTS Energy) et le tableau intergouvernemental sur le réchauffement climatique (IPCC) ont cité à la fois les valeurs primaires et secondaires dans leur rapport à des fins de clarté [158, Szabo, 2007].

1.3.6.2 Pouvoirs calorifiques et rendements énergétiques

En Europe, l'énergie utilisable contenue dans un combustible se calcule généralement au moyen de la valeur de chauffage inférieure (LHV), du pouvoir calorifique inférieur (PCI) ou du pouvoir calorifique net de ce combustible, à savoir mesure de la quantité chaleur libérée par la combustion (oxydation) du combustible, dans des conditions telles que la vapeur d'eau formée demeure à l'état gazeux et ne soit pas condensée en eau liquide. Cette pratique s'explique par les conditions réelles d'une chaudière où la vapeur d'eau ne refroidit pas en dessous de son point de rosée, et la chaleur latente n'est pas disponible pour faire de la vapeur.

Aux États-Unis et dans le reste du monde, on utilise la valeur de chaleur supérieure (HHV), le pouvoir calorifique supérieur (PCS) ou pouvoir calorifique brut, qui comprend la chaleur latente pour condenser la vapeur d'eau, et par conséquent, avec les paramètres pouvoir calorifique supérieur, le rendement ne peut être supérieur au maximum thermodynamique de 100 %. Le PCS_{sec} est le pouvoir calorifique supérieur d'un combustible ne contenant ni eau ni vapeur d'eau et le PCS_{humide} est le pouvoir calorifique supérieur d'un combustible ayant une certaine teneur en eau.

Toutefois, lorsqu'on utilise comme valeur de référence le pouvoir calorifique inférieur (PCI) ou pouvoir calorifique net au lieu du pouvoir calorifique supérieur (PCS), une chaudière à condensation peut donner l'impression d'avoir un rendement de « chauffage » supérieur à 100 %, ce qui est contraire à la première loi de la thermodynamique.

Il est important de tenir compte de ces éléments lorsqu'on compare des données exprimant des pouvoirs calorifiques, qui ont établies aux États-Unis et en Europe. Toutefois, si ces valeurs sont utilisées dans des rapports comme les indicateurs d'efficacité énergétique (EEI), la différence peut se trouver à la fois dans le numérateur et le dénominateur et s'annuler. Certains pouvoirs calorifiques supérieurs (PCS) et pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) indicatifs sont présentés dans le tableau 1.1, et on peut observer que le rapport du PCI_{humide} au PCS_{humide} varie de 0,968 à 0,767. Il est à remarquer que les rapports PCS/PCI varient en fonction de la source, du temps, etc.

Combustible	Teneur en humidité (% base humide)	Teneur en hydrogène (kg_H/kg_{fuel})	PCS_{sec} (MJ/kg)	PCS_{humide} (MJ/kg)	PCI_{sec} (MJ/kg)	PCI_{humide} (MJ/kg)	Rapport de PCI_{humide} / PCS_{humide} (-)
Charbon bitumineux	2	4,7	29,6	29,0	28,7	28,1	0,968
Gaz naturel 1 (Urégnol, Russie)	0		54,6	54,6	49,2	49,2	0,901
Gaz naturel 2 (Kansas, EU)	0		47,3	54,6	42,7	42,7	0,903
Fioul lourd	0,3	10,1	43,1	43,0	40,9	40,8	0,949
Fioul domestique	0,01	13,7	46,0	46,0	43,0	43,0	0,935
Écorce de pin non séchée	60	5,9	21,3	8,5	20	6,5	0,767
Écorce de pin séchée	30	5,9	21,3	14,9	20	13,3	0,890
Gaz naturel 1 : CH_4 (97,1vol- %), C_2H_6 (0,8 %), C_3H_8 (0,2 %), C_4H_{10} (0,1 %), N_2 (0,9 %), CO_2 (0,1 %) Gaz naturel 2 : CH_4 (84,1vol- %), C_2H_6 (6,7 %), C_3H_8 (0,3 %), C_4H_{10} (0,0 %), N_2 (8,3 %), CO_2 (0,7 %)							

Tableau : Pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur indicatifs pour divers combustibles [153, Wikipedia]

1.3.6.3 Gestion côté offre et côté demande

Le « côté offre » fait référence à la fourniture, la transmission et la distribution de l'énergie. La stratégie et la gestion de la fourniture d'énergie à l'extérieur d'une installation est hors du champ d'application de la directive IPPC (bien que l'activité de la production d'électricité soit couverte comme défini à l'Annexe 1(1.1) de la directive). Il convient de noter que dans une installation où est générée de l'électricité ou de la chaleur dans le cadre d'un service auxiliaire ou d'un procédé associé, la fourniture de cette énergie à une autre unité ou à un autre procédé au sein de l'installation peut être considérée comme faisant partie du « côté offre ».

La gestion « côté demande » signifie une gestion de la demande énergétique d'un site, et une part importante de la littérature traitant des techniques d'efficacité énergétique fait référence à cette question. Toutefois, il est important de remarquer que celle-ci a deux composantes : le coût de l'énergie par unité et la quantité d'unités énergétiques utilisées. Il est primordial d'identifier la différence entre l'amélioration de l'efficacité énergétique en termes économiques et en termes d'énergie physique (cette différence est expliquée de manière plus détaillée à l'Annexe 7.11).

1.4 Indicateurs de l'efficacité énergétique dans l'industrie

1.4.1 Introduction : définition des indicateurs et d'autres paramètres

Le principal objectif des indicateurs est de contribuer à une auto-analyse et à une surveillance ainsi que de faciliter la comparaison de l'efficacité énergétique des unités, des activités ou des installations. Alors que l'Équation 1 et l'Équation 5 semblent simples, il existe des points apparentés qui doivent être définis et avoir fait l'objet d'une décision avant d'utiliser les indicateurs, en particulier pour comparer un procédé de production à un autre. Les points à définir sont, par exemple, les limites du procédé, les limites du système, les vecteurs énergétiques et la manière de comparer différents combustibles et les différentes sources de combustibles (et s'il s'agit de sources internes ou externes). Lorsque ces facteurs ont été définis pour une usine spécifique ou pour une analyse comparative inter-site, ils doivent être respectés.

La présente section étudie comment définir l'efficacité énergétique et des indicateurs pour des procédés/unités/sites de production industrielle individuels. Elle en précise les éléments pertinents et la manière de les appréhender afin de mesurer et d'évaluer les changements en termes d'efficacité énergétique.

Il est problématique d'acquérir la certitude que les données provenant d'unités ou de sites distincts sont vraiment comparables, et si c'est le cas, de déterminer s'il est possible d'en tirer des conclusions sur l'économie d'un site, qui pourraient avoir une incidence sur la confidentialité et la compétitivité. Ces questions ainsi que l'utilisation de ces indicateurs sont traités dans la Section 2.16, Analyse comparative.

La Section 1.3.3 fait ressortir que les indicateurs peuvent être fondés sur les rapports les plus appropriés, en fonction du procédé, par exemple GJ/tonne, GJ/unité produite, énergie produite/énergie importée (pour les industries de production d'énergie), énergie/m^2 (par exemple dans le revêtement des bobines, la production automobile), énergie/employé, etc.

1.4.2 Efficacité énergétique dans les unités de production

Les deux exemples ci-après illustrent les concepts de consommation d'énergie spécifique (SEC) et d'indicateur d'efficacité énergétique (EEI), et mettent en évidence des questions d'interprétation-clé.

1.4.2.1 Exemple 1. Cas simple

La Figure 1.7 représente un exemple d'une unité[15] de production simple. Pour la simplicité, le procédé est représenté avec des exportations d'énergie et avec un seul stock d'alimentation et un seul produit. Le procédé de production utilise de la vapeur, de l'électricité et du combustible.

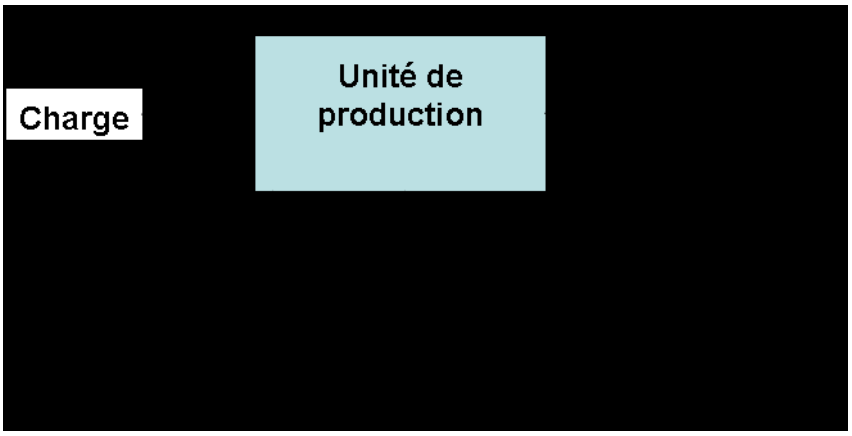


Figure 1.7 : Vecteurs énergétiques dans une production simple

La consommation d'énergie spécifique (SEC) de ce procédé est obtenue par :

$$SEC = \frac{E_{s,in} + E_{e,in} + E_{f,in}}{P}$$ **Équation 0.**

Où :

$E_{s,in}$ = énergie fournie au procédé par le biais de vapeur pour produire une quantité de produits P
$E_{e,in}$ = énergie fournie au procédé par le biais d'électricité pour produire une quantité de produits P

$E_{f,in}$ = énergie fournie au procédé par le biais d'un combustible pour produire une quantité de produits P
P = quantité de produits P

Dans l'Équation 1.4, il est indispensable que les divers vecteurs énergétiques (flux d'énergie) soient exprimés en tant qu'**énergie primaire** et sur la même base (voir Section 1.3.6.1). Par exemple, il faut beaucoup plus d'énergie pour produire 1 MWh d'électricité que pour produire 1 MWh de vapeur, car l'électricité est, en principe, générée avec un rendement de 35 à 58 % et la vapeur avec un rendement de 85 à 95 %. L'utilisation énergétique des différents vecteurs énergétiques dans l'Équation 1.4 doit par conséquent être exprimée en énergie primaire. Ceci inclut l'efficacité pour produire ce vecteur énergétique.

Un exemple de calcul de rendement énergétique : supposons que pour produire 1 tonne de produit P1, il faille utiliser les vecteurs énergétiques suivants :

- 0,01 tonne de combustible
- 10 kWh d'électricité
- 0,1 tonne de vapeur.

Si l'on suppose ce qui suit[15] :

- Pouvoir calorifique inférieur du combustible = 50 GJ/tonne
- Rendement de la production d'électricité = 40 %
- La vapeur est générée à partir d'eau à 25 °C et la différence entre l'enthalpie de la vapeur et l'enthalpie de l'eau à 25 °C = 2,8 GJ/tonne
- La vapeur est générée avec un rendement de 85 %.

Pour produire 1 tonne de produit P1, la consommation d'énergie est (après conversion en GJ) :

- $E_{f,in}$ = 0,01 tonne de combustible x 50 GJ/tonne = 0,50 GJ
- $E_{e,in}$ = 10 kWh x 0,0036 GJ/kWh x 100/40 = 0,09 GJ (où 1 kWh = 0,0036 GJ)
- $E_{s,in}$ = 0,1 tonne de vapeur x 2,8 GJ/tonne x 1/0,85 = 0,33 GJ.

La SEC de ce procédé est ensuite donnée par :

- SEC = (0,50 + 0,09 + 0,33) GJ/tonne = 0,92 GJ/tonne.

Pour déterminer l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI), supposons qu'il s'agit de la consommation d'énergie spécifique de référence ($SEC_{réf}$). Supposons ensuite que l'usine planifie un certain nombre de projets d'amélioration de l'efficacité énergétique, de telle sorte qu'une année plus tard, la consommation énergétique du procédé de production soit de :

- 0,01 tonne de combustible
- 15 kWh d'électricité
- 0,05 tonne de vapeur.

Par suite de ces projets d'amélioration de l'efficacité énergétique, la nouvelle valeur SEC du procédé est :

- SEC = (0,5 + 0,135 + 0,165) GJ/tonne = 0,8.

L'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) de ce procédé est alors :

[15] Les chiffres sont fournis à titre d'illustration uniquement, et risquent de ne pas être totalement justes. Aucune valeur de pression n'est indiquée pour la vapeur, mais on peut supposer qu'elle est identique dans les deux parties de l'exemple. Une analyse exergétique serait davantage utile, mais elle va au-delà de cet exemple simple.

- EEI = 0,92/0,8 = 1,15.

Ce résultat indique que le rendement énergétique du procédé de production a augmenté de 15 %.

Il est important de remarquer que les inefficacités (pertes) de la production d'électricité dans ce cas ont été internalisées (en utilisant l'énergie primaire : ces inefficacités sont réellement extérieures au site). Si cela n'est pas pris en compte, l'énergie électrique en entrée semble être de 50 % plus efficace qu'elle ne l'est en réalité :

$$\frac{(0{,}09 - 0{,}036)}{0{,}036} = 1{,}5;\ \text{i.e.}150\ \%$$

Lorsqu'on ignore l'énergie primaire, on peut aboutir, par exemple, à des décisions de commuter d'autres entrées d'énergie en électricité. Toutefois, il faudrait procéder à une analyse beaucoup plus complexe bien au-delà du présent exemple pour déterminer la quantité d'énergie utile disponible dans l'application des sources, telle qu'une analyse exergétique.

Cet exemple montre qu'il est primordial de connaître les bases de calcul de la consommation d'énergie spécifique (SEC) et de l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI).

Il convient aussi de remarquer que la même logique s'applique à d'autres utilités qui peuvent être introduites dans l'unité/le procédé/l'installation à partir de l'extérieur des limites (plutôt que produites à l'intérieur des limites), comme de la vapeur, de l'air comprimé, de l'azote, etc. (voir énergie primaire, Section 1.3.6.1).

1.4.2.2 Exemple 2. Cas type

La Figure 1.8 traite d'un cas plus compliqué, qui comprend à la fois une exportation d'énergie et un recyclage interne du combustible ou de l'énergie. Ce cas illustre des principes qui sont applicables à de nombreuses industries, sous couvert de quelques ajustements adaptés.

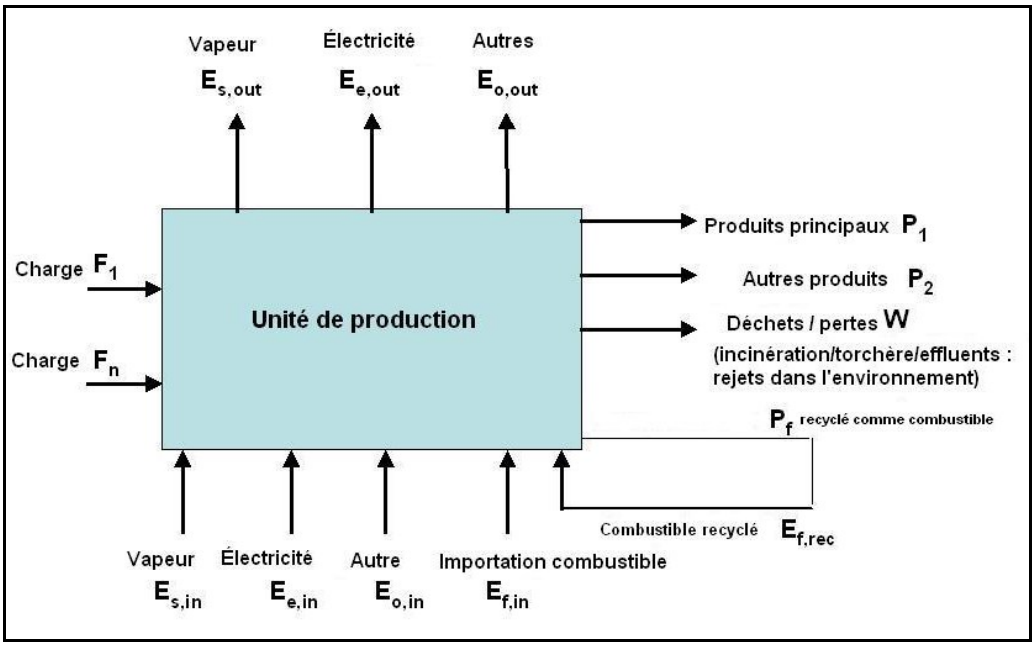


Figure 1.8 : Vecteurs énergétiques d'une unité de production

$$SEC = \frac{(E_{s,in} + E_{e,in} + (E_{f,in} + E_{f,rec}) + E_{o,in}) - (E_{s,out} + E_{e,out} + E_{o,out})}{P_1}$$

Équation 1.4

Cette formule générique peut être appliquée à chaque procédé/unité/installation de production, mais ses divers composants doivent être adaptés à chaque procédé/unité/site de production spécifique. L'unité de cet indicateur est (unité d'énergie)/(unité de masse) habituellement GJ/t de produit ou MWh/t de produit. Toutefois, il peut y avoir plusieurs produits, ou un produit principal et des sous-produits significatifs.

Certains éléments à prendre en compte lorsqu'on applique l'Équation 1.4 sont décrits dans les six points ci-après (dont certains sont applicables à l'Équation 1.4) :

1. Flux de charge d'alimentation/produit (F_{1-n}, P_1)

Sur la Figure , le débit massique des matières premières et des produits est représenté dans le sens horizontal. Les charges F_1 à F_n (F_{1-n}) représentent les différentes matières premières utilisées pour produire les principaux produits P_1 et les sous-produits. Ces sous-produits sont divisés en deux fractions : une fraction qui est recyclée en tant que combustible (P_f) et une fraction correspondant au reste des sous-produits (P_2).

Exemples d'une telle situation :

- les vapocraqueurs d'éthylène de l'industrie pétrochimique, où la consommation d'énergie peut être exprimée en GJ par tonne d'éthylène, en GJ par tonne d'oléfines (éthylène + propylène) ou en GJ par tonne de produits chimiques à valeur élevée (oléfines + butadiène + benzène + hydrogène pur)
- dans le secteur du chlore-alcalin où les consommations d'énergie sont habituellement liées aux tonnes of Cl_2 produites (produit principal), et où H_2 et NaOH sont des sous-produits.

2. Vecteurs énergétiques (flux d'énergie) (E_{in})

Les vecteurs énergétiques montrent les différents types de flux d'énergie entrant et sortant de l'unité. L'énergie importée et l'énergie exportée pour être utilisée ailleurs sont présentées dans le plan vertical sur la Figure 2.2. Les vecteurs énergétiques suivants sont pris en compte :

- E_s = vapeur et/ou eau chaude
- E_e = électricité vers le procédé
- E_f = combustible (gaz, liquide, solide). Une séparation est opérée entre le combustible acheté en externe E_f et le combustible qui est recyclé en interne dans le procédé $E_{f,rec}$. Remarque : si un combustible est produit en tant que produit pour une utilisation hors du site, il est considéré comme P_1 ou P_2 (non comme $E_{f,\,out}$), voir point 5, ci-dessous
- E_o = autre : à savoir toute utilité (service auxiliaire) qui nécessite une production d'énergie. À titre d'exemple, on peut citer l'huile, l'eau chaude, l'eau de refroidissement, l'air comprimé et N_2 (lorsqu'ils sont traités sur site). Cette eau de refroidissement nécessite de l'énergie pour sa production (l'énergie nécessaire pour actionner les pompes de circulation de l'eau de refroidissement et les ventilateurs sur les tours de refroidissement).

Il est important de ne comptabiliser, du côté sortie, que les vecteurs énergétiques utilisés de manière avantageuse dans un procédé ou dans une unité d'un autre procédé. En particulier, l'énergie associée au refroidissement du procédé par l'eau de refroidissement ou l'air de refroidissement ne doit jamais être incluse en tant que « énergie en sortie » dans l'Équation 1.5. L'énergie servant à alimenter différentes utilités et d'autres systèmes associés doit également être prise en compte : par exemple, pour l'eau de refroidissement (actionnement des pompes et des ventilateurs), l'air comprimé, la production de N_2, le traçage vapeur, la vapeur alimentant des turbines. Les autres pertes calorifiques dans l'air ne doivent jamais être comptabilisées

comme étant des sorties d'énergie utile. Les sections du Chapitre 3 relatives à ces systèmes auxiliaires présentent davantage de données sur leurs rendements et leurs pertes.

3. Différents niveaux de vapeur (E_s) (et niveaux d'eau chaude)

Une centrale de production peut utiliser plusieurs types de vapeur (pressions et/ou températures différentes). Chaque niveau de vapeur ou d'eau peut devoir produire son propre facteur de rendement. Chacun de ces niveaux de vapeur doit être inclus dans le terme E_s en totalisant leurs exergies [127, TWG]. Voir vapeur, dans la Section 3.2.

L'eau chaude, si on en utilise (ou si une autre centrale en produit et en utilise) doit être traitée de la même manière.

4. Flux de matières de type déchets (W) et pertes énergétiques

Chaque procédé génère également une quantité de déchets et de pertes énergétiques. Ces déchets peuvent être solides, liquides ou gazeux et :

- éliminés en décharge (solides uniquement)
- incinérés avec ou sans valorisation énergétique
- utilisés en tant que combustible (P_f)
- recyclés.

La pertinence de ce flux de déchets sera analysée de manière plus détaillée dans la Section 1.5.2.3.

Des exemples de pertes énergétiques rencontrées dans les centrales à combustion sont :

- gaz de combustion
- pertes calorifiques par rayonnement à travers les parois de l'installation
- chaleur du laitier et des cendres volantes
- chaleur et carbone non oxydé dans les matières non brûlées

5. Combustible ou produit ou déchet (E_0, P_f)

Sur la Figure 1.8, le combustible n'est pas représenté comme un vecteur énergétique exporté. La raison en est que ce combustible (P_1 ou P_2, ou pouvant être considéré comme E_f) est considéré comme un produit plutôt que comme un porteur d'énergie et que la valeur combustible, qui devrait être attribuée à ce combustible, est déjà prise en compte dans la charge alimentant l'unité de production. Il s'agit d'une convention standard utilisée dans les raffineries et dans l'industrie chimique.

D'autres industries peuvent appliquer des pratiques différentes. Par exemple, dans l'industrie du chlore-alcali, certains exploitants comptabilisent le H_2 (un sous-produit du Cl_2 et de NaOH produit) comme un vecteur énergétique, indépendamment du fait que ce H_2 soit par la suite utilisé en tant que produit chimique ou en tant que combustible (le H_2 brulé n'est pas comptabilisé).

Il est, par conséquent, important d'établir les règles permettant de définir une efficacité énergétique spécifique d'un secteur industriel donné, notamment les charges d'alimentation, les produits, les porteurs énergétiques importés et les porteurs énergétiques exportés. Voir aussi valorisation des déchets et des gaz de torchère, Section 1.5.2.3.

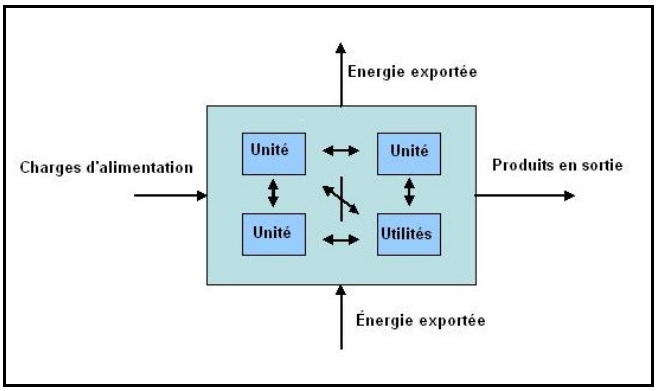
6. Valeur mesurée ou estimée

L'Équation 1.4 suppose que les différents vecteurs énergétiques du procédé de production sont connus. Toutefois, pour un procédé de production type, certains paramètres, par exemple les différentes consommations des utilités (par ex. eau de refroidissement, azote, traçage vapeur, vapeur alimentant une turbine, électricité) ne sont pas toujours mesurées. Souvent, seules les consommations des principales utilités du procédé de production sont mesurées

individuellement afin de contrôler le procédé (par ex. vapeur alimentant un rebouilleur, combustible alimentant un four). La consommation d'énergie totale est ensuite égale à la somme des nombreux éléments individuels « contributeurs », dont certains sont mesurés et d'autres sont « estimés ». Les règles d'estimation doivent être définies et documentées d'une manière transparente. Voir les Sections 1.5 et 2.10.

1.4.3 Efficacité énergétique d'un site

Les sites de production complexes exploitent plus d'un procédé/unité de production. Pour définir l'efficacité énergétique d'un site dans son ensemble, il faut le diviser en unités plus petites, qui contiennent des unités-procédé et des unités-utilité. Les vecteurs énergétiques autour d'un site de production peuvent être représentés schématiquement comme sur la Remplacer « Energie exportée » du bas par « Energie importée »
Figure .



Remplacer « Energie exportée » du bas par « Energie importée »

Figure 1.9 : Entrées et sorties d'un site

Un site de production fabrique différents types de produits, ayant chacun leur propre facteur d'intensité énergétique. Il n'est donc pas toujours facile de définir un indicateur d'efficacité énergétique significatif pour un site. L'indicateur peut être exprimé comme :

$$EEI = \frac{\sum_{i-unités} Pi,j * SEC_{refj}}{\text{Énergie utilisée par le site sur la période concernée}}$$

Où : $P_{i,j}$ = la somme des produits issus des unités
SEC_{refj} = la consommation d'énergie spécifique de référence pour les produits j

Cette formule est identique à celle mentionnée dans la Section 1.3.3, point (3). La seule différence est que dans la Section 1.3.2, la formule concerne différents produits fabriqués dans une ligne de production, tandis qu'ici (dans la Section 1.4.3), elle concerne différents produits fabriqués sur des lignes de produits différentes.

Utilités
Lorsque l'on divise les sites de production en unités de production (voir Section 2.2.2), le centre d'utilité doit être pris en compte d'une manière comptable. Lorsque le centre d'utilité produit des utilités pour plusieurs unités de production, il est habituellement considéré comme une unité de production séparée (indépendante). De manière identique, l'utilité peut être fournie par un autre exploitant, par exemple voir les Société de services énergétiques (ESCO), Section 7.12.

La section utilités peut elle-même être divisée en plusieurs sections : par exemple, une partie liée au stockage et à la zone de chargement/déchargement, une partie liée aux utilités chaudes (par exemple, vapeur, eau chaude) et une partie liée aux utilités froides (eau de refroidissement, N_2, air comprimé). La Section 1.5 analyse le calcul des vecteurs énergétiques provenant des utilités, dans la présentation de l'énergie primaire et secondaire.

L'équation ci-après doit toujours être testée :

Énergie utilisée par le site = $\sum_{i=unités} SEC_i 1 * P_i$ + énergie utilisée par la section utilités

Où :

$\sum_{i=unités} SEC_i$ = la somme des valeurs SEC pour unités i

Différentes agrégations d'unités dans différents sites

Le cas des appareils d'hydrogénation du pétrole dans un vapocraqueur est un exemple. Le pétrole est un coproduit d'un vapocraqueur (donc est comptabilisé dans P_2 plutôt que dans P_1 sur la Figure 1.8). Avant de pouvoir être ajouté aux produits pétroliers, il doit, toutefois, faire l'objet d'un traitement d'hydrogénation pour saturer les oléfines et les dioléfines présentes et pour éliminer les composants à base de soufre. La plupart des exploitants considèrent l'appareil d'hydrogénation du pétrole comme une unité séparée du vapocraqueur. Toutefois dans certains sites, l'appareil d'hydrogénation du pétrole est intégré au vapocraqueur de sorte qu'il est quelquefois inclus dans la limite du système du vapocraqueur à des fins de simplification. Il n'est donc pas surprenant que les vapocraqueurs incluant l'appareil d'hydrogénation du pétrole dans leur limite système, aient tendance à avoir des consommations d'énergie supérieures à ceux ne les incluant pas. Il va de soi que cela n'implique aucunement que leur efficacité énergétique est moindre.

Il ressort de ce qui précède que, pour la mise en œuvre d'une gestion de l'énergie à l'intérieur d'un site, il est indispensable de :

- diviser le site selon ses unités de production, en incluant la limite système exacte des unités de production en question (voir également Section 1.5, ci-dessous). Le fractionnement d'un site en unités de production dépend de la complexité du site et doit être décidé au cas par cas par l'exploitant responsable
- définir clairement les flux énergétiques en entrée et en sortie du site et entre les différentes unités de production (représentées par les unités sur la Figure 1.9)
- conserver cette définition des limites sauf lorsque des changements sont imposés ou provoqués, par exemple par des changements de production et/ou d'utilité ; ou par une mutation sur une orientation de base différente ayant fait l'objet d'un accord au niveau de l'installation, de la société ou du secteur.

Ainsi, peut-on définir clairement la manière dont l'efficacité énergétique d'un procédé de production donné est calculée.

1.5 Éléments à prendre en compte pour définir des indicateurs d'efficacité énergétique

La Section 1.3 analyse comment définir l'efficacité énergétique et met en évidence les points importants s'y rapportant, tels que l'énergie primaire et secondaire. La présente section introduit également le concept de l'efficacité énergétique pour les utilités et/ou les systèmes. Les Sections 1.4.2 et 1.4.3 présentent comment établir des indicateurs d'efficacité énergétique pour une unité de production et pour un site selon une approche par le haut, et étudient les problèmes rencontrés.

Dans cette partie :

- La Section 1.5.1 décrit l'importance de la définition des bonnes limites des systèmes pour optimiser l'efficacité énergétique. Elle étudie les impacts relatifs de l'efficacité énergétique des systèmes et des composants qui s'y rapportent selon une approche par le bas.
- La Section 1.5.2 décrit d'autres points importants devant être pris en compte par l'exploitant et dont il faut tenir compte dans la définition de l'efficacité énergétique et des indicateurs.

1.5.1 Définition de la limite des systèmes

[5, Hardell and Fors, 2005]

Les exemples ci-après considèrent de simples composants, sous-systèmes et systèmes, et examinent comment l'amélioration de l'efficacité énergétique peut être évaluée. Ils reposent sur une évaluation type de l'efficacité énergétique d'une société. Ils montrent les effets de la prise en compte d'un système pour une utilité requise à un trop faible niveau (au niveau d'un composant/d'un élément ou au niveau du sous-système).

Le rendement[16] de l'énergie physique est présenté dans la Section 1.2.2.1 (et dans l'Annexe 7.1.1) :

$$\text{Rendement énergétique } \eta = \frac{\text{Énergie en sortie}}{\text{Énergie en entrée}} = \frac{\text{Travail (W)}}{} \text{ (exprimé généralement en \%)}$$

Où :
Travail (W) = la quantité de travail utile effectué par le composant, le système ou le procédé (en joules)
Énergie (E) = la quantité d'énergie (en joules) utilisée par le composant, le système, le procédé ou l'équipement

$$\text{Amélioration (changement) de l'efficacité énergétique} = \frac{\text{Changement d'énergie utilisée}}{\text{utilisation de l'énergie d'origine}}$$

Exemple : Système 1 - Moteur électrique

Ancien moteur électrique
Une société a effectué une analyse des entraînements par moteur existants. Elle a identifié un ancien moteur ayant une puissance électrique en entrée de 100 kW. Le rendement du moteur étant de 90 %, sa puissance mécanique de sortie est donc de 90 kW (voir Figure1.10).

[16] En Anglais, « energy efficiency » signifie ici le rendement énergétique d'une partie d'un équipement ou d'un procédé (et non pas son utilisation inconsidérée), en Français, cela correspond à « rendements énergétiques ».

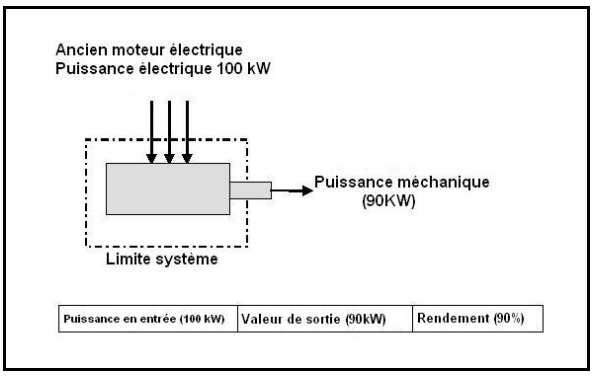


Figure 1.10 : Limite du système – ancien moteur électrique

Nouveau moteur électrique

Pour améliorer l'efficacité, le moteur a été remplacé par un moteur à rendement élevé. Les effets de ce changement sont représentés sur la Figure 1.11. La puissance électrique nécessaire pour produire la même puissance de sortie, 90 kW, est maintenant de 96 kW en raison du rendement plus élevé du nouveau moteur. L'amélioration de l'efficacité énergétique est donc de 4 kW, ou :

Amélioration énergétique = 4/100 = 4 %

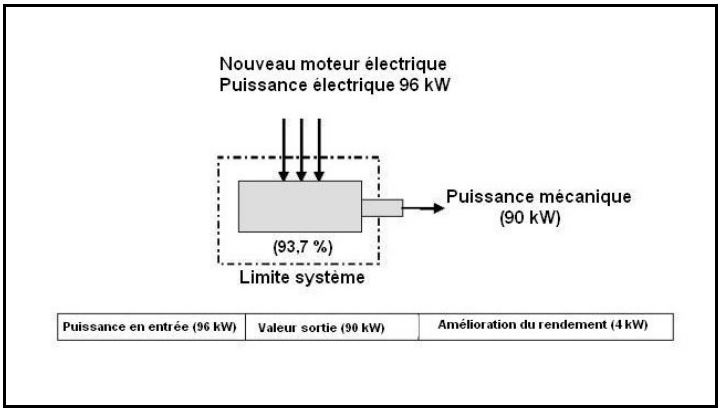


Figure 1.11 : Limite du système – Nouveau moteur électrique

Exemple : Système 2 - Moteur électrique et pompe

Comme représenté sur la Figure 1.12, un moteur électrique permet d'actionner une pompe alimentant en eau de refroidissement un système de refroidissement. L'association moteur et pompe est considérée ici comme un seul sous-système.

Nouveau moteur électrique et ancienne pompe

La valeur de sortie de ce sous-système est la puissance hydraulique sous forme de débit d'eau de refroidissement et de pression. En raison du faible rendement de la pompe, la valeur de sortie est limitée à 45 kW.

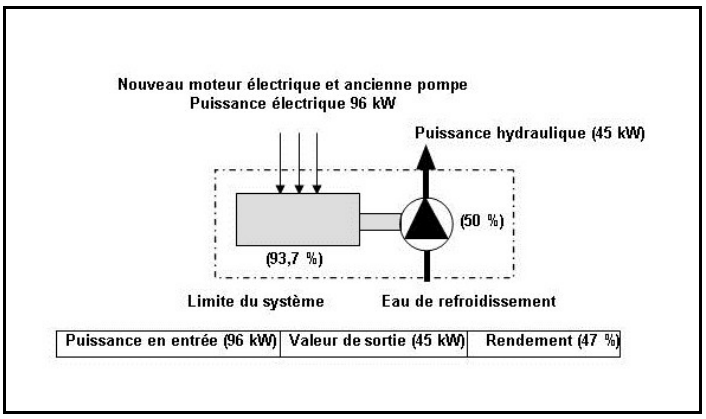


Figure 1.12 : Limite du système – nouveau moteur électrique et ancienne pompe

Nouveau moteur électrique et nouvelle pompe

L'ancienne pompe est remplacée par une nouvelle, ce qui augmente le rendement de la pompe en le faisant passer de 50 à 80 %. Le résultat de ce remplacement est représenté sur la Figure 1.13.

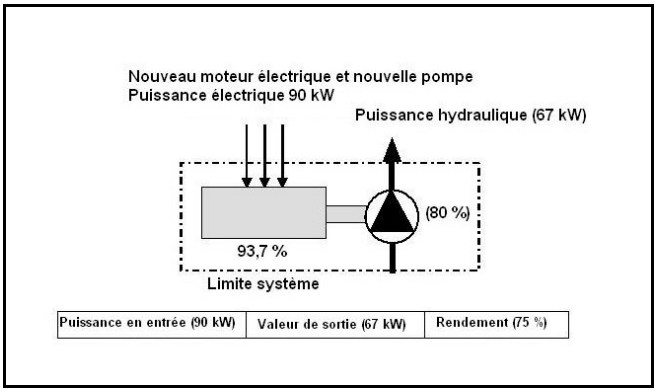


Figure 1.13 : Limite du système – Nouveau moteur électrique et nouvelle pompe

Le rendement du nouveau sous-système est nettement supérieur à l'ancien. La puissance hydraulique est passée de 45 à 67 kW. L'augmentation de l'efficacité énergétique peut être représentée comme (voir Section 1.3.1) :

$$\text{EEF} = \frac{\text{efficacité}}{\text{efficacité de référence}} = \frac{75}{47} = 1{,}60,$$ (soit 60 % d'amélioration de l'efficacité énergétique)

Exemple : Système 3 - Nouveau moteur électrique et nouvelle pompe avec une valeur de sortie constante

Comme indiqué sur la Figure 1.12, le système de refroidissement fonctionnait de manière satisfaisante même avec une puissance hydraulique de 45 kW. L'avantage d'une augmentation de 50 % de la puissance hydraulique en la faisant passer à 67 kW n'est pas évident et les pertes de pompage peuvent maintenant avoir été transférées à une vanne de régulation et au système de tuyauterie. Ce n'était pas là l'objectif prévu lors du remplacement des composants par des solutions plus efficaces au plan énergétique.

Une étude globale du système de refroidissement aurait pu montrer qu'une puissance hydraulique de 45 kW était suffisante, et dans ce cas, la puissance de l'arbre peut être estimée à 45/0,8 = 56 kW. La puissance électrique nécessaire pour entraîner le moteur aurait alors été de 56/0,937 = 60 kW.

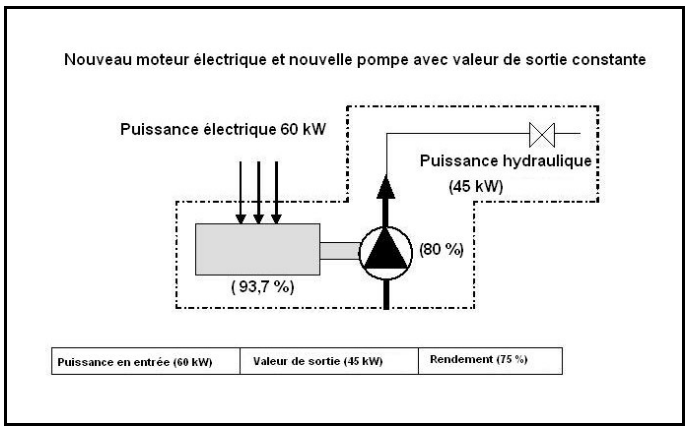


Figure 1.14 : Nouveau moteur électrique et nouvelle pompe avec une sortie constante

Dans ce cas, la puissance d'entrée est de 40 kW inférieure à la puissance antérieure, voir Figure 1.10. Le rendement reste à 75 % mais la consommation électrique par le système 1 (ancien moteur et vraisemblablement ancienne pompe) est réduite de 40 % et celle du système 2 (nouveau moteur, nouvelle pompe) est réduite de 33 %.

L'évaluation aurait dû rechercher s'il était possible de réduire la taille du moteur et de la pompe sans avoir d'effets nocifs sur le refroidissement, ou de réduire la puissance hydraulique requise, par exemple à 20 kW. Ceci aurait permis de réduire les investissements de capitaux consacrés aux équipements et d'avoir, par ailleurs, une amélioration de l'efficacité énergétique.

Exemple : Système 4 - Système 3 couplé à un échangeur de chaleur
Sur la Figure 1.15, la limite du système a été étendue et le sous-système comprend maintenant un nouveau moteur, une nouvelle pompe et l'ancien échangeur de chaleur pour le procédé de refroidissement. La puissance de refroidissement du procédé est de 13 000 kW_{th} (th = thermique).

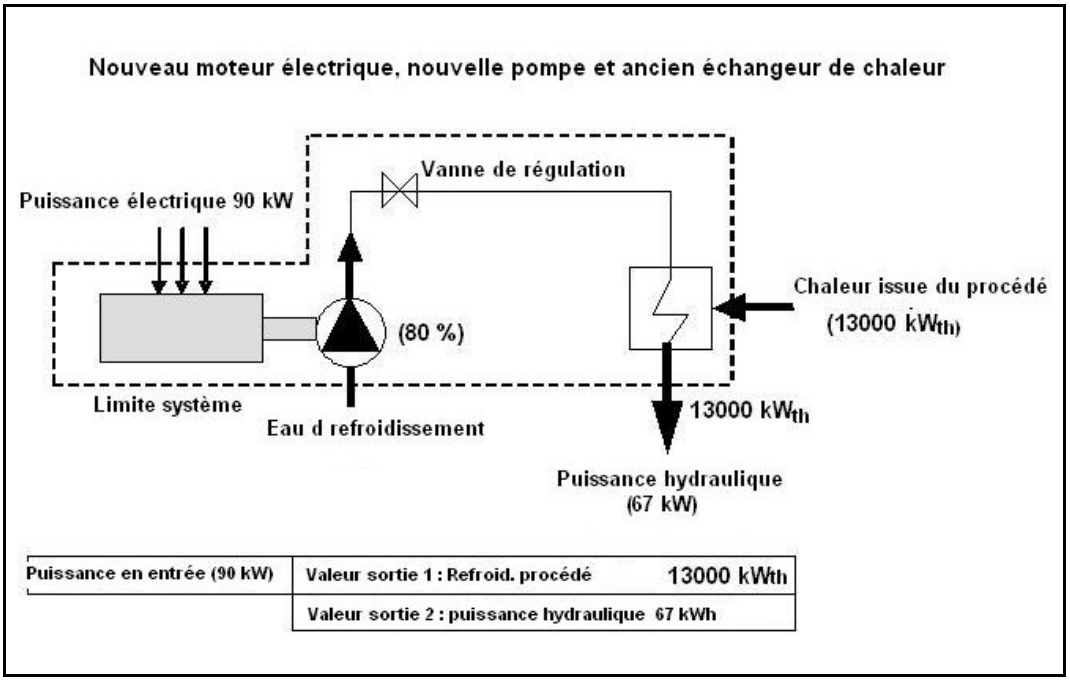


Figure 1.15 : Nouveau moteur électrique, nouvelle pompe et ancien échangeur de chaleur

Les valeurs de sortie sont l'élimination de la chaleur du procédé et la puissance hydraulique en raison d'une augmentation du débit d'eau et de la pression.

Toutefois, en ce qui concerne la définition de ce système d'utilité (voir Sections 1.3.1 et 1.4.1) le service fourni est un refroidissement. Le système est conçu pour fournir un refroidissement de 13 000 kW_{th} à un procédé (ou à des procédés). La chaleur du procédé dans ce système ne joue aucun rôle et la chaleur de sortie est perdue. L'efficacité reste à 75 % comme dans le Système 3 si on la mesure sur une base entrée/sortie. Toutefois, elle peut être mesurée sur une base SEC, et l'énergie requise pour fournir une quantité de refroidissement spécifiée (voir Section 1.3.1) :

$$\text{SEC} = \frac{\text{Énergie utilisée}}{\text{Produits élaborés}} = \frac{(\text{Énergie importée} - \text{Énergie exportée})}{\text{Produits/sorties produits}}$$

$$= \frac{\text{Énergie utilisée dans le système de refroidissement}}{\text{Service fourni}} = \frac{90 - 67\ \text{kW}}{13\,000\ \text{kW}_{th}\ \text{refroidissement}}$$

$$= 0{,}00177\ \text{kW/kW}_{th}\ \text{refroidissement} \qquad = 1{,}77\ \text{W/kW}_{th}\ \text{refroidissement}$$

Si les besoins en refroidissement sont réduits, par exemple par suite d'une réduction de la production à 8 000 kW de refroidissement, alors la SEC passe à 2,88 W/kW_{th}. Comme indiqué dans la Section 1.3.1, il s'agit d'une augmentation de la SEC, et par conséquent d'une perte de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire d'une perte de :

$$\frac{(2{,}88 - 1{,}77)}{1{,}77} = 62\ \%$$

Remarque : il ne s'agit pas là de traiter l'efficacité du refroidissement du procédé, mais uniquement l'efficacité énergétique du système de refroidissement.

Exemple : Système 5 - Système 4 avec récupération de chaleur

En raison des préoccupations environnementales, la société a pris la décision de réduire les émissions de carbone et de dioxyde d'azote en valorisant la chaleur émise par l'eau de refroidissement, et en réduisant de ce fait l'utilisation de fioul dans l'installation de chauffage (voir Figure 1.16) :

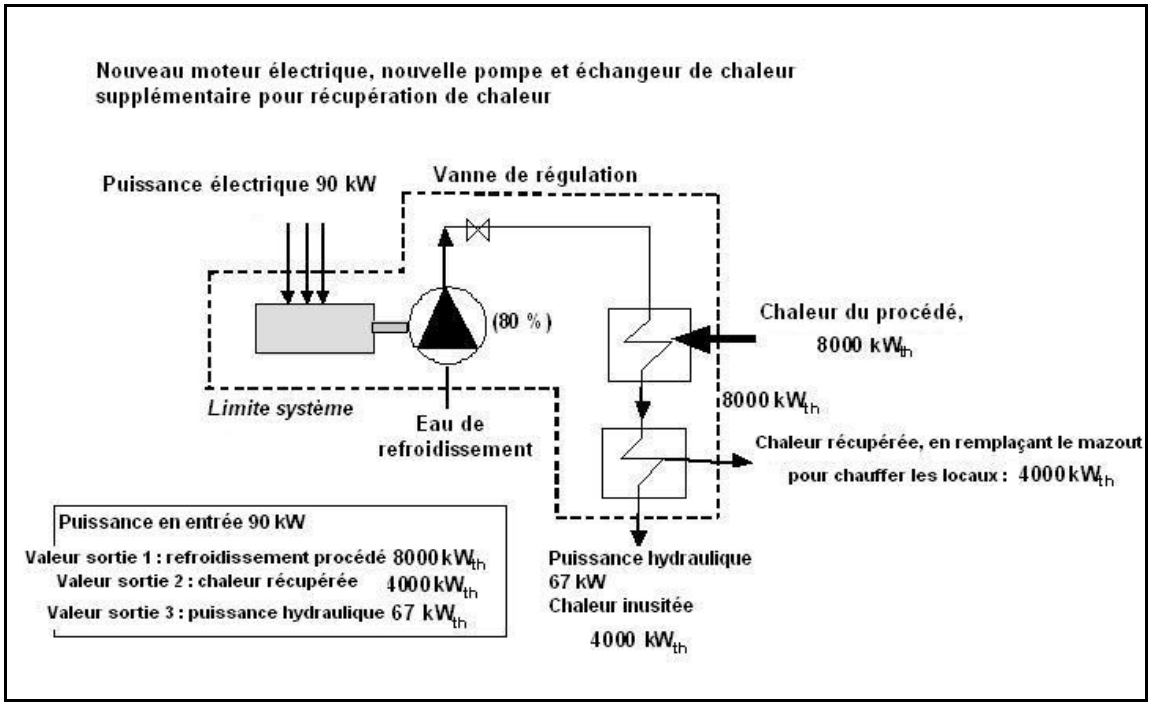


Figure 1.16 : Nouveau moteur électrique, nouvelle pompe et deux échangeurs de chaleur

Un calcul réalisé strictement sur les entrées et les sorties du système de refroidissement montre :

$$\frac{\text{Énergie utilisée dans le système de refroidissement}}{\text{Service fourni}} = \frac{90 - 67 \text{ kW}}{4000 \text{ kW refroidissement}}$$

= 0,00575 kW/kW_{th} refroidissement = 5,75 W/kW_{th} refroidissement.

Par rapport aux calculs du Système 4, on note une diminution de l'efficacité, alors que l'installation de chauffage alimentée au fioul montre une augmentation de son efficacité.

Il est évident que la récupération de la chaleur mise en place correspond à une augmentation de l'efficacité énergétique. Pour en estimer la valeur de manière plus détaillée, il faut aussi prendre en compte l'installation de chauffage alimentée au fioul. La valeur de la réduction de la consommation de fioul et la baisse de récupération de la chaleur issue des gaz de combustion de l'installation de chauffage doivent être prises en compte. Dans ce cas, comme bon nombre d'autres, les sous-systèmes sont reliés entre eux, ce qui signifie que l'efficacité énergétique d'un sous-système a souvent une influence sur l'efficacité d'un autre.

1.5.1.1 Conclusions sur les systèmes et les limites des systèmes

Il est important d'appréhender une installation au plan de ses unités/systèmes qui la composent. Un retour sur investissement maximum peut être obtenu si l'on considère un site dans son ensemble et ses unités/systèmes interconnectés (par exemple, dans le BREF STS (Traitement de surface utilisant des solvants), voir les MTD générales 13 et 14 et la MTD 81 pour l'application de peinture aux automobiles. Sinon, (comme on peut le voir dans les systèmes 1 et 2 ci-dessus) le remplacement de composants individuels peut conduire à des investissements dans des équipements mal dimensionnés et à passer à côté des meilleurs gains d'efficacité.

Il convient de mener des études quant à la nécessité de pérenniser tel ou tel autre système ou sous-système existant, ou pour établir si le service requis (par exemple, refroidissement, chauffage) peut être obtenu d'une manière partiellement ou totalement différente afin d'améliorer l'efficacité énergétique.

Les unités/systèmes doivent être :

- définis en termes de limites et d'interactions au niveau approprié ;
- considérés dans l'optique de fournir un service ou un produit identifiable, nécessaire ;
- évalués en termes de besoin actualisé ou prévisible de ce produit ou service (c'est-à-dire pas pour les anciens plans).

L'efficacité énergétique maximale pour une installation signifie parfois qu'il faut désoptimiser l'efficacité énergétique d'un ou de plusieurs systèmes afin d'atteindre une efficacité globale maximale au niveau d'une installation donnée. (Ceci peut être vrai en termes mathématiques, car des gains d'efficacités sont réalisés ailleurs, ou d'autres changements peuvent modifier les facteurs de calcul pour un système individuel, mais ne peut pas se traduire par une augmentation de la consommation globale d'énergie).

1.5.2 Autres points importants à prendre en considération au niveau de l'installation

1.5.2.1 Enregistrement des méthodes utilisées pour l'établissement de rapports

Au niveau de l'installation, une pratique (ou un ensemble de conventions) pour établir des rapports doit être adoptée et actualisée. Les limites pour les calculs de l'efficacité énergétique et tous les changements de limites et de pratiques opérationnelles doivent être identifiés dans la

base de données historiques internes et externes, à des fins d'interprétation et de comparabilité des données d'une année sur l'autre.

1.5.2.2 Production et utilisation de l'énergie en interne

Dans plusieurs procédés (par exemple, dans les raffineries, les usines de pâte à papier utilisant de la liqueur noire), le combustible produit dans le procédé est consommé en interne. Il est indispensable que l'énergie contenue dans ce combustible soit prise en compte lorsque l'on considère l'efficacité énergétique d'un procédé. En effet, comme indiqué à la Section 2.2.2, les raffineries ont des consommations énergétiques très faibles, comme environ de 4 à 8 % du pétrole brut en entrée sont utilisés en interne comme combustibles liquides et gazeux. En outre, les raffineries importent aussi parfois des ressources énergétiques telles que l'électricité, la vapeur et (occasionnellement) du gaz naturel. La raffinerie peut être équipée d'une installation de cogénération et peut exporter de l'électricité alors que sa consommation de combustible interne augmente. Selon l'Équation 1.1 et l'Équation 1.3, une raffinerie équipée d'une installation de cogénération peut sembler être un producteur d'énergie nette, comme elle peut devenir un producteur d'électricité nette.

Il est clair que cela ne reflète pas la réalité car les raffineries consomment des quantités importantes d'énergie. Certes, les limites des systèmes et les vecteurs énergétiques peuvent être choisis pour refléter des circonstances particulières à une installation, mais dès lors qu'ils ont été définis pour une usine spécifique, il convient de s'y tenir.

1.5.2.3 Valorisation des déchets et des gaz de torchère

Tout procédé génère une quantité de déchets solides, liquides et/ou gazeux. Ces déchets peuvent avoir une valeur énergétique qui peut être valorisée en interne ou en externe. Les déchets solides et liquides peuvent être exportés et dirigés sur une société d'incinération externe, les gaz résiduaires peuvent être brûlés dans des torchères. Voir Section 3.1.5

Déchets
Exemple : un type de déchets était auparavant dirigé sur une société d'incinération externe. Le site de production trouve une manière de les utiliser en interne, par exemple comme combustible pour ses chaudières ou ses fours et doit déterminer si cela va améliorer l'efficacité énergétique de l'unité/du site de production, étant donné que :

- l'utilisation interne de ces déchets réduit la nécessité d'un approvisionnement en combustibles externes, mais la consommation d'énergie globale demeure inchangée ;
- d'autre part, la société d'incinération peut avoir une installation où la valeur combustible des déchets en question est valorisée par le biais de la production de vapeur. Dans ce cas, la réorientation du flux de déchets pour une utilisation en interne comme combustible plutôt que de l'envoyer à une société d'incinération ne se traduira pas nécessairement par une quelconque amélioration globale de l'efficacité énergétique si l'on considère le tableau réunissant le producteur et la société d'incinération.

Remarque : le passage d'une incinération en externe à une utilisation en interne peut être motivé par des conditions commerciales et non par l'efficacité énergétique.

Voir **Aspect global**, ci-dessous pour les conclusions.

Torchères
Les torchères sont principalement un dispositif de sécurité pour l'industrie et sont utilisées pour mettre à l'air libre en toute sécurité les gaz résiduaires des usines telles que les raffineries d'huile minérale, les parcs de stockage, les usines chimiques et les décharges. Leur utilisation

comme filière d'élimination des gaz résiduaires n'est habituellement qu'une fonction[17] secondaire. Des sites bien gérés, bien exploités et bien conçus ont, dans des conditions de fonctionnement normal, un débit d'évacuation des gaz en torchère qui est petit voire négligeable. La plupart des sites ont néanmoins un petit flux constant envoyé en torchère, en raison, par exemple, d'une fuite au niveau des soupapes de détente et d'une ventilation due à des opérations de chargement/déchargement des réservoirs de stockage.

Tout gaz envoyé à la torchère est brûlé sans récupération de l'énergie contenue dans le gaz de torchère. Il est possible d'installer un système de récupération des gaz de torchère, qui valorise ce petit flux et le recycle vers le système de gaz combustible du site.

Exemple : l'exploitant d'un procédé de production qui, précédemment, ne possédait pas de système de récupération des gaz de torchère décide d'en installer un. Cette mesure va réduire la consommation interne de gaz combustible tandis que la consommation globale de gaz combustible du procédé reste la même. L'exploitant doit déterminer comment ce système de récupération de gaz combustible est évalué en termes d'efficacité énergétique. Ceci s'avère très important si un procédé de production valorise non seulement ses propres pertes en gaz de torchère mais aussi les pertes d'évacuation en torchère d'autres procédés de production sur le site.
Voir **Aspect global** ci-dessous pour les conclusions.

Aspect global
Selon l'Équation 1.5 de la Section 1.4.2.2, aucun crédit n'apparaît directement de la valorisation des déchets en tant que combustibles. Toutefois, en cas de recyclage en interne, les déchets peuvent servir à réduire la valeur des importations de combustible ($E_{f,\ in}$). Si l'énergie est récupérée au niveau d'un incinérateur externe, le cas est analogue au calcul de l'énergie primaire (voir Section 1.3.1) et peut être appréhendé de la même manière. Une autre possibilité consiste à définir, pour un procédé donné, la pratique de référence sur la quantité de déchets générée et la mesure dans laquelle elle est recyclée, et à donner un crédit d'énergie aux exploitants qui sont capables d'utiliser les déchets d'une manière plus efficace que dans le cas de référence. Toutefois, ce tableau peut devenir complexe d'une manière peu réaliste, sauf si des quantités importantes de déchets contenant de l'énergie sont produites à l'intérieur de l'installation (en proportion des intrants énergétiques de l'installation).

Il ressort clairement de ce qui précède qu'il est important de se mettre d'accord sur les règles régissant la manière de prendre en compte les déchets lors de l'élaboration du cadre pour définir la consommation d'énergie spécifique (SEC) / l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) d'un procédé/d'une unité. Les différents secteurs industriels peuvent avoir des pratiques différentes et valoriser l'utilisation en interne des déchets dans leur efficacité énergétique. Il est important que chaque secteur industriel et/ou chaque société définisse clairement la pratique standard appliquée.

Chaque industrie doit également définir clairement la manière dont elle traite les déchets, pour permettre d'établir une comparaison équitable entre des procédés de production en compétition. Au niveau de l'installation, il convient d'adopter une pratique pour l'établissement des rapports et de s'y tenir. Les changements doivent être identifiés dans la base de données historiques internes et externes pour garantir la comparabilité des données entre différentes années.

[17] Le forage pétrolier peut constituer une exception : une torchère est en fait utilisée pour évacuer le gaz qui accompagne le pétrole lors de son pompage. Pour toutes les autres industries, en particulier, en présence de gaz toxiques, un incinérateur est considéré comme étant plus approprié qu'une torchère pour le traitement des gaz résiduaires. Le principal avantage d'une torchère est toutefois d'avoir un taux d'élimination plus élevé que celui d'un incinérateur.

1.5.2.4 Facteur de charge (réduction de la consommation d'énergie spécifique avec une augmentation de la production)

La réduction de la consommation énergétique spécifique avec une augmentation du taux de production est tout à fait normale et est provoquée par deux facteurs :

- les équipements de production fonctionnent pendant des périodes plus longues lorsque le taux de production est élevé. En d'autres termes, les périodes de repos sont raccourcies. Certains types d'équipement fonctionnent en continu, même pendant les temps d'arrêt de production. Cette période est réduite lorsque le temps d'arrêt de production est raccourci ;
- il existe une consommation énergétique de base qui ne dépend pas de l'utilisation d'une capacité de production. Cette consommation est liée au démarrage et à la conservation de la température des équipements (sans aucune production, voir chaleur sensible, Section 1.5.2.10), à l'utilisation de l'éclairage, des ventilateurs, des machines de bureau, etc. Le chauffage des locaux est également indépendant du taux de production mais dépend plutôt de la température extérieure, comme on peut le voir sur la Figure 1.17. Avec des taux de production plus élevés, ces consommations seront réparties sur davantage de (tonnes de) produits.

Pour éliminer l'influence du facteur de charge sur l'efficacité énergétique réelle du site/de l'unité, l'exploitant peut employer des facteurs de correction spécifiques du secteur/du site/de l'unité. La charge de base du site/de l'unité peut également être mesurée, calculée, ou estimée (par exemple par une extrapolation à partir de différents taux de production). Cette situation est analogue à une comptabilisation financière et les bilans d'efficacité énergétique peuvent être qualifiés dans des cas spécifiques [127, TWG].

L'exploitant doit mettre à jour la base de données historiques internes et externes pour garantir la comparabilité des données entre différentes années.

1.5.2.5 Changement de techniques de production et de développement de produit

Il est possible de mettre en œuvre des changements de techniques de production, par exemple en raison d'un développement technique, ou parce que de nouveaux composants ou de nouveaux systèmes techniques sont disponibles sur le marché. Les systèmes techniques obsolètes peuvent devoir être remplacés et de nouveaux systèmes de contrôle peuvent devoir être introduits pour améliorer l'efficacité de la production. L'introduction de tels changements de technique de production peut également conduire à des améliorations de l'efficacité énergétique. Les changements de technique de production conduisant à une utilisation plus efficace de l'énergie seront considérés comme des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique. Voir Sections 2.3 et 2.3.1.

Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire d'ajouter de nouvelles unités à un procédé de production afin de satisfaire à la demande du marché, de respecter de nouvelles spécifications des produits ou de respecter des exigences environnementales. Dans ces cas, la SEC peut se détériorer après la mise en service de la nouvelle unité, parce que cette dernière introduit un besoin supplémentaire en énergie. Cela ne signifie pas pour autant que le site a échoué dans sa gestion de l'énergie.

L'exploitant doit mettre à jour la base de données historiques internes et externes pour garantir la comparabilité des données entre différentes années.

Exemples :

- De nouvelles spécifications des carburants (pour l'essence et le gazole à faible teneur en soufre) établies par la réglementation EURO IV) ont obligé les raffineries à adapter leurs

équipements de raffinage. Il s'en est suivi une augmentation de la consommation d'énergie dans les raffineries.

- Dans l'industrie de la pâte à papier, les améliorations apportées aux fibres utilisées dans le procédé ont conduit à une réduction de la consommation d'énergie. Par la suite, la qualité du produit fini a également été améliorée, ce qui impliquait une augmentation du broyage. Après ces deux étapes de développement technique, le résultat final s'est traduit par une augmentation de la consommation énergétique totale.
- une aciérie peut améliorer la résistance de ses produits en acier ; mais les nouveaux procédés ainsi mis en place entraînent une augmentation de la consommation d'énergie. Certains clients peuvent réduire l'épaisseur de l'acier utilisé dans leur produit de plusieurs dizaines de points de pourcentage. Il peut y avoir des gains d'énergie provenant de la diminution du poids des produits, par exemple dans les voitures. Les économies d'énergie font partie de l'évaluation du cycle de vie des produits et ne figurent pas dans les calculs d'efficacité énergétique d'une installation (comme la directive IPPC n'inclut pas l'analyse du cycle de vie (ACV) des produits).

Changements de la configuration de production
Des changements de la configuration de production peuvent signifier par exemple, la fermeture des lignes de production non rentables, le remplacement des systèmes d'utilités utilisés en support et la fusion des lignes d'activités similaires. Les changements de la configuration de production peuvent également être réalisés pour obtenir des améliorations de l'efficacité énergétique.

Ils peuvent avoir un impact sur le dénominateur de la consommation d'énergie spécifique (SEC), et les exploitants doivent mettre à jour leurs bases de données historiques internes et externes pour garantir la comparabilité des données entre différentes années.

Arrêt définitif de la fabrication d'un produit à fort intrant énergétique
Une société peut cesser de fabriquer un produit qui nécessite un apport énergétique élevé. La consommation d'énergie totale et la consommation d'énergie spécifique seront toutes deux réduites. Ceci peut être revendiqué comme une mesure permettant d'améliorer l'efficacité énergétique bien qu'aucune autre mesure n'ait été prise.

Là encore, l'exploitant doit mettre à jour la base de données historiques internes et externes pour garantir la comparabilité des données entre différentes années.

Externalisation
La fourniture d'une utilité est externalisée, par exemple la génération et la fourniture d'air comprimé (voir Section 3.7). La consommation d'énergie est réduite en achetant l'air comprimé à une source externe. La consommation d'énergie du fournisseur d'air comprimé s'en trouve accrue. Ce changement est à prendre en compte comme indiqué dans la rubrique énergie primaire – voir Section 1.3.6.1.

Sous-traitance des étapes d'un procédé
Un exploitant peut envisager de sous-traiter un procédé qui demande un fort apport énergétique, tel qu'un traitement thermique de composants métalliques. Comme cette opération doit toujours être réalisée, elle ne peut être considérée comme une mesure visant à améliorer l'efficacité énergétique et doit être incluse dans les calculs, sauf si le changement est noté dans les enregistrements et si la consommation d'énergie spécifique (SEC) et l'indicateur d'efficacité énergétique (EEI) sont modifiés en conséquence. Remarque : le sous-traitant en charge d'un tel procédé peut avoir une efficacité énergétique supérieure, car il a vraisemblablement davantage de connaissances et une plus grande expérience de ce procédé (ce qui permet une meilleure optimisation du procédé) et le rendement peut être plus élevé, ce qui réduit le facteur de charge.

Exemple : un exploitant d'une usine de construction en série d'automobiles décide d'augmenter les achats de composants au lieu d'en assurer la fabrication en interne. Il s'ensuit que la consommation d'énergie totale et la consommation d'énergie spécifique vont toutes deux

diminuer. Cet élément doit être pris en compte dans la mise à jour des indicateurs d'efficacité énergétique ainsi que dans les enregistrements.

1.5.2.6 Intégration de l'énergie

Production d'électricité en interne
La production d'électricité ou de vapeur en interne, sans augmentation de l'utilisation des sources d'énergie primaire est une manière reconnue d'améliorer l'efficacité énergétique. Elle peut être optimisée par un échange d'énergie avec des unités ou des installations adjacentes (ou des utilisateurs autres que des industriels) ; voir Sections 2.4, 2.12, 2.13, et 3.3. Les limites du système doivent être définies et les ambiguïtés éventuelles doivent être levées. La définition des limites est traitée dans les Sections 1.4 et 1.5 ci-dessus et le calcul des énergies primaires dans la Section1.3.6.1.

Utilisation de l'oxygène dans une centrale à combustion
Il est possible d'utiliser de l'oxygène dans une installation de combustion afin d'augmenter l'efficacité de la combustion et de réduire les entrées de combustibles. L'oxygène a également un effet bénéfique sur l'efficacité énergétique en réduisant le débit d'air massique des effluents gazeux et en réduisant les émissions de NO_x. Toutefois la production d'oxygène utilise aussi de l'énergie, sur le site ou hors du site, qui doit être comptabilisée. Voir la rubrique énergie primaire (Section 1.3.6.1), ainsi que la Section 3.16 et l'Annexe 7.9.5

Intégration du procédé et segmentation de la société
Au cours des dernières décennies, on observe deux tendances :

- l'intégration des procédés,
- la segmentation des sociétés, en particulier dans le secteur chimique.

Le développement des sites ayant un degré élevé d'intégration offre des avantages économiques considérables. Dans certains cas, la stratégie du marché consiste à fractionner les sociétés selon les entités de production qui les composent. Dans les deux cas, cela se traduit par des sites complexes avec de nombreux exploitants présents, avec génération des utilités par l'un de ces exploitants ou même par un tiers. Cela peut également se traduire par des flux d'énergie complexes entre les différents exploitants.

En règle générale, ces grands complexes intégrés offrent un potentiel élevé pour une utilisation efficace de l'énergie par le biais de l'intégration.

1.5.2.7 Utilisation inefficace de l'énergie contribuant au développement durable et/ou à l'efficacité globale d'un site

Comme noté dans les Sections 1.4 et 1.5, il y a lieu d'accorder une attention particulière à la définition des limites du système pour l'efficacité énergétique sur des sites complexes, tels que ceux décrits dans la Section 1.5.2.6, etc. Il y est souligné que dans l'examen spécifique des procédés de production individuels, certaines utilisations de l'énergie peuvent sembler inefficaces même si elles constituent une approche hautement efficace au sein du système intégré du site. Les exploitants d'unités, de procédés ou de systèmes individuels ne pouvant fonctionner à la meilleure efficacité, peuvent bénéficier de compensations commerciales afin de réaliser l'environnement le plus compétitif possible pour le site intégré considéré dans sa globalité.

Certains exemples sont :

- l'utilisation de vapeur dans un procédé de séchage est apparemment moins efficace au plan énergétique que l'utilisation directe de gaz naturel. Toutefois, la vapeur basse pression

provient d'un procédé CHP (coproduction de chaleur et d'électricité) en combinaison avec une génération d'électricité très efficace (voir Sections 3.4 et 3.11.3.2) ;

- les centrales de cogénération situées sur le site de production ne sont pas toujours la propriété du site de production mais peuvent être en partenariat avec une société de production d'électricité locale. La vapeur est la propriété de l'exploitant du site et l'électricité est la propriété de la société d'électricité. Il faut donc veiller à la manière dont ces installations sont prises en compte ;
- l'électricité est générée et consommée sur le même site ; toutefois les pertes de transmission sont moindres ;
- dans un système fortement intégré, les résidus contenant de l'énergie provenant des procédés de production sont renvoyés dans le cycle d'énergie. À titre d'exemple, on peut citer le renvoi de la vapeur de récupération dans le réseau vapeur et l'utilisation de l'hydrogène dans le procédé par électrolyse en tant que gaz combustible de substitution dans le procédé de production d'électricité et/ou de chaleur ou en tant que produit chimique (par exemple, matière première dans la production de peroxyde d'hydrogène). D'autres exemples sont l'incinération des résidus de production dans les chaudières des centrales et les gaz résiduaires brûlés en tant que combustibles, dont l'efficacité est moindre par rapport à l'emploi de gaz naturel (gaz d'hydrocarbure dans une raffinerie ou CO dans un traitement de métaux non ferreux). Voir Section 3.1.6.

Bien que cela soit hors du champ d'application du présent document (voir Champ d'application) les sources d'énergie et/ou les combustibles renouvelables/durables peuvent réduire les émissions globales de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ceci peut être pris en compte en utilisant un bilan carbone, voir Section 1.3.6.1 et Annexe 7.9.6.

1.5.2.8 Chauffage et climatisation des locaux

Le chauffage et la climatisation des locaux sont une utilisation de l'énergie qui dépend fortement de la température extérieure, comme représenté sur la Figure 1.17.

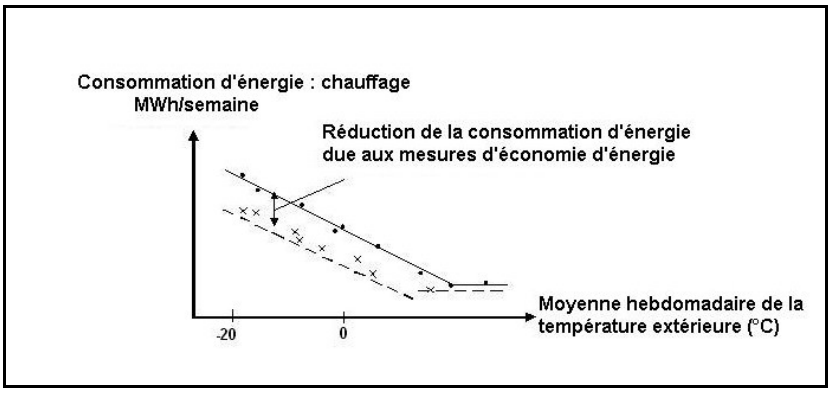


Figure 1.17 : Consommation d'énergie en fonction de la température extérieure

Si des mesures telles que la récupération de chaleur à partir de la sortie de l'air de ventilation ou l'amélioration de l'isolation d'un bâtiment sont mises en œuvre, la ligne de la Figure 1.17 va se déplacer vers le bas.

Les besoins en chauffage et en climatisation sont donc indépendants du rendement de la production et font partie du facteur de charge, voir Section 1.5.2.4.

1.5.2.9 Facteurs régionaux

Le chauffage et la climatisation (Section 1.5.2.8, ci-dessus) sont des facteurs régionaux, avec en principe des besoins en chauffage supérieurs dans l'Europe du Nord et des besoins en climatisation supérieurs dans l'Europe du Sud. Ceci peut avoir une incidence sur les procédés de production : il est par exemple nécessaire de conserver les déchets à une température à laquelle ils peuvent être traités dans les centres de traitement des déchets en Finlande en hiver ou de conserver les produits alimentaires au frais ce qui entraîne davantage de besoins en refroidissement en Europe du Sud, etc.

Les variations climatiques régionales et locales induisent également d'autres contraintes sur l'efficacité énergétique : le rendement des chaudières à charbon en Europe du Nord est généralement d'environ 38 % contre 35 % en Europe du Sud où l'efficacité des systèmes de refroidissementn humide est affectée par la température ambiante et le point de rosée, etc.

1.5.2.10 Chaleur sensible

La chaleur qui se traduit par une variation de la température est dite « sensible » (à savoir apparente ou pouvant être « ressentie », bien que ce terme soit de moins en moins usité), voir Section 3.1. Par exemple, les besoins en chauffage pour amener la totalité des entrées d'une usine de la température ambiante à 104,4°C dans une raffinerie sont dénommés chaleur sensible.

1.5.2.11 Autres exemples

L'annexe 7.3 énumère d'autres exemples de procédés :

- exemple 1 : vapocraqueur d'éthylène
- exemple 2 : production de monomère d'acétate de vinyle (VAM)
- exemple 3 : laminoir à chaud d'une aciérie

Ces procédés illustrent les questions suivantes :

- sites variés et complexes,
- flux d'énergie complexes,
- produits multiples avec des valeurs de combustibles,
- variation de l'efficacité énergétique électrique en fonction de la production,
- Indicateur d'efficacité énergétique (EEI) spécifique à une industrie pour les raffineries, le Solomon Energy Benchmark, à l'Annexe 7.9.1.

2 TECHNIQUES À PRENDRE EN CONSIDÉRATION POUR PARVENIR À L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE AU NIVEAU D'UNE INSTALLATION

[9, Bolder, 2003, 89, Commission européenne, 2004, 91, CEFIC, 2005, 92, Motiva Oy, 2005, 96, Honskus, 2006, 108, Intelligent Energy - Europe, 2005, 127, TWG]

Une approche hiérarchisée a été utilisée pour les Chapitres 2 et 3 :

- Le Chapitre 2 décrit les techniques à prendre en considération au niveau global d'une installation offrant un potentiel pour atteindre une efficacité énergétique optimale
- Le Chapitre 3 présente les techniques à prendre en considération à un niveau inférieur à celui de l'installation : tout d'abord pour les systèmes (par ex. air comprimé, vapeur) ou les activités (par ex. combustion) consommant de l'énergie, et ensuite à un niveau plus faible encore pour certains composants ou équipements consommateurs d'énergie (par ex. les moteurs).

Les systèmes de gestion, les techniques intégrées au procédé et les mesures techniques spécifiques font partie des deux chapitres, mais il y a recouvrement complet lorsqu'il s'agit de rechercher des résultats optimaux. De nombreux exemples d'une approche intégrée illustrent ces trois types de mesures. Il est donc quelque peu difficile et arbitraire d'établir une distinction entre les techniques pour les décrire.

Ni le présent chapitre, ni le chapitre 3 ne présentent une liste exhaustive des techniques et des outils, et d'autres techniques peuvent exister ou être en cours de développement, toutes également valables dans le cadre de l'IPPC et des MTD. Les techniques décrites dans le présent chapitre et dans le chapitre 3 peuvent être utilisées séparément ou en association et peuvent être étayées par les informations contenues dans le chapitre 1 pour atteindre les objectifs de l'IPPC.

Le présent chapitre et le chapitre 3, lorsque cela est possible, adoptent un plan standard pour décrire chaque technique dans ses grandes lignes, comme indiqué dans le Tableau 2.1. Il convient de remarquer que ce plan est également utilisé pour décrire les systèmes pris en considération, tels que (au niveau d'une installation) la gestion de l'énergie et (à un niveau inférieur) les systèmes à air comprimé, la combustion, etc.

Désignation du type d'information	**Type d'informations présentées**
Description	Brèves descriptions des techniques d'efficacité énergétique présentées avec des chiffres, des illustrations, des diagrammes de procédé, etc. qui illustrent cette technique
Avantages obtenus pour l'environnement	Principaux avantages de la technique pour l'environnement à l'appui des données de la consommation et des émissions obtenues par des mesures appropriées. Dans le présent document, il s'agit spécifiquement de l'augmentation de l'efficacité énergétique, mais en y incluant toutes les informations sur la réduction d'autres niveaux de polluants et de consommation
Effets croisés	Tous les effets défavorables et les inconvénients affectant l'environnement, provoqués par la mise en œuvre de la technique. Détails sur les problèmes environnementaux de la technique en comparaison avec d'autres
Données opérationnelles	Données de performance sur la consommation d'énergie et d'autres consommations (matières premières et eau). Toute autre information utile sur la façon d'utiliser, d'entretenir et de contrôler la technique, notamment les aspects de sécurité, les contraintes d'exploitation de cette dernière, la qualité en sortie, etc.
Applicabilité	Prise en compte des facteurs liés à l'application et à l'actualisation de la technique (par ex. espace disponible, spécificités du procédé, autres contraintes ou inconvénients de la technique)
Aspects économiques	Informations sur les coûts (investissement et exploitation) et les

	économies d'énergie s'y rapportant en EUR/kWh (thermique ou électrique) et autres économies possibles (par ex. réduction de consommation de matières premières, des charges relatives aux déchets) également liés à la capacité de la technique
Agents moteurs pour la mise en œuvre	Motifs, (autres que la directive IPPC) ayant poussé à la mise en œuvre de la technique (par ex. législation, engagements volontaires, raisons économiques)
Exemples	Référence à au moins une situation dans laquelle est citée l'utilisation de la technique
Références bibliographiques	Références bibliographiques et autres sources d'informations permettant de trouver des informations plus détaillées concernant la technique

Tableau 2.1 : Décomposition des informations pour les systèmes et techniques décrits dans les Chapitre 2 et 3

2.1 Systèmes de management de l'efficacité énergétique (SM2E)

Description

Toutes les entreprises industrielles peuvent économiser de l'énergie en appliquant les mêmes principes et techniques de gestion saine qu'elles utilisent par ailleurs pour la gestion de ressources clés comme la finance, les matières premières et la main d'œuvre ainsi que pour l'environnement, la santé et la sécurité. Ces pratiques de gestion comprennent une pleine responsabilisation de la consommation d'énergie. La gestion de la consommation et des coûts énergétiques élimine le gaspillage et permet de réaliser des économies cumulées au fil du temps.

Il convient de remarquer que certaines techniques de gestion de l'énergie qui garantissent des gains financiers ne réduisent pas la consommation d'énergie (voir Section 7.11).

Les meilleures performances au plan de l'environnement s'obtiennent habituellement par l'installation de la meilleure technologie et par sa mise en exploitation de la manière la plus rentable et la plus efficace. Ceci est reconnu par la définition des « techniques » dans la directive IPPC à savoir « *aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt* ».

Pour les installations IPPC, un système de management environnemental (SME) est un outil dont les exploitants peuvent se servir pour traiter les questions de conception, construction, maintenance, exploitation et mise à l'arrêt, d'une manière systématique, démontrable. Un système de management environnemental (SME) comprend la structure organisationnelle, les responsabilités, les pratiques, les procédures, les procédés et les ressources permettant de développer, de mettre en œuvre, de gérer, de revoir et de surveiller la politique environnementale. Les systèmes de management environnemental (SME) sont plus efficaces et plus rentables lorsqu'ils font partie intégrante de la gestion et de l'exploitation globale d'une installation.

Une gestion visant à obtenir une efficacité énergétique nécessite également de porter une attention structurée à l'énergie en ayant pour objectif de réduire continuellement la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité de la production et des utilités, mais aussi de maintenir les améliorations atteintes tant au niveau de la société que du site. Elle fournit une structure et une base pour la détermination de l'efficacité énergétique actuelle, en définissant des possibilités d'amélioration et en garantissant une amélioration continue. Toutes les normes, tous les programmes et guides de management de l'efficacité énergétique (et de gestion environnementale) concrets contiennent la notion d'amélioration continue, ce qui signifie que la gestion de l'énergie est un processus, non pas un projet qui va éventuellement se terminer.

Il existe diverses conceptions de procédés, mais la plupart des systèmes de management reposent sur une approche de type « planifier – agir – vérifier – faire » (d'usage fréquent dans

d'autres contextes de gestion d'une société). Le cycle est un modèle dynamique réitératif, où l'achèvement d'un cycle débouche sur le début du cycle suivant, voir Figure 2.1.

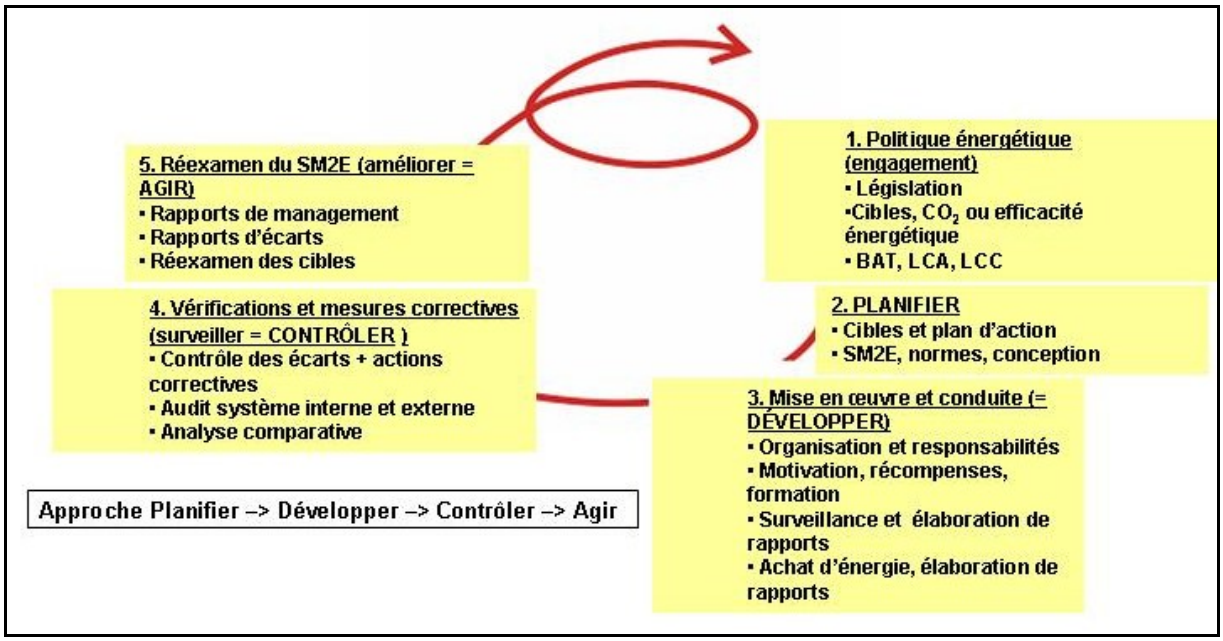


Figure 2.1 : Amélioration continue d'un système de management de l'efficacité énergétique [92, Motiva Oy, 2005]

Les meilleures performances ont été associées à des systèmes de management énergétique présentant les caractéristiques suivantes : (extrait de la matrice de gestion de l'énergie (Energy management matrix), [107, Good Practice Guide, 2004])

- **politique énergétique** – engagement de la direction générale en faveur de la politique énergétique, des plans d'actions, des vérifications régulières dans le cadre d'une stratégie environnementale
- **organisation** – gestion de l'énergie complètement intégrée dans le système global de gestion. Délégation claire des responsabilités pour le contrôle de la consommation d'énergie
- **motivation** – chaîne formelle et informelle de communications régulières à double sens entre les responsables de la gestion de l'énergie et le personnel chargé de l'énergie à tous les niveaux
- **systèmes d'informations** – un système global définit des cibles, surveille les consommations, identifie les défaillances, quantifie les économies et fournit un suivi du budget
- **marketing** – marketing de la valeur de l'efficacité énergétique et des performances de la gestion énergétique à l'intérieur et à l'extérieur de l'organisation
- **investissement** – discrimination positive en faveur de plans « verts » comprenant l'évaluation d'un investissement dans un nouveau bâtiment ou d'améliorations à un bâtiment existant.

A partir de ces sources, il ressort qu'un système de management de l'efficacité énergétique (SM2E) pour une installation IPPC doit comprendre les éléments suivants :

(a) engagement de la direction générale
(b) définition d'une politique d'efficacité énergétique
(c) planification et définition d'objectifs et de cibles
(d) mise en œuvre et conduite de procédures
(e) analyse comparative
(f) vérification des performances et mesures correctives
(g) réexamen par la direction générale

(h) préparation, à intervalles réguliers, d'un relevé d'efficacité énergétique
(i) validation par un organisme de certification accrédité ou par un vérificateur externe du SM2E
(j) prise en compte lors de la conception d'une installation, de l'incidence environnementale de son démantèlement en fin de vie
(k) mise au point de technologies d'efficacité énergétique.

Ces caractéristiques sont expliquées de manière détaillée ci-dessous. Des informations complémentaires sur les composants (a) à (k), peuvent être consultées dans les références bibliographiques, ci-dessous. Des exemples sont présentés à l'Annexe 3.

(a) Engagement de la direction générale

L'engagement de la direction générale est la condition préalable à un management de l'efficacité énergétique couronné de succès. La direction générale doit :

- inscrire l'efficacité énergétique en tête de liste de l'agenda de la société, la rendre visible et lui donner de la crédibilité
- nommer un responsable de la direction générale chargé de l'efficacité énergétique (cette personne ne doit pas nécessairement être la personne responsable de l'énergie, par analogie aux systèmes de gestion de la qualité)
- contribuer à créer une culture de l'efficacité énergétique ainsi que les agents moteurs nécessaires à sa mise en œuvre
- définir une stratégie (visions à long terme) pour atteindre l'efficacité énergétique dans le cadre des objectifs de prévention et de réduction intégrées de la pollution
- définir des cibles au sein de la société pour atteindre ces objectifs avec les objectifs IPPC
- définir des actions concrètes à court et moyen terme pour atteindre les objectifs à long terme
- fournir la plateforme permettant d'intégrer la prise de décision pour atteindre une prévention et une réduction intégrées de la pollution, notamment des économies des énergies, en particulier lors de la planification de nouvelles installations ou d'une mise à niveau importante
- guider la société pour que les investissements et les décisions d'achat débouchent sur une prévention intégrée de la pollution associée à des économies d'énergie de manière continue. La prévention et la réduction intégrées de la pollution s'obtiennent grâce à un processus de prise de décision et des actions intégrées, incluant l'achat des utilités et des biens d'équipements, la planification, la production et la maintenance ainsi que la gestion environnementale
- définir une politique de l'efficacité énergétique, voir (b) ci-dessous.

(b) Définition d'une politique d'efficacité énergétique

Il appartient à la direction générale de définir une **politique d'efficacité énergétique** pour une installation et de s'assurer que cette politique :

- est appropriée à la nature (incluant les conditions locales, telles que le climat), l'échelle et la consommation d'énergie des activités réalisées dans l'installation ;
- comprend un engagement en matière d'efficacité énergétique ;
- comprend un engagement à respecter l'ensemble de la législation et des réglementations pertinentes applicables à l'efficacité énergétique ainsi que les autres exigences applicables (notamment des accords en matière d'énergie) auxquelles l'organisation a souscrit ;
- fournit le cadre permettant de définir et de vérifier les objectifs et les cibles d'efficacité énergétique ;
- est documentée et communiquée à tous les employés ;
- peut être disponible pour le public et toutes les parties intéressées.

(c) Planification et définition d'objectifs et de cibles (voir Section 2.2)

- procédures permettant d'identifier les aspects de l'installation en termes d'efficacité énergétique et de maintenir ces informations à jour ;
- procédures d'évaluation des propositions concernant de nouveaux procédés, unités et équipements, mises à niveau, reconstructions et remplacements afin d'en identifier les aspects relatifs à l'efficacité énergétique et d'orienter la planification et les achats pour optimiser l'efficacité énergétique et la prévention et la réduction intégrées de la pollution (IPPC) ;
- procédures pour identifier et avoir accès aux exigences légales et autres exigences auxquelles l'organisation a souscrit et qui sont applicables aux aspects de l'efficacité énergétique de ses activités ;
- définition et passage en revue des objectifs et des cibles d'efficacité énergétique documentés, en tenant compte des exigences légales et autres exigences applicables ainsi que des points de vue des parties intéressées ;
- définition et mise à jour régulière du programme de management de l'efficacité énergétique, incluant la désignation des responsabilités pour atteindre ces objectifs et cibles à chaque niveau et fonction concernés de l'organisme ainsi que les moyens et le calendrier de réalisation.

(d) Mise en œuvre et conduite de procédures

Il est important de mettre en place des systèmes afin de garantir que les procédures sont connues, comprises et respectées ; en conséquence, une gestion efficace de l'énergie comprend :

(i) Organisation et responsabilités :
- définition, documentation, création de rapport et communication des rôles, responsabilités et autorités définies aux personnes concernées, incluant l'attribution d'un mandat à un responsable spécifique du management (en plus du responsable de la direction générale (voir (a) ci-dessus) ;
- allocation des ressources indispensables à la mise en œuvre et au contrôle du système de management de l'énergie, à savoir : ressources humaines et compétences spécifiques, technologie et ressources financières.

(ii) Formation, sensibilisation et compétence :
- identifier des besoins en formation pour garantir que tout le personnel dont la tâche peut avoir une incidence significative sur l'efficacité énergétique de l'activité a reçu une formation appropriée (voir Section 2.6).

(iii) Communication :
- définition et maintien de procédures de communication interne entre les divers niveaux et fonctions de l'installation. Il est particulièrement important que toutes les personnes et toutes les équipes qui ont un rôle à jouer dans l'efficacité énergétique disposent de procédures établies pour garder le contact, en particulier les personnes chargées des achats des utilités et des biens d'équipements consommateurs d'énergie, ainsi que les personnes responsables de la production, de la maintenance et de la planification ;
- mise en place de procédures qui prévoient un dialogue avec les parties intéressées externes et de procédures permettant de recevoir, de se documenter et, dans la mesure du raisonnable, de répondre à une communication pertinente provenant de tierces parties intéressées externes (voir Section 2.7).

(iv) Participation du personnel :
- participation des employés au processus visé afin de parvenir à un niveau élevé d'efficacité énergétique en appliquant des formes de participation appropriées telles qu'un système à base de livre de suggestions, des travaux de groupe centrés sur le projet ou des comités environnementaux (voir Section 2.7).

(v) Documentation :

- établir et actualiser les informations, sous forme imprimée ou électronique, pour décrire les principaux éléments du système de management et leur interaction et pour fournir des références à la documentation s'y rapportant.

(vi) Bonne maîtrise du procédé (voir Section 2.8) :

- contrôle adéquat des procédés dans tous les modes de fonctionnement, c'est-à-dire préparation, démarrage, exploitation de routine, fermeture et conditions anormales ;
- identification des indicateurs de performance clés pour l'efficacité énergétique et méthodes permettant de mesurer et de contrôler ces paramètres (par exemple, débit, pression, température, composition et quantité) ;
- optimisation de ces paramètres pour un fonctionnement énergétiquement efficace ;
- établissement de dossiers et analyse des conditions de fonctionnement anormales afin d'en identifier les causes et de les traiter pour éviter que de tels incidents ne se reproduisent (mise en place d'une culture « sans blâme » dans laquelle l'identification des causes est plus importante que la distribution de blâmes aux individus).

(vii) Maintenance (voir Section 2.9) :

- établir un programme structuré de maintenance, basé sur les descriptions techniques des équipements, sur les normes, etc., ainsi que sur les éventuelles pannes des équipements et leurs conséquences ;
- faciliter le programme de maintenance par des systèmes appropriés d'archivage des données et par des tests de diagnostic ;
- identifier, grâce à la maintenance de routine et en fonction des pannes et/ou des anomalies, d'éventuelles pertes d'efficacité énergétique ou de possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique ;
- définir clairement les responsabilités de chacun en matière de planification et d'exécution de la maintenance.

(viii) Préparation aux situations d'urgence et moyens d'action :

- évaluation de la consommation d'énergie lors de la valorisation ou du réemploi de matières premières ou de produits affectés par des situations d'urgence.

(e) Analyse comparative, c'est-à-dire :

- réaliser des comparaisons systématiques et régulières par rapport à des référentiels sectoriels, nationaux ou régionaux (voir Section 2.16 pour plus de détails).

(f) Vérification des performances et mesures correctives, c'est-à-dire (voir aussi analyse comparative (e) ci-dessus :

(i) Surveillance et prises de mesures (voir Section 2.10)

- établir et maintenir des procédures documentées pour surveiller et mesurer régulièrement les principales caractéristiques des opérations et activités qui peuvent avoir un impact significatif sur l'efficacité énergétique, y compris l'enregistrement des informations pour le suivi des performances, des contrôles opérationnels appropriés et le respect des objectifs et cibles de l'installation en matière d'efficacité énergétique ;
- établir et maintenir une procédure documentée pour évaluer périodiquement la conformité avec la législation, les réglementations et les accords (lorsque de tels accords existent) en matière d'efficacité énergétique.

(ii) Actions correctives et préventives

- établir et maintenir des procédures visant à définir les responsabilités et autorités pour la gestion et la recherche de non conformité aux conditions de délivrance des autorisations, aux autres exigences légales et engagements souscrits ainsi qu'aux objectifs et cibles ; prendre des mesures pour atténuer tous les impacts induits et pour initier et mener à terme

des actions correctives et préventives adaptées à l'ampleur du problème et proportionnelles à l'impact sur l'efficacité énergétique constaté.

(iii) Enregistrements et rapports

- établir et maintenir des procédures d'identification, de maintenance et de mise à disposition d'enregistrements lisibles, identifiables et traçables relatifs à l'efficacité énergétique, incluant la mention des sessions de formation ainsi que les résultats des audits et des réexamens ;
- établir régulièrement des rapports, destinés à qui de droit, sur les progrès accomplis pour parvenir aux cibles d'efficacité énergétique.

(iv) Réalisations d'audits et de diagnostics énergétiques (voir Section 2.11)

- établir et maintenir un ou des programmes et des procédures pour les audits périodiques du système de management de l'efficacité énergétique qui comprennent des entretiens avec le personnel, une inspection des conditions d'exploitation et des équipements et une vérification des enregistrements et de la documentation et qui donne lieu à un rapport écrit, devant être réalisé en toute impartialité ou objectivité par des employés (audits internes) ou par des tierces parties externes (audits externes), couvrant la portée de l'audit, la fréquence et les méthodologies, ainsi que toutes les responsabilités et les conditions requises pour conduire des audits et établir des rapports de résultats, afin de déterminer si le système de management de l'efficacité énergétique respecte les modalités prévues et s'il est correctement mis en œuvre et actualisé ;
- mettre fin à un audit ou à un cycle d'audit, comme approprié, en fonction de la nature, de l'échelle et de la complexité des activités et de l'audit, de l'importance de la consommation d'énergie, des impacts environnementaux associés, de l'importance et de l'urgence des problèmes détectés par les audits précédents et de l'historique d'une quelconque inefficacité énergétique ou de problèmes – les activités plus complexes ayant un plus grand impact sur l'environnement sont plus fréquemment soumises à des audits ;
- mettre en place des mécanismes appropriés pour s'assurer que les résultats des audits sont suivis d'effet.

(v) Évaluation périodique du respect de la législation et des accords, etc.

- vérifier la conformité à la législation applicable en matière d'efficacité énergétique, les conditions d'autorisation(s) environnementale(s) détenue(s) par l'installation et tous les accords en matière d'efficacité énergétique ;
- documentation de l'évaluation.

(g) Révision par la direction générale, c'est-à-dire :

- révision du système de management de l'efficacité énergétique, effectuée par la direction générale, à des intervalles qu'elle détermine, pour s'assurer qu'il reste adapté, adéquat et efficace (voir Section 2.5) ;
- s'assurer que les informations nécessaires sont collectées pour permettre à la direction de réaliser cette évaluation ;
- documentation de la vérification.

(h) Préparation, à intervalles réguliers, d'un relevé d'efficacité énergétique :

- préparer un relevé d'efficacité énergétique qui accorde une attention particulière aux résultats obtenus par l'installation eu égard à ses objectifs et cibles en matière d'efficacité énergétique. Il doit être produit à intervalles réguliers – d'une fois par an à moins fréquemment, en fonction de l'importance de la consommation d'énergie, etc. Il prend en compte les besoins en informations des tierces parties intéressées et il est accessible au public (par exemple, sous forme de publications électroniques, en bibliothèque, etc.) selon l'Applicabilité (ci-dessous).

Lors de l'élaboration d'un relevé, l'exploitant doit utiliser des indicateurs de performance d'efficacité énergétique existants pertinents et s'assurer que les indicateurs retenus :

i. donnent une évaluation précise des performances de l'installation ;
ii. sont compréhensibles et sans ambiguïté ;
iii. permettent une comparaison d'une année sur l'autre pour évaluer l'évolution des performances de l'installation en matière d'efficacité énergétique ;
iv. permettent une comparaison avec des référentiels sectoriels, nationaux ou régionaux, comme approprié ;
v. permettent une comparaison avec les exigences règlementaires, comme approprié.

(i) Validation par un organisme de certification accrédité ou par un vérificateur externe du SM2E :

- examen et validation du système de management de l'efficacité énergétique, de la procédure d'audit et de l'énoncé de la politique par un organisme de certification agréé ou un vérificateur externe : ces opérations lorsqu'elles sont réalisées correctement, amplifient la crédibilité du système (voir la rubrique Applicabilité, ci-dessous).

(j) Prise en compte dès la conception d'une installation, de l'incidence environnementale de son démantèlement en fin de vie

- se préoccuper au stade de la conception d'une nouvelle installation de l'impact sur l'environnement que pourra avoir son démantèlement en fin de vie, ces prévisions rendant le démantèlement plus facile, plus propre et moins onéreux ;
- le déclassement présente des risques environnementaux de contamination des sols (et des eaux souterraines) et génère souvent de grandes quantités de déchets solides. Les techniques préventives sont spécifiques à chaque procédé mais lors du choix des techniques efficaces au plan énergétique, il faut tenir compte de certains éléments d'ordre général, notamment :
  i. éviter les structures souterraines ;
  ii. incorporer des dispositifs qui facilitent le démantèlement ;
  iii. choisir des finis de surface qui sont faciles à décontaminer ;
  iv. utiliser une configuration des équipements qui minimise les produits chimiques piégés et facilite les purges ou les lavages ;
  v. concevoir des unités souples autonomes qui permettent une fermeture en plusieurs phases ;
  vi. utiliser des matériaux biodégradables et recyclables si possible ;
  vii. éviter l'utilisation de substances dangereuses, par exemple lorsqu'il existe des produits de remplacement (comme dans les fluides échangeurs de chaleur ou d'isolation). En cas d'utilisation de matières dangereuses, gérer les risques de manière appropriée lors de leur emploi, de la maintenance et du démantèlement.

(k) Mise au point de technologies d'efficacité énergétique :

- l'efficacité énergétique doit être une caractéristique propre à toutes les activités de conception de procédé réalisées par l'exploitant, étant donné que les techniques incorporées au stade le plus précoce possible de la conception sont à la fois les plus efficaces et les moins onéreuses (voir Section 2.3). La prise en compte des technologies d'efficacité énergétique peut se manifester par exemple par un suivi des activités ou des études de R&D (Recherche et Développement). A titre de variante aux activités internes, il est possible de prendre des dispositions pour se maintenir au niveau– et le cas échéant – commander des travaux réalisés par d'autres exploitants ou instituts de recherche actifs dans le domaine concerné.

Avantages obtenus pour l'environnement

La mise en œuvre et l'adhésion à un SM2E concentre l'attention de l'exploitant sur les performances de l'installation en matière d'efficacité énergétique. En particulier, la maintenance

et le respect de procédures d'exploitation claires à la fois pour les situations normales et anormales et les lignes de responsabilité associées doivent assurer que les conditions d'autorisation de l'installation ainsi que les autres cibles et objectifs en matière d'efficacité énergétique sont satisfaits à tout moment.

Les systèmes de management de l'efficacité énergétique garantissent généralement l'amélioration continue des performances de l'installation en matière d'efficacité énergétique. Plus le point de départ est médiocre, plus l'on peut attendre des améliorations importantes à court terme. Si l'installation possède déjà de bonnes performances globales en termes d'efficacité énergétique, le système aide l'exploitant à conserver ce niveau de performance élevé.

Effets croisés
Les techniques de management de l'efficacité énergétique doivent être conçues pour s'intégrer à d'autres objectifs environnementaux et pour prendre en compte l'impact environnemental global, qui est cohérent avec l'approche intégrée de la directive IPPC. Toutefois, l'efficacité énergétique est susceptible d'être un objectif à atteindre parmi d'autres, et d'autres objectifs (tels que les économies de matières premières, l'amélioration de la qualité des produits, la réduction des émissions dans l'environnement) sont susceptibles d'accroître la consommation d'énergie). Cet aspect est traité de manière plus détaillée dans le REF ECM (Aspects économiques et Effets croisés).

Données opérationnelles
Aucune information spécifique n'a été communiquée. Voir Exemples, ci-dessous.

Applicabilité
1. Composants
Les composants décrits ci-dessus peuvent en principe s'appliquer à toutes les installations IPPC. Le champ d'application (par exemple niveau de détail) et la nature du SM2E (par exemple normalisé ou non) sont, en règle générale, fonction de la nature, de la taille et de la complexité de l'installation, mais aussi de la consommation d'énergie, et de tout l'éventail des autres impacts possibles sur l'environnement. Par exemple :

- dans les petites installations, le responsable de la direction générale cité à la Section 2.1 (a) et 2.1 (d) (i) peut être la même personne
- la politique énergétique 2.1 (b) peut être rendue publique dans le cadre d'une déclaration de politique environnementale ou par le biais d'un rapport de responsabilité sociale des entreprises
- d'autres facteurs tels que la législation se rapportant à la concurrence et à la confidentialité doivent être pris en compte (voir Section 2.1 (h)). L'efficacité énergétique peut être divulguée publiquement par l'utilisation des indices (par exemple, % de réduction Y si l'utilisation de l'énergie pour l'année X et de 100 %), en cumulant des chiffres des installations sur le même site ou dans la même société (voir Section 1.3 et les exemples de l'Annexe 7.4).

2. SME et/ou SM2E normalisés et non normalisés
A l'intérieur de l'Union européenne, de nombreuses sociétés ont décidé de mettre en œuvre des systèmes de management de l'énergie reposant sur le volontariat. Ces derniers consistent notamment à :

- ajouter des exigences spécifiques en matière d'efficacité énergétique à un système de gestion existant, habituellement (mais non exclusivement) un système de management environnemental (SME). Il convient de remarquer que les SM2E décrits dans l'alinéa ci-dessous sont conçus pour être cohérents avec un SME existant). Un SME peut être fondé sur la norme EN ISO 14001:1996 ou sur le système de management environnemental et d'audit de l'UE (EMAS). Le système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS) comprend les exigences du système de gestion de la norme EN ISO 14001,

et met en outre l'accent sur le respect de la législation, les performances environnementales et la participation des employés ; il requiert aussi une vérification externe du système de gestion et une validation d'un relevé environnemental public. Dans la norme EN ISO 14001 ; l'auto-déclaration est une alternative à une vérification externe. Il existe également de nombreuses sociétés qui ont décidé de mettre en place des SME non normalisés

- utiliser des systèmes de management de l'efficacité énergétique distincts (SM2E), qui peuvent être :
  - une gestion de l'énergie basée sur des normes nationales (telles que la norme danoise DS 2403, la norme irlandaise IS 393, la norme suédoise SS627750, la norme allemande VDI Richtlinie No. 46 Energy Management, les recommandations finlandaises ou d'autres recommandations (normes internationales ou recommandations sur la gestion de l'énergie). Une Norme européenne (CEN) est en cours de préparation.
  - un système de gestion de l'énergie qui n'est pas normalisé mais néanmoins adapté pour satisfaire à leurs propres besoins et à leurs propres structures de gestion.

Il ressort d'un réexamen des schémas de gestion de l'énergie et des analyses comparatives les éléments ci-après [165, BESS_EIS] :

- *avantages d'un système normalisé* (par ex. Danemark DS 2403) :
  - approche structurée, qui est centrée sur l'énergie, facile à atteindre si la norme ISO ou un autre système de management est déjà en place
  - structure et terminologie parallèles aux normes ISO 14001 et ISO 9001
  - économies d'énergie avérées au Danemark de 10 à 15 %
  - l'efficacité énergétique devient une exigence voulue par la direction générale, au sein de l'organisation
  - certification obtenue après approbation
  - les grandes sociétés préfèrent des systèmes de management certifiés ou structurés
  - le processus de certification est précieux, il permet de relever des défis et est détaillé
  - couverture de tous les sujets relatifs à l'approvisionnement énergétique, la transformation, l'utilisation, le comportement, la technologie, le personnel
  - bien documenté (fondé sur ISO 9001)
  - utilisable dans tous les accords portant sur l'énergie
- *inconvénients :*
  - en lui-même, il ne garantit qu'un niveau minimum de gestion de l'énergie
  - le degré auquel les compagnies le mettent en œuvre varie, par exemple DS 2403
  - l'objectif pour les sociétés est de satisfaire aux exigences du système, et non pas de mettre en œuvre les meilleures pratiques de gestion de l'énergie
  - en l'absence d'un système de management documenté formel, qui soit déjà en place, sa mise en œuvre nécessite un surcroît de ressources et d'expertise.

La mise en œuvre et l'adhésion à un système normalisé accepté à l'échelle internationale tel que EN ISO 14001:1996 peut conférer une crédibilité supérieure aux PME, en particulier lorsqu'il est soumis à une vérification externe exécutée correctement. Le système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS) fournit une crédibilité supplémentaire en raison de l'interaction avec le public grâce à la déclaration environnementale et au mécanisme permettant de garantir une conformité à la législation environnementale applicable. Toutefois, les systèmes non normalisés peuvent, en principe, être tout aussi efficaces à condition d'être correctement conçus et mis en œuvre.

3. <u>Vérification externe</u>

En fonction du système choisi, l'exploitant peut opter (ou non) pour une vérification externe et/ou une déclaration publique portant sur l'énergie.

4. La diffusion dans le domaine public d'une politique d'efficacité énergétique (voir (h), ci-dessus) peut être restreinte pour des raisons de confidentialité et de compétitivité. Cette mesure peut certes avoir un rôle moteur, néanmoins elle ne permet pas en elle-même d'augmenter l'efficacité énergétique. La politique générale en faveur de l'efficacité énergétique peut être rendue accessible au public dans un rapport de CSR (Corporate Social Responsibility,

Responsabilité sociale des entreprises), et/ou les données peuvent être rapportées sous forme d'indices, comme par exemple, dans la rubrique Exemples et dans l'Annexe 7.4.

Aspects économiques
Il est difficile de déterminer avec précision les coûts et les avantages économiques de l'introduction et de la gestion d'un bon SM2E. Toutefois, il faut se souvenir que les économies (nettes) contribuent directement au bénéfice brut.

Voir la rubrique Exemples, ci-dessous.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Les systèmes de management de l'efficacité énergétique peuvent apporter un certain nombre d'avantages, par exemple :

- amélioration de la perception des aspects de l'efficacité énergétique de la société ;
- amélioration des performances en matière d'efficacité énergétique et du respect des mesures relatives à l'efficacité énergétique (volontaires ou règlementaires) ;
- amélioration de la compétitivité, en particulier pour faire face à la tendance à la hausse des prix de l'énergie ;
- opportunités supplémentaires de réduction des coûts opérationnels et d'amélioration de la qualité des produits ;
- amélioration des fondements de la prise de décision ;
- amélioration de la motivation du personnel ;
- amélioration de l'image de la société ;
- augmentation de l'intérêt manifesté par les employés, les clients et les investisseurs ;
- augmentation de la confiance des autorités réglementaires qui pourrait conduire à une réduction de la surveillance règlementaire ;
- facilite l'utilisation des marchés libéralisés de l'énergie, des services émergents d'énergie, des accords portant sur l'énergie et des incitations à l'efficacité énergétique (Voir, par exemple Annexes 7.4, 7.11, 7.12, 7.13 et 7.14), etc.

Exemples (voir Annexe 7.4)
Outokumpu, Établissements Tornio, Finlande [160, Aguado, 2007].
Aughinish Alumina (AAL), Irlande [161, SEI, 2006].
Dow Chemical Company [163, Dow, 2005] Dow est parvenu à la réduction prévue de 20 % de la consommation d'énergie spécifique (dénommée intensité énergétique chez Dow), en passant de 13 849 kJ/kg de produit à 11 079 kJ/kg, mesuré en kg de produits Dow mélangés au total.
Économies d'énergie avérées au Danemark [165, BESS_EIS].

Références bibliographiques
[160, Aguado, 2007, 161, SEI, 2006, 163, Dow, 2005]

1. Principales normes environnementales
(Règlement (CE) no 761/2001 du Parlement européen et du Conseil permettant la participation volontaire des organisations à un système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS), JO L 114, 24/4/2001,
http://europa.eu.int/comm/environment/emas/index_en.htm)

(EN ISO 14001:1996, http ://www.iso.ch/iso/en/iso9000-14000/iso14000/iso14000index.html ; http://www.tc207.org)

2 Normes en matière d'efficacité énergétique
- IS 393 :2005 Systèmes de management de l'énergie (Irlande)
- DS2403 Systèmes de management de l'énergie (Danemark)
- SS627750 Systèmes de management de l'énergie (Suède)

2.2 Planification et définition d'objectifs et de cibles

2.2.1 Poursuite des améliorations au plan environnemental et effets croisés

Description
Un élément important d'un système de management environnemental (SME, c'est-à-dire une MTD dans tous les secteurs IPPC) est le maintien d'une amélioration environnementale globale. Il est indispensable que l'exploitant comprenne ce qui arrive aux entrées, y compris à l'énergie (compréhension du procédé) et la manière dont leur consommation conduit à des émissions. Il est tout aussi important, lors du contrôle des entrées et des sorties importantes, de maintenir un équilibre correct entre la réduction des émissions et les effets croisés, tels que la consommation d'énergie, d'eau et de matières premières. L'impact global de l'installation sur l'environnement s'en trouve réduit.

Afin d'atteindre une approche intégrée de la réduction de la pollution, il est important d'inclure des améliorations environnementales continues comme point de mire dans la planification des activités d'une installation. Ceci comprend une planification à court, moyen et long termes et tous les procédés qui la composent et/ou les systèmes de l'installation. Il convient de noter que « Continues» dans ce contexte signifie que l'objectif d'amélioration au plan environnemental est permanent et que la planification et les actions en découlant sont répétées dans le temps pour y parvenir.

Toutes les consommations significatives (y compris d'énergie) ainsi que les émissions doivent être gérées de manière coordonnée à court, moyen et long termes, conjointement à des cycles de planification financière et d'investissement, c'est-à-dire en adaptant des solutions de bout de chaîne à court terme aux critères d'émission, ce qui risque de condamner l'exploitant à une consommation d'énergie plus élevée sur le long terme et d'entraîner le report des investissements dans des solutions plus avantageuses pour l'environnement (voir la rubrique Exemples, ci-dessous). Tout ceci nécessite de prendre en considération les effets croisés ; les recommandations les concernant ainsi que des considérations de coût et de rapport coûts-avantages sont présentées dans la Section 1.1.6 et de manière plus détaillée dans le document REF ECM (Aspects économiques et effets croisés) [167, EIPPCB, 2006], et dans la section Prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception ainsi que dans d'autres sections (Section 2.2.2., etc.).

Les avantages pour l'environnement ne sont pas toujours linéaires, par exemple il peut être impossible de réaliser 2 % d'économie d'énergie chaque année pendant 10 ans. Les avantages risquent d'être irréguliers et de se manifester par palier, reflétant ainsi les investissements dans des projets d'efficacité énergétique, etc. (voir Section 2.2.1). Dans le même ordre d'idée, il peut y avoir des effets croisés dus à d'autres améliorations environnementales : par exemple, il peut être nécessaire d'utiliser davantage d'énergie pour réduire les polluants atmosphériques. La Figure 2.2 montre comment la consommation d'énergie peut :

- diminuer après un premier audit énergétique et les actions qui en découlent ;
- s'élever suite à l'installation d'équipements supplémentaires de réduction des émissions ;
- rediminuer consécutivement à d'autres actions et d'autres investissements ;
- la tendance globale de la consommation d'énergie tend à diminuer au fil du temps, par suite d'une planification et d'investissements à plus long terme.

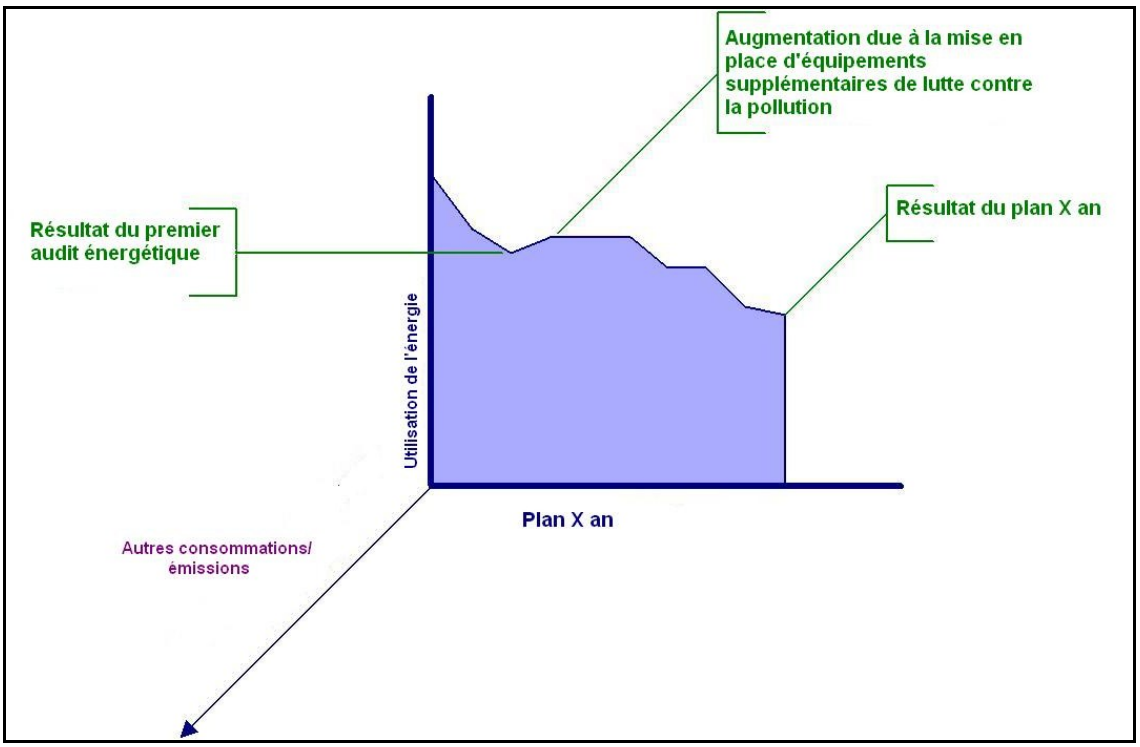


Figure 2.2. : Exemple de variations possibles de la consommation d'énergie dans le temps [256, Tempany, 2007]

La politique de l'UE accorde une grande importance à l'efficacité énergétique (dans des déclarations telles que la Déclaration de Berlin, où elle est la seule question environnementale soulevée [141, UE, 2007]). Lorsqu'on considère les aspects économiques et les effets croisés d'une mise en œuvre des MTD dans une installation, l'importance de l'efficacité énergétique doit être prise en compte eu égard aux exigences de l'Art 10 (4), c'est-à-dire les valeurs limites d'émission (ELV) et des paramètres équivalents.

Avantages obtenus pour l'environnement

Il est possible d'obtenir une réduction à long terme des consommations d'énergie, d'eau et de matières premières, ainsi que des émissions. Les impacts sur l'environnement ne peuvent jamais être ramenés à zéro, et parfois de nouvelles mesures présentent très peu d'intérêt, voire aucun, par rapport aux coûts. Toutefois, sur une période plus longue, avec un changement de technologie et de coûts (par exemple, prix de l'énergie), la viabilité peut également varier.

Effets croisés

Une partie des consommations ou des émissions liées à l'exploitation peut être proportionnellement plus élevée sur une certaine durée jusqu'à ce qu'un investissement à plus long terme soit réalisé.

Données opérationnelles

Une étude réalisée dans les années 1990 montre que de nombreuses sociétés ne prêtent pas attention aux très bons retours sur les investissements énergétiques. Il ressort en conclusion que la plupart des sociétés effectuent une distinction nette entre les activités « centrales » et celles qui ne le sont pas, peu d'efforts de management étant consacrés à ces dernières, sauf si les opportunités d'économies ont eu raison de très gros obstacles tels que des périodes de recouvrement de l'investissement de 18 à 24 mois. Pour les activités qui consomment peu d'énergie, les coûts énergétiques sont soit considérés comme des « frais fixes » soit ignorés car ils sont inférieurs à une fraction « seuil » des coûts. Par ailleurs, les sociétés ayant des coûts énergétiques plus importants ne semblent pas exploiter les opportunités disponibles pour un investissement « sans regrets » [166, DEFRA, 2003].

Applicabilité
Applicable à toutes les installations IPPC. L'étendue de cet exercice dépend de la taille de l'installation et du nombre de variables (également voir Avantages obtenus pour l'environnement, ci-dessus). Une étude portant sur les effets croisés est rarement entreprise.

Aspects économiques
Possibilités d'investissement de capitaux en toute connaissance de cause quant à la réduction des avantages environnementaux globaux et au meilleur rendement financier.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Réduction des coûts à court, moyen et long termes.

Exemples
Un exemple de prise en compte des effets croisés est donné dans le REF ECM (Aspects économiques et effets croisés) [167, EIPPCB, 2006].

Un exemple théorique est celui d'un constructeur automobile cherchant à réduire davantage ses émissions de solvant. Un grand pas peut être franchi, mais nécessite le remplacement de tout l'atelier de peinture, dont la durée de vie est de 25 ans et dont le coût en capital est d'environ 500 millions d'euros. La consommation d'énergie de l'atelier de peinture représente environ 38 à 52 % de la consommation d'énergie totale de l'installation et elle est de l'ordre de 160 000 – 240 000 MWh (dont 60 % représente du gaz). La quantité de matières premières utilisées, le rendement de l'application et la quantité de solvants qui est perdue peuvent également être affectés par le degré d'automatisation. Il est nécessaire de considérer pour les éléments ci-après, les coûts d'exploitation et les coûts d'immobilisation du capital ainsi que les consommations et les émissions, par rapport à la période de retour sur investissement :

- la sélection du type de peinture et du système d'application,
- le degré d'automatisation,
- le volume de traitement des gaz résiduaires et de peinture requis par le système,
- la durée de vie de l'atelier existant (voir Section 2.2.1).

Références bibliographiques
[127, TWG, 141, UE, 2007, 152, CE, 2003, 159, BEPRIP, 2006, 166, DEFRA, 2003, 167, BEPRIP, 2006, 256, Tempany, 2007]

2.2.2 Approche systémique du management énergétique

Description
Les travaux réalisés dans le cadre d'un programme appelé SAVE[18] (actions déterminées en faveur d'une plus grande efficacité énergétique) montrent que, alors qu'il existe des possibilités de réaliser des économies en optimisant les composants individuels (tels que les moteurs, les pompes ou les échangeurs de chaleur, etc.), les plus grands gains en efficacité énergétique doivent être réalisés en utilisant une approche systémique, en commençant par l'installation, en analysant les unités et les systèmes qui la composent et en optimisant (a) la manière dont ils interagissent, et (b) en optimisant le système. Ce n'est qu'à partir de là que l'on pourra éventuellement optimiser les dispositifs restants.

Ceci est important pour les systèmes d'utilités. Dans le passé, les exploitants ont eu tendance à se concentrer sur les améliorations des procédés utilisant de l'énergie et des autres équipements : un management de l'énergie du coté demande. Toutefois, la quantité d'énergie utilisée sur un site peut également être réduite par la manière dont se font les approvisionnements et la fourniture de l'énergie : management énergétique du côté

[18] SAVE est un programme portant sur l'efficacité énergétique de la CE

approvisionnement (ou management des utilités), lorsqu'il existe des options, voir Section 2.15.2.

Les Sections 1.3.5 et 1.5.1 décrivent l'importance de la prise en considération de l'efficacité énergétique de l'intégralité des systèmes et démontrent comment une approche systémique permet d'obtenir des gains plus élevés sur le plan de l'efficacité énergétique (on peut y voir une approche par le haut).

Avantages obtenus pour l'environnement
Des économies d'énergie plus élevées sont obtenues au niveau des composants (approche par le bas). Voir la rubrique Exemples, ci-dessous. Une approche systémique permet également de réduire les déchets et les eaux résiduaires, d'autres émissions, les pertes du procédé, etc.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
Des détails sont donnés dans les sections pertinentes, notamment :

- Section 2.15.2 : Optimisation et management modélisé des utilités
- Le Chapitre 3 traite principalement des systèmes individuels.

Applicabilité
À toutes les installations.

Aspects économiques
Voir les sections pertinentes.

Agent moteur pour la mise en œuvre
- coût
- amélioration de l'efficacité
- réduction des investissements en capital.

Exemples
Voir les sections pertinentes. Par exemple : un nouveau moteur dans un système à air comprimé ou un système de pompage permet d'économiser 2 % de l'énergie entrante : l'optimisation du système dans son ensemble peut permettre d'économiser 30 % ou plus (en fonction de la condition du système). Voir Sections 3.6 et 3.7.

Références bibliographiques
[168, PNEUROP, 2007, 169, CE, 1993, 170, CE, 2003, 171, de Smedt P. Petela E., 2006]

2.3 Prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED)

Description
Dans la phase de planification d'une nouvelle usine ou d'une nouvelle installation (ou sur une installation subissant de gros travaux d'actualisation), les coûts de l'énergie sur la durée de vie des procédés, les équipements et les systèmes d'utilité doivent être évalués. Fréquemment, les coûts énergétiques peuvent être considérés comme constituant la majeure partie du total des coûts de propriété (TCO), ou des coûts sur la durée de vie pour cette usine ou cette installation, comme illustré pour des équipements industriels types sur la Figure 2.3 ci-dessous.

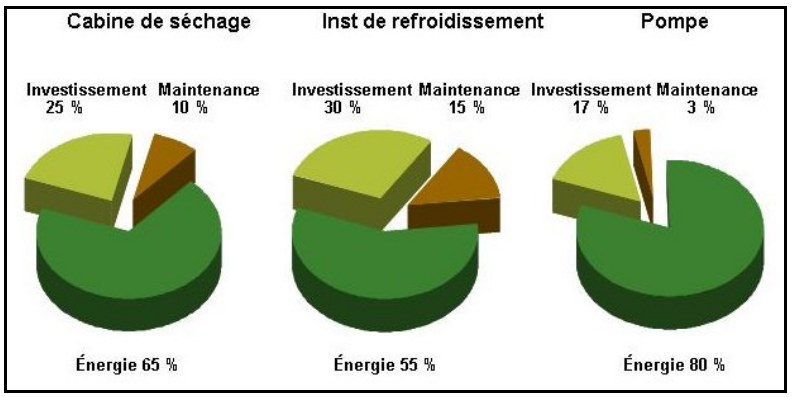


Figure 2.3 : Exemples de total des coûts de propriété pour des équipements industriels types (sur une durée de vie de 10 ans)

L'expérience montre que, si l'efficacité énergétique est prise en compte au cours des phases de planification et de conception d'une nouvelle installation, les potentiels d'économie sont supérieurs et les investissements nécessaires pour permettre ces économies sont bien moindres, par comparaison avec l'optimisation d'une installation en exploitation commerciale. Ceci est illustré sur la Figure 2.4 ci-dessous.

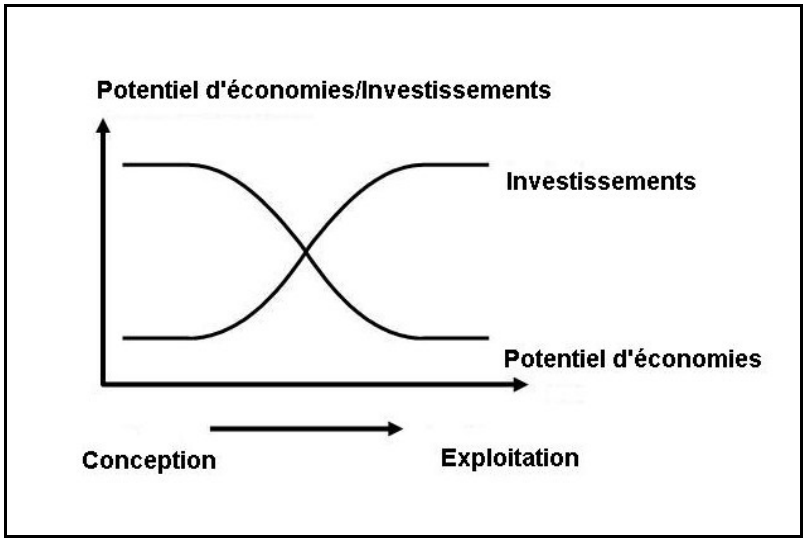


Figure 2.4 : Potentiels d'économie et investissements dans la phase conception par rapport à la phase opérationnelle

Une conception efficace sur le plan énergétique utilise les mêmes connaissances techniques et les mêmes activités et méthodologies que la réalisation d'audits énergétiques sur des sites existants. La principale différence provient du fait que des domaines tels que les paramètres de conception de base, la sélection du procédé à utiliser (voir Section 2.3.1) et les principaux équipements du procédé, etc., peuvent être traités dans la phase conception comme illustré sur la Figure 2.5 ci-dessous. Il est ainsi possible de choisir les technologies les plus efficaces sur le plan énergétique. Ces domaines sont souvent impossibles à traiter ou du moins très onéreux sur une usine en exploitation commerciale.

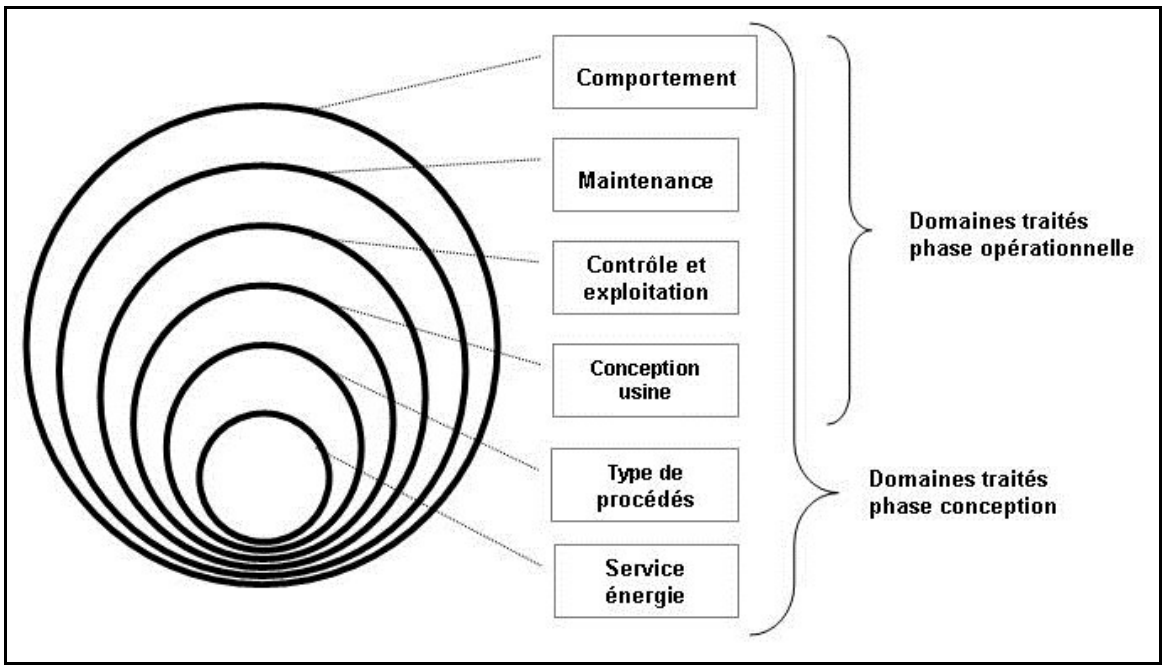


Figure 2.5 : Domaines à traiter en phase de conception plutôt qu'en phase opérationnelle

Les domaines types dans lesquels il est possible de traiter et d'analyser des services énergétiques et le besoin réel en énergie sont les suivants :

- la détermination du flux d'air requis dans des installations CVC planifiées (chauffage, ventilation et climatisation) : que peut-on faire pour réduire le débit d'air dans les systèmes CVC centraux ? (voir Section 3.9).
- la définition de la température basse nécessaire pour la saumure dans un système de refroidissement : quels procédés doivent être remplacés ou optimisés afin de réduire la charge de refroidissement et d'augmenter la température de la saumure ?
- la détermination de la charge de chauffage dans un procédé de séchage : quels paramètres du procédé et quels principes opérationnels de l'usine peuvent être modifiés afin de minimiser la charge thermique ? (voir Section 3.11).
- la nécessité d'utiliser de la vapeur dans une usine de traitement ? Pourrait-on utiliser de l'eau chaude et utiliser ainsi la chaleur perdue à des fins de chauffage ? (voir Section 3.2)
- la pression nécessaire pour l'air comprimé : peut-on réduire la pression ou le système peut-il être divisé en un système haute pression et un système basse pression ? (voir Section 3.7).

La réponse à ces questions peut paraître simple, mais de nombreux points sont à étudier pour obtenir une vision claire quant aux économies potentielles.

L'expérience montre que les économies les plus importantes sont obtenues par des réalisations nouvelles et des modernisations de grande ampleur, ce qui n'empêche pas, toutefois, d'appliquer cette technique dans la planification et la conception d'une rénovation, d'une modernisation ou d'une réhabilitation importante. La méthodologie du pincement peut être employée pour apporter des réponses à quelques-unes de ces questions, lorsqu'il existe à la fois des flux chauds et des flux froids dans une unité ou une installation (voir Section 2.12).

L'expérience montre de nouveau que les calendriers des processus de planification et de conception sont très exigeants et qu'ils sont fréquemment trop justes, souvent au point de ne prévoir aucun temps (ou ressources) pour d'autres analyses des potentiels d'économie. En conséquence, une démarche EED (efficacité énergétique à la conception) doit étroitement suivre les activités de planification et de conception d'un processus de construction type comme illustré dans le Tableau 2.2 ci-dessous.

Phase de construction	**Activité EED** (efficacité énergétique à la conception)
Conception pratique/ conception théorique	• collecte systématique des données sur l'utilisation de l'énergie dans les nouvelles installations • évaluation des besoins énergétiques réels • évaluation des coûts de l'énergie sur la durée de vie • vérification des paramètres de conception de base ayant une influence sur la consommation d'énergie • identification des principales personnes et parties qui ont une influence sur l'efficacité énergétique des nouvelles installations • minimisation des services énergétiques • introduction de la meilleure technologie disponible
Conception détaillée	• conception d'installations et systèmes d'utilités optimaux • évaluation des besoins pour le contrôle et l'instrumentation • systèmes d'intégration/de récupération de chaleur (Méthode du pincement) • minimisation des pertes de pression, de température, etc. • sélection de moteurs, entraînements, pompes, etc. à rendement élevé. • spécifications supplémentaires dans les dossiers d'appel d'offres concernant l'efficacité énergétique
Appel d'offres	• demander aux soumissionnaires et aux constructeurs des solutions plus efficaces sur le plan de l'énergie • contrôle qualité des conceptions et des spécifications des installations dans les appels d'offres
Construction et érection	• contrôle qualité des spécifications relatives aux équipements installés par comparaison aux équipements spécifiés dans les appels d'offres
Mise en service	• optimisation des procédés et des utilités selon les spécifications
Phase d'exploitation	• audits énergétiques • management de l'énergie

Tableau 2.2 : Exemples d'activités liées à la prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception d'un nouveau site industriel

L'évaluation des « besoins énergétiques réels » est fondamentale dans une démarche EED (efficacité énergétique à la conception) et occupe une place centrale dans l'identification des domaines les plus attractifs à traiter au cours des étapes ultérieures du processus de planification et de conception. En théorie, cette séquence d'activités peut être utilisée à la fois pour la conception d'usines de traitement complexes et pour fournir des machines et des installations simples. Les investissements majeurs planifiés et budgétés doivent être identifiés, par exemple, à l'occasion d'un bilan annuel de gestion, de même que la nécessité d'une attention spécifique à accorder à l'efficacité énergétique.

Avantages obtenus pour l'environnement

La méthodologie EED (efficacité énergétique à la conception) cible le potentiel maximum d'économie d'énergie dans l'industrie et permet l'application de solutions efficaces sur le plan énergétique qui ne sont pas nécessairement réalisables dans les études de modernisation. On a pu obtenir des économies de 20 à 30 % sur la consommation d'énergie totale dans un grand nombre de projets. Ces montants sont nettement supérieurs à ceux obtenus avec des audits énergétiques des usines en exploitation.

Effets croisés

Aucun effet croisé anticipé émanant d'une approche de conception intégrée.

Données opérationnelles

Certains exemples de résultats émanant d'une prise en compte de l'efficacité énergétique au niveau de la conception (EED) dans différents secteurs industriels sont présentés dans le Tableau 2.3, ci-dessous.

Société	Économies (EUR/an)	Économie (%)	Investissements (EUR)	Retour sur investissement (ans)
Ingrédients alimentaires : • nouveaux concepts de refroidissement • changement de procédé de fermentation • CVC réduit dans les zones d'emballage • récupération de chaleur des fermenteurs • nouveaux principes d'éclairage	130000	30	115000	0,8
Sucreries : • amélioration du contrôle du procédé de séchage • optimisation du circuit de refroidissement • réduction du séchage infrarouge des produits • réduction de la pression de l'air comprimé • source de chaleur moins onéreuse (chauffage urbain)	65000	20	50000	0,7
Repas prêts à consommer : • changement de source de chaleur pour les fours • nouvelle technologie de congélation • nouveau concept de récupération de la chaleur • optimisation des usines de refroidissement par NH_3 • optimisation des échangeurs de chaleur	740000	30	1500000	2,1
Plastiques : • nouveau concept de refroidissement (refroidissement naturel) • récupération de chaleur pour le chauffage des bâtiments • réduction de la pression de l'air comprimé • réductions des systèmes CVC	130000	20	410000	3,2

Abattoir : • récupération de chaleur globale • optimisation des procédés de nettoyage • réduction de la charge de congélation et de refroidissement • amélioration du contrôle des procédés de refroidissement • utilisation de suif pour le chauffage des locaux	2000000	30	5000000	2,5

Tableau 2.3 : Économies obtenues et investissements dans cinq projets pilotes de prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED)

Par comparaison aux audits énergétiques traditionnels, le rapport socio-économique total entre les coûts et les avantages pour les économies réalisées grâce à une prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) est 3 à 4 fois supérieur.

Il est recommandé que les travaux de prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) soient réalisés dans un certain nombre de phases du projet, par exemple :

1. Évaluation des données de consommation d'énergie et des zones d'intérêt
2. Minimisation du service d'énergie et application des MTD
3. Fourniture des données sur la conception de l'usine, le contrôle et l'instrumentation
4. Assurance qualité des offres
5. Suivi.

Chaque phase de projet doit conduire à des sorties spécifiques pour permettre à l'exploitant de décider des études à réaliser ultérieurement.

Afin d'obtenir le meilleur résultat possible d'un travail de prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED), les critères ci-après sont importants :

- même si les besoins d'investissement ne sont pas encore bien définis dès les premiers stades de la conception, qu'elle soit théorique ou pratique, l'efficacité énergétique doit être prise en compte à ce stade pour parvenir aux économies maximum et pour ne pas retarder le processus de conception ;
- toutes les données relatives à la consommation d'énergie et tous les coûts sur la durée de vie doivent être calculés ou mis à disposition dès les premiers stades de la conception, qu'elle soit théorique ou pratique. Il est très important que toutes les données de consommation d'énergie soient évaluées par la personne responsable de la prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED). Souvent, les fournisseurs et les fabricants ne peuvent pas (ou ne veulent pas) fournir de données à ce stade, aussi, si ces données ne sont pas disponibles, elles doivent être évaluées par d'autres moyens. La collecte des données peut devoir être réalisée en tant que partie du projet de conception ou séparément ;
- les travaux de prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) doivent être réalisés par un expert en énergie indépendant de l'organisation de conception comme illustré sur la Figure 2.6 ci-dessous, en particulier pour les industries qui consomment peu d'énergie (voir la rubrique Applicabilité).

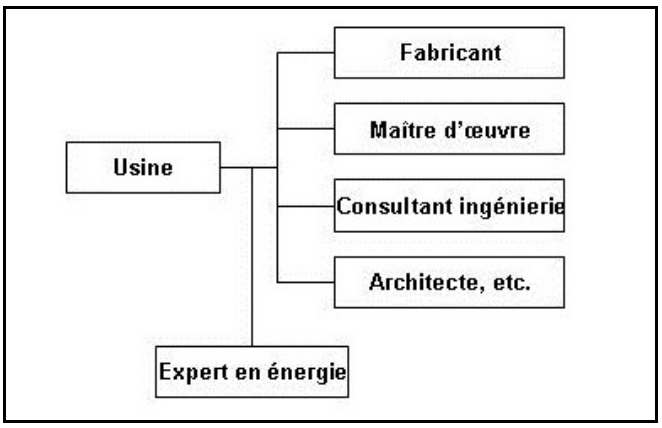


Figure 2.6 : Organisation recommandée, incluant un expert en énergie dans la planification et la conception de nouvelles installations

- outre la consommation d'utilisation finale, la cartographie initiale de la consommation énergétique doit aussi permettre de déterminer quelles sont les parties intervenant dans l'organisation du projet qui influeront sur la consommation énergétique future. Il peut s'agir, par exemple, du personnel de l'installation existante chargé de déterminer les paramètres d'exploitation. A titre d'exemple, le personnel (par exemple, le personnel opérationnel et technique) dans l'usine (existante) est souvent responsable de la spécification du ou des paramètre(s) de conception les plus importants afin d'optimiser une réduction de l'efficacité énergétique de la future usine ;
- une évaluation du risque des appels d'offre et d'autres données doit permettre de clarifier et d'identifier les fabricants qui ne tireront pas avantage de l'optimisation de l'efficacité énergétique des produits qu'ils livrent pour le projet. Par exemple, une forte concurrence basée sur les prix pousse souvent les fabricants des usines à utiliser des composants peu onéreux, à minimiser les échangeurs de chaleur, etc. ce qui se traduit par une augmentation des coûts d'exploitation sur la durée de vie de l'usine ;
- d'autre part, l'identification de l'efficacité énergétique en tant que facteur clé dans la procédure d'appel d'offres pour de nouvelles usines et installations, ou pour des reconstructions, (et sa pondération en conséquence) va favoriser la ou les options les plus efficaces sur le plan de l'énergie.

Il est important d'insister sur le fait que les travaux de l'EED (efficacité énergétique à la conception) sont souvent multidisciplinaires et que l'expert en énergie (indépendant ou interne) ne doit pas uniquement être capable sur le plan technique mais doit avoir une grande expérience professionnelle acquise avec des organisations complexes et avec des problèmes techniques complexes.

Applicabilité

La prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) s'est avérée être l'une des manières ayant le meilleur rapport coût-efficacité et des plus attrayantes pour améliorer l'efficacité énergétique dans l'industrie ainsi que dans d'autres secteurs grands consommateurs d'énergie. Son application a été couronnée de succès dans la plupart des secteurs industriels et des économies ont été introduites au niveau de l'installation, dans des unités de traitement et des systèmes d'utilité.

Une importante barrière entravant le succès réside dans le fait que les fabricants (en particulier ceux des industries qui consomment peu d'énergie) sont souvent conservateurs ou peu désireux de modifier une conception type ayant fait ses preuves et/ou de mettre à jour des garanties de produits, etc. D'autre part, il est souvent impossible de déterminer toutes les conséquences d'un changement, notamment en ce qui concerne la qualité et le rendement. Certains systèmes de gestion, tels que le TQM (management de la qualité totale) empêchent le fabricant d'effectuer des changements susceptibles d'affecter la qualité du produit.

Il est important que les travaux de prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) soient initiés dès les premiers stades de la conception théorique et soient bien organisés de manière à éviter des retards dans le processus de planification et de conception.

Bien que la prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) se centre principalement sur des technologies et des principes bien connus, des nouvelles technologies ou des solutions plus complexes sont souvent introduites, ce qui doit être considéré comme un risque si l'on se place du point de vue du client.

Les industries qui consomment beaucoup d'énergie (telles que les industries chimiques, les raffineries, l'incinération des déchets ou les aciéries) ont émis les remarques ci-après concernant le recours à un expert indépendant (externe à la société) spécialisé dans le domaine de la conception avec intégration de l'efficacité énergétique :

- les industries grandes consommatrices d'énergie comptent parmi leur personnel des experts spécialisés dans le domaine de la conception avec intégration de l'efficacité énergétique : c'est principalement pour se protéger de la concurrence et préserver le caractère confidentiel des conceptions qu'elles évitent de faire appel à des experts externes
- l'efficacité énergétique peut être intégrée au cahier des charges de l'appel d'offres pour les fabricants et les fournisseurs d'équipements (l'efficacité énergétique devrait faire partie des spécifications de l'appel d'offres, voir évaluation des risques des appels d'offres, dans la rubrique Données opérationnelles, ci-dessus). C'est pourquoi les fabricants sont sensibles à l'efficacité énergétique et établissent régulièrement des analyses comparatives de leurs produits
- Dans les procédures d'appel d'offres pour les usines et les systèmes complexes où l'utilisation de l'énergie ou la production d'énergie sont critiques, les appels d'offres sont habituellement évalués par des experts en énergie mandatés par le client.

Aspects économiques
Les honoraires pour un expert en énergie indépendant peuvent se monter à un pourcentage de l'ordre de 0,2 à 1 % de l'investissement planifié, en fonction de l'importance et de la nature de la consommation d'énergie. Il est difficile d'évaluer les coûts lorsque la prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) est conduite par le fabricant d'une installation dans une usine de traitement ou par une équipe interne.

Dans de nombreux cas, outre les économies d'énergie, le processus de prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) se traduit par des investissements moindres, étant donné que les services énergétiques de base peuvent être minimisés (tels que refroidissement, chauffage, système à air comprimé, etc.).

La démonstration a été faite qu'une usine de traitement bien conçue offre une capacité supérieure à celle d'une usine de conception traditionnelle dans la mesure où les équipements clés comme les échangeurs de chaleur, etc. ont de meilleures performances pour minimiser les pertes d'énergie.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Pour l'EED (efficacité énergétique à la conception), les principaux agents moteurs sont :

- une réduction des coûts de fonctionnement
- le recours à des technologies nouvelles (opportunité pour mettre en œuvre des MTD)
- des usines bien conçues grâce à une amélioration des méthodes et des données de conception.

Parmi les avantages rapportés, on peut également citer une augmentation de la capacité de traitement, une réduction des gaspillages et une amélioration de la qualité des produits (voir Section 2.3.1).

Exemples
Un certain nombre (10) de projets pilotes officiels danois ont été mentionnés, par exemple :

- Un nouvel abattoir à Danish Crown, Horsens, Danemark (www.danishcrown.com). Cet abattoir est le plus grand de l'UE–25, et son exploitant possédait une grande expérience en matière de gestion de l'énergie car celle-ci représentait une part élevée des coûts de fonctionnement. Néanmoins, une étude externe du projet initial menée selon la démarche EED (efficacité énergétique à la conception) a identifié des économies d'énergie supplémentaires de plus de 30 %, sur la durée de vie
- une nouvelle usine de plats préparés à Danpo, Farre, Danemark (www.danpo.dk)
- une nouvelle usine d'ingrédients à Chr. Hansen, Avedøre Holme, Danemark (www.chrhansen.com)

Des rapports officiels (en danois) concernant ces projets peuvent être obtenus auprès de l'Agence danoise de l'énergie (www.ens.dk).

La conception des logements pour animaux est incluse dans les MTD pour l'efficacité énergétique dans les élevages intensifs de volailles et de porcs BREF ILF (Élevage intensif de volailles et de porcs) [173, EIPPCB, 2003].

- Une nouvelle usine d'amidon de pommes de terre, Karup Kartoffelmelfabrik, Danemark (un projet LIFE de l'UE).

Un projet EED réalisé en externe pour une société pharmaceutique en Irlande a identifié des possibilités d'économies d'énergie de 64 %, sur la durée de vie. Malheureusement, la démarche EED a été commencée trop tard pour inclure toutes les mesures ; environ la moitié des économies potentielles ont néanmoins pu être concrétisées.

Références bibliographiques
La Confédération des ingénieurs consultants (FRI) a réalisé une étude exhaustive pour mettre au point des méthodologies et des directives dans le domaine de la conception efficace sur le plan énergétique. Cette documentation (en danois) peut-être commandée à l'adresse suivante : www.frinet.dk.

Le Danish Agreements Scheme a décrit un certain nombre de cas et de méthodologies à suivre par les principales industries consommatrices d'énergie (en danois), voir www.end.dk.
[172, Maagøe Petersen, 2006]

BREF ILF 2003 (Élevages intensifs de volailles et de porcs, Section 5.2.4 et Section 5.3.4.
Référence du projet d'amidon de pommes de terre : LIFE04ENV/DK/67 [174, CE, 2007]
http ://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/

2.3.1 Sélection de la technologie des procédés

Description
Le choix d'une technologie de procédé énergétiquement efficace est un élément clé d'une conception efficace au plan de l'énergie qu'il faut mettre en lumière, étant donné qu'habituellement on n'étudie le choix d'une technologie de procédé que dans le cadre d'une construction nouvelle ou d'une modernisation de grande ampleur. Dans de nombreux cas, il peut s'agir là de la seule occasion de mettre en œuvre les options les plus efficaces en matière d'économie d'énergie. Une bonne pratique consiste à suivre les évolutions technologiques dans le procédé considéré (voir Section 2.1 (k)).

Il est difficile de formuler des généralités sur le choix des technologies de procédé qui couvrent toute l'étendue des secteurs IPPC ; on a donc retenu les quatre industries différentes illustrées ci-dessous, par des exemples.

Il existe d'une manière générale diverses options pour changer de technologie de procédé :

- changer la science du procédé
- changer l'équipement du procédé
- changer à la fois l'équipement et la science

Il peut y avoir plusieurs étapes de traitement faisant appel à différentes technologies, par exemple il peut y avoir création de produits intermédiaires qui sont ensuite traités plus avant. Une ou plusieurs de ces étapes peuvent être modifiées à l'occasion de la construction d'une nouvelle usine ou d'une réhabilitation de grande envergure. En règle générale, les meilleurs résultats sont obtenus lorsque tout le procédé est remplacé, ce qui permet d'étudier de nouvelles voies pour arriver au produit final.

Avantages obtenus pour l'environnement
En fonction du procédé : un changement de procédé peut être à l'origine d'importantes économies d'énergie, d'une réduction de la quantité de déchets et/ou de la dangerosité de leur contenu, d'une réduction d'autres émissions telles que les solvants, etc. Voir Exemples.

Effets croisés
En fonction du procédé. Voir la rubrique Exemples.

Données opérationnelles
En fonction du procédé. Voir la rubrique Exemples.

Applicabilité
En fonction de l'installation. Voir la rubrique Exemples.

Aspects économiques
En fonction du procédé. Voir la rubrique Exemples.

Agent moteur pour la mise en œuvre
En fonction du procédé : ils peuvent concerner une réduction des coûts, une augmentation des rendements, une amélioration de la qualité des produits (par exemple stéréospécificité) une réduction du nombre de sous-produits, une diminution de la toxicité des déchets, etc.

Pour les catalyseurs :

- la nécessité d'une sélectivité de produits, dans certains cas
- certaines réactions ne peuvent se produire sans catalyseur (bien qu'une réaction soit possible selon les calculs thermodynamiques).

Exemples
Les exemples de l'Annexe 7.5 sont les suivants :

1. Utilisation des catalyseurs dans les réactions chimiques. Les catalyseurs peuvent réduire l'énergie d'activation et, en fonction de la réaction, réduire l'apport d'énergie thermique nécessaire. Les catalyseurs sont utilisés depuis de nombreuses années, mais les recherches se poursuivent dans tous les domaines. Actuellement, il existe un grand intérêt pour les approches biotechnologiques comme la biocatalyse et pour son rôle dans la chimie organique, les produits pharmaceutiques, les biocarburants. Annexe 7.5, Exemple 1 : production enzymatique d'acrylamide (Mitsubishi Rayon, Japon).
2. Utilisation d'encres durcies par rayonnement ou de systèmes de peinture à la place des systèmes à base de solvants classiques, Annexe 7.5, Exemple 2

3. Récupération de chaleur appliquée à des systèmes de chauffage sous le sol dans les bâtiments d'élevage intensif Annexe 7.5, Exemple 3.

Un autre exemple est la nouvelle usine d'amidon de pomme de terre, Karup Kartoffelmelfabrik, Danemark (un projet LIFE de l'UE).

Références bibliographiques
[164, OCDE, 2001, 173, EIPPCB, 2003, 175, Saunders_R., 2006]
Référence du projet d'amidon de pommes de terre : LIFE04ENV/DK/67 [174, CE, 2007];
http ://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/
[257, Clark, 2006]

2.4 Intégration accrue des procédés

Description
Intensification de l'utilisation de l'énergie et des matières premières en optimisant leur utilisation par plusieurs procédés ou systèmes.

Elle est propre au site et au procédé, mais elle est illustrée dans des exemples (ci-dessous).

Avantages obtenus pour l'environnement
Les avantages obtenus sont un ou plusieurs des avantages ci-après :

- amélioration de l'efficacité énergétique,
- amélioration du rendement des matières y compris des matières premières, de l'eau (comme l'eau de refroidissement et l'eau déminéralisée) et d'autres utilités,
- réduction des émissions dans l'air, le sol (par ex. décharge) et dans l'eau.

Il existe d'autres avantages qui sont propres à chaque site.

Effets croisés
Aucun selon toute vraisemblance.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
Elle est généralement applicable, en particulier si les procédés sont déjà interdépendants. Toutefois, les options d'amélioration sont fonction de chaque cas particulier.

Sur un site intégré, il convient de tenir compte du fait que les changements apportés dans une unité sont susceptibles d'avoir une incidence sur les paramètres d'exploitation des autres unités. Ceci s'applique aussi aux changements des facteurs déterminants pour l'environnement.

Agent moteur pour la mise en œuvre
- Avantages en termes de coûts.
- Les autres avantages sont fonction du site.

Aspects économiques
Les avantages en termes de coûts découlant des économies d'énergie et des économies d'autres matières premières sont propres à chaque cas.

Exemples
1. L'usine de Grande Paroisse, Rouen, France est parvenue à des économies de coûts d'exploitation de plus de 1000 000 EUR /an. Dans l'usine de l'exemple (voir le BREF LVIC-AAF (Chimie inorganique – ammoniac, acides et engrais), Section 1.4.1), l'intégration de

l'acide nitrique et des unités de nitrate d'ammonium a été améliorée (AN : nitrate d'ammonium (NH_4NO_3)). Les mesures qui ont été mises en œuvre sont les suivantes :

- Le NH_3 gazeux, (surchauffé) est une matière première courante. Les deux installations peuvent se partager l'utilisation d'un vaporiseur de NH_3. alimenté avec de la vapeur du procédé provenant de l'unité de nitrate d'ammonium
- La vapeur basse pression disponible dans l'usine de nitrate d'ammonium peut être utilisée pour surchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière (BFW) de 43 ºC à environ 100 ºC par le biais de deux échangeurs de chaleur
- L'eau d'alimentation de la chaudière (BFW) chaude peut ensuite être utilisée pour préchauffer les gaz résiduaires de l'unité d'acide nitrique
- Le condensat du procédé issu de l'unité de nitrate d'ammonium est recyclé vers une colonne d'absorption de l'unité d'acide nitrique.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- amélioration de l'efficacité énergétique,
- diminution de la consommation d'eau déminéralisée,
- réduction des investissements grâce à l'utilisation en partage du vaporiseur d'ammoniac.

2. Nouvelle usine d'amidon de pommes de terre, Karup Kartoffelmelfabrik, Danemark (projet LIFE de l'UE).

Références bibliographiques

1. [154, Columbia_Encyclopedia]
2. [221, Yang W., 25 May 2005,]

Référence du projet d'usine d'amidon de pommes de terres : LIFE04ENV/DK/67 [174, EC, 2007]; http ://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/

2.5 Maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique

Description

Plusieurs problèmes relatifs au maintien de la dynamique et à la fourniture de programmes d'efficacité énergétique ont été identifiés. Il y a lieu de vérifier si les économies inhérentes à l'efficacité énergétique grâce à l'adoption d'une nouvelle technologie ou technique s'inscrivent dans la durée. Il n'est pas tenu compte des « glissements » induits par des défauts de fonctionnement ou l'entretien des équipements, etc.

Les problèmes identifiés (certaines des techniques à même de les surmonter sont décrites dans d'autres sections, voir ci-dessous) sont les suivants :

- l'évolution des stratégies peut être vue en termes de cycle de vie, pendant lequel les stratégies mûrissent. Elles nécessitent d'être revues (après une durée suffisamment longue pour permettre une évaluation de leur efficacité : cela peut prendre plusieurs années) afin de s'assurer qu'elles restent pertinentes en termes d'objectif assigné et de méthode d'intervention ;
- dans certains domaines, les indicateurs de l'efficacité énergétique peuvent encore être en cours de mise au point (voir Section 1.3.3. pour plus de détails sur les difficultés) ;
- la gestion et la promotion de l'efficacité énergétique sont difficiles lorsqu'il n'existe pas d'outil de mesure adéquat ;
- alors que l'efficacité énergétique d'un équipement ou d'unités peut être relativement bien appréhendée, des indicateurs d'efficacité énergétique exacts constituent un problème pour

des systèmes intégrés : de nombreux facteurs contribuent simultanément à la mesure et il est difficile de définir le périmètre sur lequel porte la mesure (voir Sections 1.4 et 1.5) ;
- l'efficacité énergétique est souvent considérée comme faisant partie des frais fixes ou des frais généraux, et souvent avec une ligne budgétaire (ou un centre budgétaire) différente de la production ;
- il est nécessaire d'avoir une activité de mise à jour inhérente à la stratégie, qui consiste à vérifier la pertinence des communications, en actualisant les informations qu'elles contiennent et en surveillant leur impact. À cette fin, il est possible d'utiliser des méthodes de communication interactives, etc. (voir Section 2.7) ;
- il est nécessaire de soutenir la recherche de gains en efficacité énergétique et d'entretenir les bonnes pratiques jusqu'à enraciner celles-ci dans la culture (d'une installation) ;
- la « passivité » du point de vue du management, altère l'enthousiasme avec lequel se propage la démarche (voir aussi Sections 2.6 et 2.7) ;
- la formation et le développement permanent à tous les niveaux du personnel (voir aussi Section 2.6) ;
- les développements technologiques (voir Sections 2.2.1, 2.2.2, 2.3, etc.).

Les techniques susceptibles d'accroître la dynamique des programmes d'efficacité énergétique sont les suivantes :

- mise en œuvre d'un système spécifique de management de l'efficacité énergétique (voir Section 2.1) ;
- comptabilisation de l'utilisation de l'énergie sur la base de valeurs réelles (mesurées) et non à partir d'estimations ou de fractions forfaitaires de la consommation globale du site ; la responsabilité en matière d'efficacité énergétique incombe ainsi à l'utilisateur/celui qui paie la facture, et c'est également à lui qu'en revient le mérite. (voir Sections 2.10.3 et 2.15.2) ;
- création de centres de profit en matière d'efficacité énergétique dans l'entreprise (sous forme d'équipe ou de centre budgétaire), de sorte que les investissements et les économies d'énergie (ou la réduction des coûts énergétiques) figurent dans un même budget et que les responsables de l'efficacité énergétique puissent prouver à leur direction générale qu'ils sont capables de générer des profits au bénéfice de l'entreprise. On peut démontrer que les investissements au titre de l'efficacité énergétique sont assimilables à des ventes supplémentaires de biens produits (voir la rubrique Exemples, ci-dessous) ;
- nouvelle façon d'appréhender les systèmes de management existants, par exemple en pratiquant « l'excellence opérationnelle » (décrite dans les exemples, ci-dessous) ;
- récompenser les résultats obtenus grâce à l'application des meilleures pratiques ou MTD ;
- recours à des techniques de gestion des changements organisationnels (également une caractéristique de « l'excellence opérationnelle »). La résistance au changement est inhérente à la nature humaine à moins de pouvoir montrer les aspects positifs du changement à venir à la personne chargée sa mise en œuvre. Le calcul des bénéfices (en ligne ou hors ligne, par exemple scénarios de simulation) que l'on est en droit d'attendre des options et leur diffusion effective peuvent contribuer à créer la motivation pour le(s) changement(s) nécessaire(s). Pour un exemple de communication de données, voir Section 2.15.2.

Avantages obtenus pour l'environnement
Excellence opérationnelle : conservation ou amélioration de la dynamique des programmes d'efficacité énergétique. Comme il s'agit d'une approche holistique, elle améliore aussi l'application d'autres mesures environnementales.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
Voir les rubriques Description et Exemples.

Applicabilité
Les techniques à prendre en compte sont fonction du type et de la taille de l'installation. Par exemple :

- un SM2E est adapté dans tous les cas (voir Section 2.1) bien que, une fois encore, la complexité soit proportionnelle à la taille et au type du site ;
- une formation adéquate peut être trouvée pour les types d'installation (voir Section 2.6) ;
- le coût d'un avis indépendant sur les programmes d'efficacité énergétique, en particulier pour les petites et moyennes entreprises, peut être subventionné dans les États membres, par des organismes publics (voir Section 2.6) ;
- l'excellence opérationnelle a été utilisée avec succès dans de grandes sociétés, multi-site ;
- les principes d'un SM2E et de l'excellence opérationnelle ont des domaines d'application très étendus.

Une recherche de l'efficacité énergétique à une échelle trop réduite peut antinomique avec l'efficacité du site et se traduire par une sous-optimisation (comme dans les techniques énumérées ci-dessus, la quantification directe au niveau utilisateur).

Aspects économiques
Voir la rubrique Exemples. Pour le SM2E, voir Section 2.1.
Pour l'excellence opérationnelle, faible investissement en capital, pour des retours importants.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Réduction des coûts. Comme il s'agit d'une démarche holistique, elle améliore aussi l'application d'autres mesures de contrôle de la production, ce qui se traduit par une réduction du gaspillage, et des durées de cycle réduites, etc.

Exemples
Excellence Opérationnelle
L'excellence opérationnelle (également dénommée OpX), est une approche holistique de la gestion systématique de la sécurité, la santé, l'environnement, la fiabilité et de l'efficacité. Elle intègre des méthodologies de gestion des opérations telles que la « Production allégée » (Lean manufacturing) ou « Six Sigma » avec une gestion du changement pour optimiser la manière dont le personnel, les équipements et les procédés fonctionnent ensemble. Y sont associées des formules comme « l'état ou la situation de supériorité dans les opérations et l'exécution des procédés », et « réaliser des performances à l'échelle mondiale ».

Elle consiste à affiner sans cesse les procédés opérationnels critiques en insistant sur la réduction du gaspillage et de la durée des cycles par un mélange de techniques, telles que la méthodologie des 5 S, la méthode de prévention des erreurs ou « Error-proofing », le déploiement de la fonction qualité (QFD), SPD, etc.

Les étapes suivies sont celles que l'on retrouve dans les systèmes de management de l'efficacité énergétique (voir Section 2.1), en mettant particulièrement l'accent sur :

- la définition des meilleures pratiques (les objectifs que tentent d'atteindre les équipes opérationnelles dans le cadre de l'exécution d'un procédé particulier à un niveau d'excellence) ;
- des descriptions détaillées de chaque meilleure pratique opérationnelle (y compris des changements et des améliorations) ;
- l'identification de l'instrumentation nécessaire pour mesurer les niveaux de performance opérationnelle ;
- les compétences clés que doit posséder le personnel d'exploitation pour être en mesure de mener à bien le procédé. ;

Les points clés consistent à faire appel à l'expertise interne, y compris à celles existant dans d'autres unités (ou sociétés associées), à former des équipes ad hoc pour identifier les meilleures

pratiques de travail, à travailler de concert avec du personnel appartenant à d'autres unités non optimisées, etc.

L'Annexe 7.4 présente des exemples de SM2E.

Création d'un centre de profit ou d'un centre budgétaire pour l'efficacité énergétique
Un exemple de centre de profit associé à l'efficacité énergétique dans une entreprise a montré que l'adjonction d'un variateur de vitesse (EVV) à une grosse pompe était l'équivalent d'une augmentation des ventes de 11 %.

Références bibliographiques
[176, Boden_M., 2007, 177, Beacock, 2007, 227, TWG]

2.6 Maintien de l'expertise – ressources humaines

Description
Le présent facteur est identifié dans les Sections 2.1 (d) (i) et (ii). Les effectifs en personnel qualifié ont été réduits dans pratiquement toutes les installations européennes au cours des dernières décennies. Il est parfois exigé du personnel existant d'être polyvalent et d'être compétent pour un large éventail de tâches et d'équipements. Alors que cette situation peut permettre de faire face à l'exploitation courante tout en conservant une certaine expertise dans certains domaines, elle peut entraîner au fil du temps une diminution des niveaux de spécialisation pour certains systèmes (par ex. pour des systèmes à air comprimé) ou certaines spécialités, telles que la gestion de l'énergie, et réduire les ressources en personnel à même de mener à bien des taches hors routine, telles que les audits énergétiques et les études de suivi.

L'activité de formation a été identifiée comme un facteur important pour la mise en œuvre des programmes d'efficacité énergétique et l'enracinement de l'efficacité énergétique dans la culture de l'entreprise ; elle comprend :

- des programmes de formation supérieure et professionnelle
- des opportunités de formation associées à des qualifications spécifiques et à des domaines professionnels de prédilection, et des possibilités pour suivre une formation adéquate dans les domaines professionnels, de gestion, administratifs et techniques
- une formation permanente dans le domaine de la gestion de l'énergie : tout le personnel de direction doit être sensibilisé à l'efficacité énergétique, et non pas seulement les responsables de l'énergie co-optés.

La « passivité » du point de vue du management, se répercute aussi sur l'enthousiasme avec lequel se propage l'adhésion au concept d'efficacité énergétique et avec lequel des mécanismes de ressources humaines peuvent promouvoir des changements positifs. Ceux-ci concernent notamment les rotations et les détachements de personnel, les compléments de formation, etc.

Afin de générer des économies d'énergie, les exploitants peuvent avoir besoin de ressources supplémentaires tant en effectifs qu'en niveaux de qualification.

Ces besoins peuvent être satisfaits en adoptant une ou plusieurs des options ci-après :

- recrutement de personnel qualifié et/ou formation du personnel,
- mise en disponibilité périodique du personnel pour effectuer des contrôles programmés ou spécifiques (sur leur installation d'origine ou sur d'autres, voir la rubrique Exemples, Section 2.5),
- partage des ressources internes entre les sites (voir la rubrique Exemples, Section 2.5),
- recours à des consultants dûment qualifiés pour les contrôles programmés,
- externalisation des systèmes et/ou fonctions spécialisés (voir Section 7.12).

La formation peut être dispensée en interne, par des experts externes, au moyen de cours formels ou dans le cadre de l'autoformation/développement personnel (entretien et amélioration des qualifications professionnelles propres grâce à un travail personnel). Le volume d'informations disponibles dans les États membres est considérable tant au niveau national que local, mais aussi sur Internet (par exemple, voir les liens et les références du présent document, et l'apprentissage en ligne (E-learning), ci-dessous). Des informations sont communiquées aux différentes organisations et associations professionnelles des divers secteurs et activités ou à d'autres organismes des États membres, par exemple en ce qui concerne l'efficacité énergétique dans l'élevage intensif, des informations peuvent être obtenues auprès du ministère de l'agriculture.

L'apprentissage en ligne portant sur la gestion de l'énergie et l'efficacité énergétique dans le secteur industriel est toujours en cours de développement. Il existe à travers le monde quelques sites opérationnels qui proposent un guide complet sur des sujets comme la gestion de l'énergie, l'efficacité énergétique, les meilleures pratiques, les audits énergétiques, les analyses comparatives, les listes de contrôle. Ces sites proposent, en général, une formation sur l'un ou l'autre de ces sujets ou peuvent s'adresser à des utilisateurs qui ne sont pas des industriels (par exemple des commerçants, des petites et moyennes entreprises, des particuliers). Il est souvent possible de trouver des données sur des thèmes particuliers (par exemple sur la vapeur, LVAC, élevage intensif de porcs), plutôt que des guides généraux ou des supports de cours sur les économies d'énergie ou l'efficacité énergétique.

Un cycle de formation débouchant sur le diplôme EUREM (European Energy Manager, Production) est un projet conduit dans le cadre du programme SAVE, et après un projet pilote couronné de succès, le projet a été élargi.

Avantages obtenus pour l'environnement
Favorise la promotion de l'efficacité énergétique.

Effets croisés
Aucun identifié.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée

Applicabilité
À tous les sites. Le volume et le type de formation dépend du type d'industrie concernée ainsi que de la taille et de la complexité de l'installation, et il existe des options adaptées aux petites installations. Il est intéressant de noter que même les sites atteignant des niveaux élevés d'efficacité énergétique ont pu bénéficier d'un supplément de ressources (voir Section 2.5).

Aspects économiques
Coûts du personnel supplémentaire ou des consultants. Certains États membres ont lancé des initiatives en matière d'efficacité énergétique avec octroi de subventions pour les services de conseil et/ou d'études indépendants (voir Annexe 7.13), en particulier pour les PME.

Voir EUREM, dans la rubrique Exemples, ci-dessous.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Économies de coût non réalisées, y compris dans les sociétés affichant déjà une bonne efficacité.

Exemples
Nombreux sont les exemples cités, où des experts externes sont appelés en renfort des ressources internes ; voir les références bibliographiques, notamment celle de l'Hôpital Atrium, Heerleen, Pays-bas ; Honeywell (voir Annexe 7.7.2)

Le projet pilote EUREM a permis de former 54 participants dans quatre pays (Allemagne, Autriche, Royaume-Uni et Portugal). L'enseignement comportait environ 140 heures de cours, plus environ 60 heures d'autoformation sur internet et une étude de faisabilité. Les économies réalisées par participant sont présentées dans le Tableau 2.4. En Allemagne (Nuremberg) la formation consistait en 6 mois de cours (les vendredis et les samedis toutes les 2 ou 3 semaines), et un travail de 3 à 4 mois portant sur un projet. Les coûts sont fonction des pays et des installations disponibles : environ 2100 EUR en Allemagne et 2300 EUR en Autriche. (Données pour 2005 - 2006). Les apports en matière d'efficacité énergétique grâce à ce projet sont présentés dans le Tableau 2.4.

	Prévu	**Obtenu**
Économies d'énergie par participant	400 MWh/an	1280 MWh/an
Économies de coût par participant	16000 EUR/an	73286 EUR /an
Période de retour sur investissement moyen (sur investissement requis)	-	3,8 ans
Retour sur investissement moyen (du coût direct de la formation, basé sur 230 jours de travail/an)		33 fois le coût de la formation (7 jours de travail)

Tableau 2.4 : Projet pilote EUREM : économie par participant

Apprentissage en ligne (e-learning)
Quelques possibilités gratuites sont :

- Programme conjoint de l'Agence de Protection de l'Environnement et du Ministère de l'économie des États-Unis (US EPA and DOE joint Programme) :
  - http ://www.energystar.gov/index.cfm?c=business.bus_internet_presentations
- Ressource RU :
  - http ://www.create.org.uk/

D'autres applications sont payantes et peuvent être partiellement financées par des agences nationales, par ex :

- http ://www.greenmatters.org.uk/
- http ://www.etctr.com/eetp/home.htm

Références bibliographiques
[161, SEI, 2006, 176, Boden_M., 2007, 179, Stijns, 2005, 180, Ankirchner, 2007, 188, Carbon_Trust_(UK), 2005, 227, TWG] [261, Carbon_Trust_UK, 2005], à l'adresse suivante :
http ://www.thepigsite.com/articles/5/housing-and-environment/1408/energy-use-in-pig-farming

2.7 Communications

Description
La communication est un outil important pour susciter la motivation que les entreprises modernes peuvent mettre à profit pour faciliter la mise en œuvre de nombreux types de démarches. Il est important d'informer le personnel sur l'efficacité énergétique et de systématiquement lui apporter un appui, de l'encourager et le motiver pour qu'il contribue à l'efficacité énergétique en économisant l'énergie, en évitant les consommations inutiles et en travaillant de manière efficace (voir Sections 2.5 et 2.6). De bonnes pratiques assurent une communication interne bilatérale efficace concernant les efforts à entreprendre pour atteindre l'efficacité énergétique et devraient permettre au personnel de formuler des recommandations et des observations etc. pour faciliter l'atteinte de l'efficacité énergétique.

La communication doit fournir au personnel des informations en retour concernant les performances de leur entreprise (et/ou de leur unité d'appartenance) et doit être mise à profit pour témoigner de la reconnaissance à ceux qui en sont les acteurs. Une communication bien structurée fournit le flux d'informations relatives aux objectifs, aux engagements ainsi qu'aux résultats obtenus.

Il existe divers moyens de communication possibles, tels que les newsletters, les journaux, les bulletins, les affiches, les briefings d'équipes, les réunions portant spécifiquement sur l'énergie, etc. L'utilisation des voies de communication déjà en place dans la société pour transmettre les données sur l'efficacité énergétique peut aussi en faire partie. Les données comprennent, en principe, les chiffres propres à la consommation d'énergie (quotidienne, hebdomadaire, mensuelle, et/ou annuelle) dans le temps ou en corrélation avec des paramètres importants, c'est-à-dire taux de production, conditions météorologiques (voir Sections 1.4 et 1.51). Elles peuvent être associées à des récits de parcours réussis dans des rapports publiés périodiquement. Les graphiques sont un excellent moyen pour communiquer des informations, y compris divers types de diagrammes, en présentant les réalisations accomplies en matière d'efficacité énergétique au fil du temps, ou en comparant diverses unités au sein de la société ou entre sites, etc. (voir par exemple Section 2.2.1).

La communication est importante, non seulement entre la direction (qui a pour tâche de définir des cibles) et le personnel qui œuvre pour les atteindre, mais aussi horizontalement entre les différents groupes de professionnels au sein d'une société, par exemple ceux qui sont responsables de la gestion de l'énergie, de la conception, de l'exploitation, de la planification et de la finance (voir Section 2.2.1). La Section 2.7.1 donne un exemple d'une technique utile afin de démontrer les flux d'énergie.

La communication est aussi utilisée pour encourager les échanges d'informations avec d'autres sociétés, pour échanger des idées sur les meilleures pratiques et pour faire connaître les réussites d'une société à l'autre, etc.

La communication et la motivation peuvent comprendre les actions suivantes :

- impliquer tout le personnel d'une société
- le fait d'impliquer plusieurs entreprises d'un même secteur (ou différentes unités au sein d'une même société) dans un groupe de travail (création d'un réseau énergie) pour qu'elles échangent leur expérience s'est avéré utile. Les sociétés doivent toutes être au même niveau de mise en œuvre de la gestion de l'énergie. Le travail en réseau est particulièrement utile pour résoudre des problèmes types, comme la définition d'un indice d'efficacité énergétique ou la mise au point d'un système de surveillance de l'énergie. Il peut également introduire un élément d'émulation par rapport à l'efficacité énergétique et offrir une plate-forme de négociation avec les fournisseurs potentiels d'équipements ou de services d'efficacité énergétique.
- afficher ostensiblement les effets positifs, par exemple grâce à un système de récompenses pour les meilleures pratiques, l'innovation et les meilleures réalisations.

Avantages obtenus pour l'environnement
Contribue à promouvoir l'efficacité énergétique.

Effets croisés
Aucun, selon toute vraisemblance.

Données opérationnelles
Dans bon nombre de sociétés, il existe de grands courants d'informations en provenance de divers secteurs, par exemple, santé et sécurité, efficacité de la production, pratiques d'exploitation, performance financière, etc. Nombreux sont les membres du personnel qui se plaignent d'être submergés par l'information. C'est pourquoi, la communication doit porter sur l'actualité récente. Il peut devenir nécessaire de modifier périodiquement les techniques de

communication et les données présentées (par exemple sous forme d'affiches) doivent être mises à jour régulièrement.

Applicabilité
La communication est applicable à toutes les installations. Sa nature et sa complexité varient en fonction du site, par exemple dans une petite installation, des réunions du personnel avec présentation orale de l'information peuvent convenir ; les grosses sociétés quant à elles diffusent souvent un journal interne.

Aspects économiques
Ils dépendent de la sophistication de l'approche et des canaux de communication existants. Elle peut être peu onéreuse, et le fait de s'assurer que le personnel participe à la mise en œuvre de l'efficacité énergétique peut avoir des retombées intéressantes en matière d'efficacité énergétique.

Agent moteur pour la mise en œuvre
La communication contribue à faire circuler les données sur l'efficacité énergétique et à consolider les économies de coût, etc.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[249, TWG, 2007]

2.7.1 Diagrammes de Sankey

Description
Un diagramme de Sankey est un graphique d'acheminement directionnel où la largeur des flèches est proportionnelle à la quantité d'écoulement. C'est une représentation graphique des flux tels que les transferts d'énergie ou de matières dans les systèmes de procédés ou entre procédés.

Les diagrammes de Sankey expliquent visuellement les données des flux massiques et énergétiques (et peuvent être utilisés pour visualiser les flux financiers) ; ils s'avèrent particulièrement utiles pour communiquer rapidement des données, notamment entre catégories de personnels ayant des parcours professionnels différents.

Les diagrammes de Sankey apportent une aide dans la communication et la motivation du personnel (voir Section 2.1) et contribuent à maintenir la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique (Section 2.5).

Des logiciels peu onéreux peuvent simplifier la présentation sous forme de diagrammes des données contenues par exemple dans des feuilles de calcul.

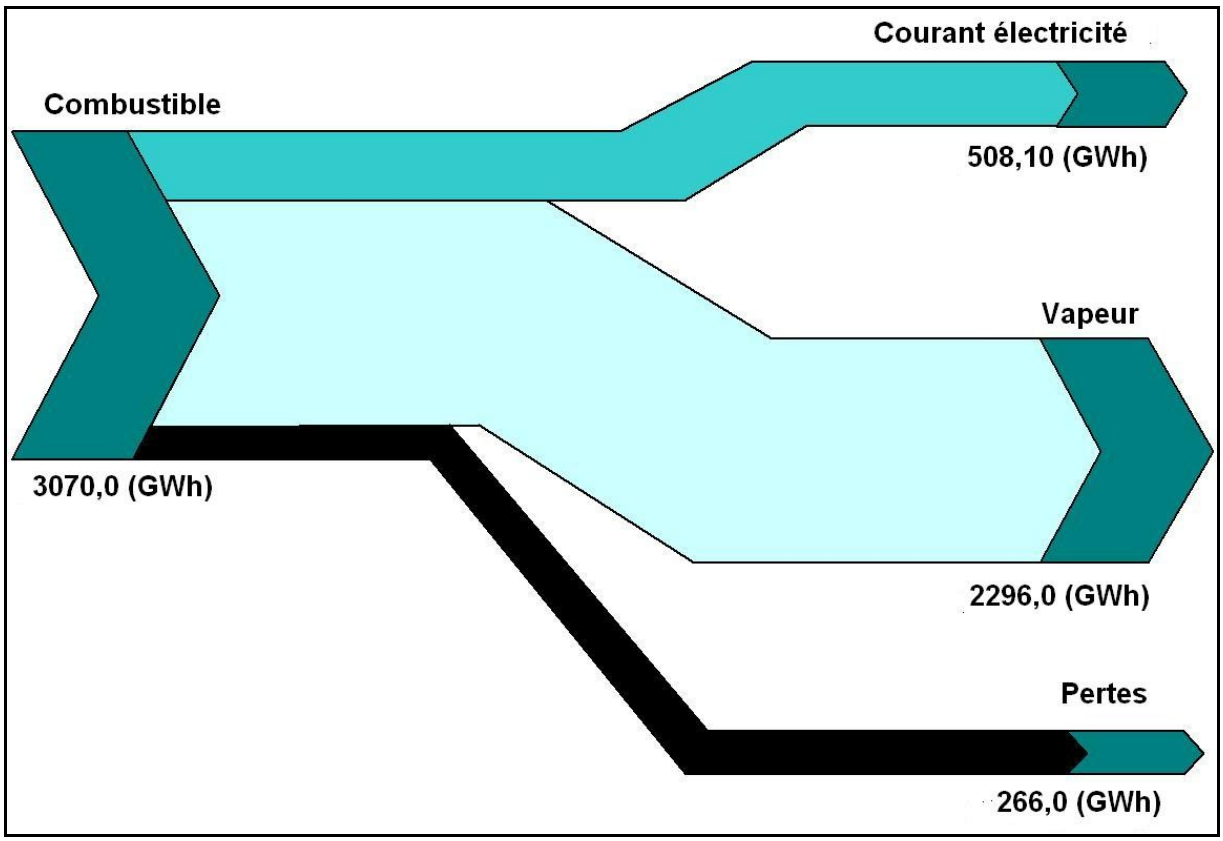


Figure 2.7 : Diagramme de Sankey : combustibles et pertes dans une usine type [186, UBA_AT]

Avantages obtenus pour l'environnement
Amélioration de la communication sur les questions d'efficacité énergétique.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
Voir la rubrique Description.

Applicabilité
À toutes les installations pour lesquelles il est nécessaire de visualiser les flux énergétiques.

Aspects économiques
Faible coût.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Facilite la communication des données relatives à l'efficacité énergétique.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
Un outil gratuit permettant de créer des diagrammes de Sankey à partir de MS Excel™ est disponible à l'adresse suivante : http://www.doka.ch/sankey.htm
[127, TWG, 153, Wikipedia, 186, UBA_AT]

2.8 Bonne maîtrise des procédés

2.8.1 Systèmes de contrôle des procédés

Description
Pour une bonne gestion de l'énergie, il est indispensable de disposer d'un système de contrôle des procédés et d'un système de contrôle des utilités. Un système de contrôle fait partie de la surveillance globale (voir Sections 2.10 et 2.15).

L'automatisation d'une installation de fabrication implique la conception et la réalisation d'un système de commande, avec des capteurs, des instruments, des ordinateurs et l'application d'un traitement de données. Il est bien connu que l'automatisation des procédés de fabrication est importante non seulement parce qu'elle améliore la qualité des produits et la sécurité des ateliers, mais aussi parce qu'elle améliore l'efficacité du procédé lui-même et contribue à l'efficacité énergétique.

Un contrôle de procédé efficace comprend :

- un contrôle adéquat de tous les modes d'exploitation des procédés, c'est-à-dire préparation, démarrage, fonctionnement de routine, fermeture et conditions anormales ;
- l'identification des indicateurs de performance clés ainsi que des méthodes pour mesurer et contrôler ces paramètres (par exemple, débit, pression, température, composition et quantité) ;
- établissement de dossiers et analyse des conditions de fonctionnement anormales afin d'en identifier les causes et de les traiter pour éviter que de tels incidents ne se reproduisent (ce qui peut être facilité par la mise en place d'une culture « sans blâme » dans laquelle l'identification des causes est plus importante que la distribution de blâmes aux individus).

<u>Planification</u>
Il y a plusieurs facteurs à prendre en considération dans la conception d'un système de contrôle. Une analyse initiale du système de procédé considéré peut mettre en lumière la présence de limitations à l'efficacité du procédé ainsi que la possibilité d'approches différentes permettant d'atteindre des résultats identiques, voire meilleurs.

En outre, il est nécessaire d'identifier le niveau de performance au regard de la qualité du produit, des exigences réglementaires et de la sécurité du travail. Le système de contrôle doit être fiable et convivial, c'est-à-dire facile à utiliser et à entretenir.

La gestion et le traitement des données sont aussi des facteurs qui doivent être pris en considération dans la conception du système de contrôle.

Le système de contrôle doit constituer un équilibre entre le besoin de précision, la cohérence et la souplesse requise pour accroître le rendement global du procédé de fabrication et d'autre part la nécessité de maîtriser les coûts de production.

Si les spécifications du système de contrôle sont définies de manière intelligente, le bon fonctionnement de la chaîne de production est assuré. Tout excès ou insuffisance de spécifications conduisent inévitablement à des coûts d'exploitation plus élevés et/ou à des retards de production.

Pour optimiser les performances d'un système de procédé :

- les spécifications fournies pour le système de contrôle à chaque étape du procédé doivent être précises et complètes, en veillant à conserver des tolérances en entrée réalistes

- l'ingénieur responsable de la conception du système de contrôle doit avoir une bonne connaissance du procédé total et être capable de communiquer avec le fabricant de l'équipement
- un bilan doit être établi, en d'autres termes il faut se demander s'il est nécessaire de mettre en œuvre une technologie de contrôle des procédés sophistiquée ou si une solution plus simple est suffisante.

Les systèmes de contrôle des procédés modernes font appel à un jeu de techniques utilisables pour améliorer les performances des procédés y compris l'efficacité énergétique. Ces techniques comprennent :

- des contrôles classiques et avancés,
- des techniques d'optimisation, de programmation, et de gestion des performances.

Sont intégrés aux contrôles classiques :

- le contrôle PID (Proportionnelle Intégrale Dérivée)
- le contrôle avec compensation de temps mort et
- le contrôle en cascade.

Sont intégrés aux contrôles avancés :

- les commandes prédictives à base de modèle (MBPC)
- les commandes adaptatives
- les commandes floues.

Sont intégrés aux techniques de gestion des performances (voir Section 2.8) :

- la surveillance et la désignation de cibles
- la maîtrise statistique des procédés
- les systèmes experts.

Les techniques de suivi des performances permettent de démontrer les améliorations des performances, l'atteinte des cibles et la conformité aux réglementations environnementales, y compris aux autorisations IPPC.

L'automate programmable est le cerveau du système de contrôle. Il s'agit d'un petit ordinateur industrialisé qui fonctionne de manière fiable dans l'environnement d'une installation de fabrication. Les blocs constituant un système de contrôle sont une variété de capteurs, de vannes intelligentes, d'automates programmables (PLC) et de systèmes de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) centraux.

Ces composants sont ensuite reliés à un système de procédé de fabrication qui permet à chaque fonction dudit système d'opérer avec un degré élevé de précision. L'automatisation – l'incorporation du système de contrôle dans un système de procédé –réduit effectivement la charge de travail impliquée dans le fonctionnement de cet équipement complexe et garantit un niveau de performance fiable et constant.

L'automate programmable (PLC) surveille les capteurs numériques et analogiques et les commutateurs (les entrées), lit le programme de contrôle, effectue des calculs mathématiques, et, en conséquence, commande divers matériels (les sorties) tels que les vannes, les relais, les voyants, et les servomoteurs, le tout en l'espace de quelques millisecondes.

L'automate programmable (PLC) peut échanger des informations avec des interfaces opérateurs (IHM) et des systèmes de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) au niveau des ateliers de production. L'échange des données au niveau commercial de l'installation (services

d'information, comptabilité et planification) nécessite habituellement une interaction avec un système SCADA distinct.

Traitement des données
Les données opérationnelles sont collectées et traitées par une infrastructure qui intègre habituellement les capteurs et l'instrumentation de l'usine, ainsi que les éléments du contrôle final tels que les vannes et qui comprend aussi des automates programmables, des systèmes de contrôle et d'acquisition de données et des systèmes de contrôle réparti. Ensemble ces systèmes peuvent fournir des données, en temps utile et utilisables, à d'autres systèmes informatiques ainsi qu'aux opérateurs/ingénieurs.

Les systèmes de contrôle et d'acquisition de données permettent à l'ingénieur d'études de mettre en œuvre la collecte des données et d'archiver des capacités dans un système de contrôle donné. En outre, le système SCADA permet l'introduction de formes de contrôle plus complexes, par exemple de procédés statistiques (voir Section 2.8.2).

Le système SCADA fait partie intégrante de la conception d'un système de contrôle, et offre à l'utilisateur une « fenêtre en temps réel » sur l'intérieur du procédé. Un système SCADA peut aussi être conçu pour offrir à un utilisateur à distance la même possibilité d'accès à un procédé donné qu'à un opérateur « debout devant son équipement ».

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction des coûts d'énergie et de l'impact sur l'environnement.

Effets croisés
Utilisation de petites quantités de produits chimiques pour le nettoyage ; possibilité de perte de pression dans les instruments de mesure (voir Section 2.10.4).

Données opérationnelles
Voir la rubrique Description, ci-dessus.

Nettoyage des instruments de mesure
L'importance (et la précision) des contrôles qui sont très largement utilisés dans les industries de traitement et incorporés dans les systèmes de procédé ne doit pas être surestimée. Il existe une variété d'instruments et de dispositifs de mesure ou de capteurs, par exemple les résistances qui sont sensibles à la température, les sondes de pH, les conductimètres, les débitmètres, les minuteurs, les cannes de niveau et les alarmes, qui sont en contact avec les fluides (liquides et gaz) utilisés dans le procédé, et qui nécessitent un nettoyage régulier pour fonctionner efficacement et avec précision. Ce nettoyage peut être réalisé manuellement, selon un calendrier de maintenance, ou grâce à des systèmes de nettoyage en place automatiques (CIP).

Un système de contrôle entièrement automatisé doit pouvoir allouer des durées variables pour les cycles de rinçage et de purge ainsi que pour le recyclage des différentes solutions de nettoyage. Le système doit également être en mesure de modifier la température, les débits, la composition ainsi que la concentration des solutions de nettoyage.

L'unité de contrôle principale repose habituellement sur l'équipement formant l'automate programmable, souvent sous forme de panneaux multiples qui desservent les postes opérateurs ainsi que pour les commandes de vannes et marche/arrêt. Le système de contrôle des procédés revêt une importance capitale pour contrôler ou minimiser les coups de bélier, un problème fréquemment rencontré dans les unités de nettoyage en place automatique (CIP) et qui peut réduire la durée de vie utile de l'unité.

Le séquençage ou « l'émission d'impulsion » doivent être corrects pour nettoyer les vannes, les joints à lèvre, les joints toriques et les sièges des vannes des équipements du procédé.

Applicabilité

Les systèmes de contrôle de procédés sont applicables à toutes les industries relevant de l'IPPC. Ils vont des simples minuteurs, thermostats, commandes d'alimentation des matières premières (par exemple dans les petites unités d'élevage intensif) jusqu'à des systèmes complexes, par exemple dans les industries alimentaires, minières et papetières.

Aspects économiques
Des études de cas ont démontré que des bénéfices peuvent être dégagés avec un bon rapport coût efficacité. Des périodes de retour sur investissement d'une année ou moins constituent le cas général surtout lorsqu'une infrastructure de contrôle et de surveillance moderne, c'est-à-dire un système de contrôle-commande réparti (DCS) ou un système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) est déjà en place. Dans certains cas, des périodes de retour sur investissement de quelques mois ou même de quelques semaines ont été démontrées.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Augmentation de la production, amélioration de la sécurité, réduction de la maintenance/allongement de durée de vie de l'installation, obtention d'un niveau de qualité davantage constant et réduction des besoins en main-d'œuvre.

La réduction des coûts du procédé et les retours sur investissement rapides (comme mentionné ci-dessus) qui ont été obtenus dans plusieurs installations, ont contribué de manière significative à l'adoption de ces mêmes procédés dans d'autres installations.

Exemples d'installations
Utilisation très répandue, par exemple dans les industries énumérées ci-après :

- industrie alimentaire, industrie des boissons et industrie laitière : British Sugar, Joshua Tetley, Ipswich, Royaume-Uni
- industrie chimique : BP Chemicals, Hull, Royaume-Uni ; ICI Chemicals and Polymers, Middlesborough, Royaume-Uni ;
- industrie des métaux ferreux : Corus, Port Talbot, Royaume-Uni
- industrie du ciment et de la chaux : Blue Circle, Westbury, Royaume-Uni
- industrie papetière : Stora Enso Langerbrugge N.V., Gent, Belgique ; SCA Hygiene Products GmbH, Mannheim, Allemagne ; SCA Hygiene Products GmbH, Pernitz, Autriche
- Combustion en lit fluidisé : Rovaniemi Energy, Rovaniemi and Alholmens Kraft, Pietarsaari, Finlande ; E.ON Kemsley, Royaume-Uni.

Références bibliographiques
[36, ADENE, 2005] [261, Carbon_Trust_UK, 2005]

2.8.2 Systèmes de gestion de la qualité (contrôle, assurance)

Description
Lorsqu'un produit est réusiné, l'énergie utilisée dans le procédé de production d'origine est gaspillée, (au même titre que les matières premières, la capacité de travail et de production ou d'autres ressources). Le réusinage peut consommer de manière disproportionnée davantage d'énergie (ou d'autres ressources) que le procédé de production d'origine. Un contrôle de procédé efficace fait augmenter la quantité de produit(s) conformes aux spécifications de production/des clients et réduit la quantité d'énergie gaspillée.

Les installations IPPC impliquent en principe une production à grande échelle et/ou des volumes de production élevés. En règle générale, les produits doivent être conformes à certaines spécifications en vue de leur utilisation ultérieure. Des systèmes d'assurance qualité (QA), qui reposent généralement sur une approche PDCA (planifier – développer (réaliser) – contrôler (vérifier) – agir) ont été mis au point à cette fin (voir Section 2.1).

À l'origine, cette méthode consistait à tester les produits, et à les accepter ou les rejeter, les réusiner et les mettre au rebut une fois qu'ils étaient allés au bout du procédé de fabrication. Des méthodes statistiques ont été mises au point (à partir des années 1940) pour établir un échantillonnage et la réalisation de tests sur une base statistique afin de garantir un certain niveau de conformité aux normes, par exemple 95 % de produits sans défaut, soit 3,4 produits défectueux sur un million avec la méthode six sigma.

On s'est rendu compte qu'un produit manufacturé présentait des variations et que celles-ci étaient influencées par divers paramètres du procédé. La maîtrise statistique des procédés (MSP) est une démarche qui a été mise au point puis appliquée pour contrôler chaque paramètre, et le résultat final tend à être un produit mieux contrôlé. La maîtrise statistique des procédés (MSP) peut avoir un très bon rapport coût efficacité, dans la mesure où elle implique généralement de collecter et de représenter sous forme graphique des données déjà disponibles, à analyser en permanence les dérives du procédé par rapport à une situation de référence et à intervenir en appliquant des mesures correctives pour maintenir le procédé à l'intérieur de paramètres de contrôle prédéfinis (tels que la température, la pression, la concentration chimique, la couleur, etc.).

Parallèlement, des approches en faveur de la qualité à l'échelle de la société ont été développées, (Systèmes de gestion de la qualité, SGQ). On peut les définir comme un ensemble de politiques, de processus et de procédures nécessaires à la planification et à l'exécution (production/développement/service) dans le domaine d'activité principale d'une société. Un système de gestion de la qualité, (SGQ) intègre les différents procédés internes à la société et a pour vocation de fournir une approche par procédures pour l'exécution d'un projet. Il permet aux sociétés d'identifier, de mesurer, de contrôler et d'améliorer les divers procédés régissant le cœur de leur activité avec pour résultat final une amélioration des performances. Les modèles d'assurance qualité sont maintenant définis par des normes internationales regroupées dans la série ISO 9000 et les spécifications définies pour les systèmes qualité. Les systèmes de management environnemental et de management de l'énergie ont été mis au point à partir des mêmes approches systèmes (voir Section 2.1).

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction des produits défectueux et/ou du réusinage qui constituent un gaspillage de l'apport d'énergie initial, et qui peuvent nécessiter un plus grand apport énergétique pour le réusinage (ou entraîner une diminution de la sortie pour les lots).

Effets croisés
Aucun effet croisé connu.

Données opérationnelles
Voir la rubrique Description, ci-dessus.

Il est souvent fait appel à des consultants et/ou à des prestataires lorsqu'il s'agit d'introduire de nouvelles pratiques ou méthodologies en matière de qualité étant donné que, dans certaines circonstances, les compétences et l'expérience appropriées ne sont pas toujours disponibles au sein de la société. En outre, lorsque de nouvelles initiatives et évolutions sont nécessaires pour renforcer le système qualité existant, ou peut-être pour améliorer les systèmes de fabrication existants, le recours temporaire à des consultants est une option retenue lors de l'allocation des ressources humaines.

Il existe un certain nombre d'arguments pour ou contre les systèmes de gestion, à savoir :

- les paramètres relevés doivent être pertinents afin d'obtenir la qualité requise pour le procédé ou le produit et ne pas être uniquement des paramètres faciles à mesurer
- les méthodes statistiques de Six Sigma sont efficaces au vu de ce pourquoi elles ont été prévues, mais elles sont tout juste conçues pour corriger un procédé existant, et ne sont d'aucune utilité pour développer des produits nouveaux ou des technologies de rupture. La

définition de Six Sigma est également fondée sur des normes arbitraires, (de l'ordre de 3,4 produits défectueux sur un million), qui fonctionnent bien pour certains produits/procédés et risquent d'être inadaptées à d'autres.

- l'application de ces approches gagne en popularité dans les instances de direction puis elle est délaissée et présente un cycle de vie ayant la forme d'une distribution gaussienne (voir par ex. les cercles de qualité, dans les exemples ci-dessous)
- l'expression Gestion de la qualité totale (TQM) a créé une utilité positive, indépendamment du sens que lui attribuaient les dirigeants. Toutefois, elle a perdu son aspect positif et a parfois donné lieu à des connotations négatives. Malgré cela, les concepts de management tels que la Gestion de la qualité totale (TQM) et le Re-engineering poursuivent leur chemin (laissent leur empreinte), sans qu'il soit fait explicitement mention de leur nom, car leurs idées centrales peuvent s'avérer précieuses
- la perte d'intérêt/perception d'échec concernant ces systèmes pourrait s'expliquer par le fait que des systèmes tels qu'ISO 9000 mettent l'accent sur les spécifications, le contrôle et les procédures plutôt que sur la compréhension et l'amélioration, et peuvent amener les entreprises à penser, à tort, qu'une certification équivaut à une meilleure qualité. Ceci peut dissuader une entreprise de fixer ses propres normes de qualité. Une confiance totale, aveugle dans les spécifications de l'ISO 9000 n'est aucunement la garantie d'un système qualité de valeur. La norme peut être davantage source d'échec lorsqu'une entreprise est bien plus intéressée par la certification que par la qualité. Il y a là le risque de créer un système bureaucratique sans aucun effet sur une société à la recherche du meilleur
- la certification par un auditeur indépendant est souvent considérée comme une source de problèmes et a fait l'objet de critiques en tant que véhicule pour accroître les services de conseil. L'Organisation internationale de normalisation elle-même informe que l'ISO 9000 peut être mise en œuvre sans certification, tout simplement pour les bénéfices qui peuvent en résulter en matière de qualité.

Applicabilité
La gestion de la qualité peut s'appliquer à toutes les industries de procédé relevant de l'IPPC. Le type de système et le niveau de complexité des systèmes de gestion de la qualité appliqués dépendent de l'exploitation concernée et peuvent être une exigence du client.

Aspects économiques
Une critique courante à l'encontre des systèmes formalisés comme l'ISO 9000 met en avant la quantité d'argent, de temps et de paperasserie nécessaire pour l'enregistrement. Les détracteurs lui reprochent son inflation de papier. Les défenseurs avancent que si une société a déjà établi les documents nécessaires pour son système qualité, la plus grosse partie de la paperasserie a déjà été faite.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Il est largement admis qu'une bonne gestion de la qualité améliore la marche des affaires, en ayant souvent un effet positif sur l'investissement, les parts de marché, la croissance des ventes, l'augmentation des marges, la compétitivité, et l'évitement des litiges.

Exemples
Voir Annexe 7.4.

L'ingénierie du contrôle des procédés (Prozessleittechnik, Bayer AG, Allemagne, 1980) a vu le jour en tant qu'appellation coiffant les groupes de mesure, contrôle et génie électrique. Il s'agit d'une discipline d'ingénierie et de statistiques portant sur les architectures, les mécanismes et les algorithmes permettant de contrôler la sortie d'un procédé spécifique.

Les développements les plus récents sont les suivants :

- Right First Time (Bon du premier coup)

- Six Sigma : méthodes dans laquelle la probabilité d'un défaut (ou d'une défaillance) imprévu(e) est limitée à six écarts-types (où sigma est l'écart-type et équivaut à 3,4 produits défectueux sur un million)
- Analyse des systèmes de mesure (MSA)
- Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (FMEA)
- Planification avancée de la qualité du produit (PAQP)
- Gestion de la qualité totale (TQM).

Parmi les autres outils utilisés dans la Maîtrise statistique des procédés (MSP) il faut citer les diagrammes causes-effets, les listes de vérifications, les cartes de contrôle, les histogrammes, les diagrammes de Pareto, les diagrammes « chatter », et la stratification.

Les cercles de qualité (qui peuvent être associés aux méthodes ci-dessus) constituent une autre approche possible. Il s'agit de petits groupes d'employés appartenant à la même unité de travail qui sont volontaires pour se réunir à intervalles réguliers afin d'identifier, d'analyser et de résoudre des problèmes liés à leur activité. Les cercles de qualité ont l'avantage de la continuité, le cercle demeurant intact d'un projet à l'autre. Ils ont été utilisés au Japon et par des entreprises novatrices dans les pays scandinaves ; ils passent néanmoins pour ne plus être utilisés.

Références bibliographiques
[163, Dow, 2005, 181, Wikipedia, 182, Wikipedia, 227, TWG, 249, TWG, 2007]

Wikipedia propose bon nombre de références, présentant les aspects positifs et négatifs des systèmes de qualité.
Autres informations : par ex. l'American Society for Quality : www.asq.org

2.9 Maintenance

Description
La maintenance de toute usine et de tout équipement est indispensable et fait partie d'un SM2E (voir Section 2.1(d) (vii).

Il est important de tenir un calendrier de maintenance et d'enregistrer toutes les inspections et activités de maintenance. Les activités de maintenance sont présentées dans chaque section.

La maintenance préventive moderne a pour objectif de maintenir en état de fonctionnement les procédés de production et les procédés associés pendant toute leur durée de vie opérationnelle. Les programmes de maintenance préventive étaient traditionnellement conservés sur des fiches ou sur des tableaux de planification, mais ils sont maintenant facilement gérables grâce à l'outil informatique. En affichant chaque jour les travaux de maintenance programmée jusqu'à ce qu'ils soient effectués, les logiciels de maintenance préventive permettent plus facilement de s'assurer qu'aucune tâche de maintenance n'a été oubliée.

Il est important que la base de données du logiciel et les fiches des équipements comportant des données techniques soient facilement interfaçables avec d'autres programmes de maintenance (et de contrôle). Des indicateurs tels que les normes de maintenance dans l'industrie des procédés sont souvent utilisés pour classer et rendre compte des travaux exécutés et établir des rapports justificatifs. Les exigences des normes ISO 9000 relatives à la maintenance peuvent faciliter le choix d'un logiciel.

L'utilisation d'un logiciel simplifie l'enregistrement des problèmes et la production de données statistiques sur les pannes, et leur fréquence. Des outils de simulation peuvent contribuer à la prédiction des pannes et à la conception des équipements.

Les opérateurs de procédés doivent faire appliquer de bonnes pratiques de gestion interne locale et contribuer à focaliser l'attention sur la maintenance non programmée, notamment sur :

- le nettoyage des surfaces et des tuyaux encrassés
- la vérification aux fins d'optimiser les équipements réglables (par ex. les presses à imprimer)
- la mise hors tension des équipements en dehors des périodes d'utilisation
- la détection des fuites (par exemple air comprimé, vapeur), des équipements défectueux, des tuyaux fissurés, etc. et création de rapports à leur sujet
- le remplacement en temps utile des paliers usagés.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie. Réduction du bruit (provenant par exemple de paliers usagés, de fuite de vapeur).

Effets croisés
Aucun envisagé.

Données opérationnelles
Les programmes de maintenance préventive sont fonction de l'installation. Détecter les fuites, les équipements défectueux, les paliers usagés, etc., susceptibles d'influencer ou de contrôler la consommation d'énergie, et y remédier dès que possible.

Applicabilité
La maintenance est en règle générale appliquée.

La nécessité de procéder rapidement aux réparations doit être pondérée par l'obligation de maintenir la qualité du produit et la stabilité du procédé, ainsi que par des considérations ayant trait à la santé et à la sécurité quant à l'opportunité de réaliser des réparations sur des installations en fonctionnement (susceptibles de contenir des équipements mobiles, chauds, etc.).

Aspects économiques
En fonction de l'installation.

Les bonnes pratiques de gestion interne sont des activités à faible coût, en général payées sur les budgets de fonctionnement annuels et ne nécessitent pas d'investissement en capital.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Elle est généralement acceptée pour améliorer la fiabilité de l'installation, réduire les temps d'arrêt, augmenter la production, contribuer à une qualité plus élevée.

Exemples
Application très répandue dans tous les secteurs.

Références bibliographiques
Plusieurs BREF, [125, EIPPCB, 159, EIPPCB, 2006, 254, EIPPCB, 2005, 267, EIPPCB, 2006].

2.10 Surveillance et mesurage

[55, Best practice programme, 1998, 56, Best practice programme, 1996, 98, Sitny, 2006].

La surveillance et le mesurage sont une partie essentielle de la vérification dans un SM2E (voir Section 2.1 (f) (i)), car on les trouve dans tout système de gestion de type « planifier – développer (réaliser) – contrôler (vérifier) - agir ». La présente section étudie certaines techniques possibles pour mesurer, calculer et surveiller les caractéristiques clés du fonctionnement et des activités susceptibles d'avoir un impact significatif sur l'efficacité énergétique. La Section 2.15.1 présente aussi la collecte des données, les bases de données et

l'automatisation des systèmes de contrôle et des équipements, en particulier plusieurs systèmes interconnectés, afin d'optimiser leur consommation d'énergie.

La mesure et la surveillance sont susceptibles de faire partie du contrôle des procédés (voir Section 2.8) et des audits (voir Section 2.11). La mesure est importante si l'on veut acquérir des informations fiables et traçables sur des points ayant une influence sur l'efficacité énergétique, à la fois pour les quantités (MWh, kg vapeur, etc.) mais aussi pour les qualités (température, pression, etc.), selon le vecteur (vapeur, eau chaude, refroidissement, etc.). Pour certains vecteurs, il peut être tout aussi important de connaître les paramètres du vecteur énergétique dans les circuits de retour ou les rejets d'effluents (par ex. rejets de gaz résiduaires, d'eau de refroidissement) pour pouvoir établir des analyses et des bilans énergétiques, etc. (voir la rubrique Exemples, Section 2.12).

Un aspect clé de la surveillance et de la mesure est de permettre l'établissement d'une comptabilité des coûts fondée sur les consommations d'énergie réelles, et non pas sur des valeurs arbitraires ou estimées (qui peuvent être périmées). Ceci crée une dynamique du changement aux fins d'améliorer l'efficacité énergétique. Toutefois, dans les usines existantes, il peut être difficile de mettre en œuvre de nouveaux dispositifs de surveillance, par exemple il peut s'avérer difficile de trouver les longueurs de tuyau requises pour offrir des zones basses de non turbulence pour la mesure du débit. Dans de tels cas, ou si les consommations d'énergie de l'équipement ou de l'activité sont relativement faibles (par rapport au système ou à l'installation plus grande dans laquelle ils se trouvent), on peut toujours utiliser des estimations ou des calculs.

La présente section ne traite pas de la documentation ni des autres procédures requises par tout système de management de l'efficacité énergétique.

En outre, les flux de matières sont souvent mesurés pour le contrôle des procédés, et ces données peuvent être utilisées afin d'établir des indicateurs de l'efficacité énergétique, etc. (voir Section 1.4).

2.10.1 Techniques de mesure indirecte

Description
Le balayage infrarouge des machines lourdes fournit une preuve photographique des points chauds à l'origine de pertes d'énergie et de contraintes inutiles sur les pièces en mouvement. Ceci peut être utilisé dans le cadre d'un audit.

La température de fonctionnement des équipements critiques ayant une incidence sur la consommation d'énergie, par exemple, des paliers, des condensateurs (voir Section 3.5.1) et d'autres équipements peut faire l'objet d'une surveillance continue ou à intervalles réguliers : lorsque le palier ou la capacité commencent à être défectueux, la température de leur carter s'élève.

Il est possible d'effectuer d'autres mesures pour d'autres changements qui se traduisent par des pertes énergétiques, comme une augmentation du bruit, etc.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
Voir la rubrique Description, ci-dessus.

Applicabilité
Utilisation très répandue.

Aspects économiques
Au cas par cas.

Agent moteur pour la mise en œuvre
En tant que partie de la maintenance préventive :

- évite une fermeture imprévue de l'usine
- permet un remplacement planifié des pièces
- prolonge la durée de vie des équipements, etc.

Exemples
- Utilisation très répandue, par ex. Aughinish Alumina (AAL), Ireland.
- Voir Sections 3.2, 3.7, etc.

Références bibliographiques
[161, SEI, 2006, 183, Bovankovich, 2007]

2.10.2 Estimations et calculs

Description
Il est possible d'effectuer des estimations et des calculs de la consommation d'énergie des équipements et des systèmes, qui se fondent habituellement sur les spécifications des fabricants ou des concepteurs. Les calculs reposent souvent sur un paramètre facile à mesurer, par exemple avec un compteur de fonctionnement–heures sur les moteurs et les pompes. Toutefois, dans de tels cas, d'autres paramètres, tels que la charge ou la hauteur de charge et les rpm (rotation par minute) doivent être connus (ou calculés) car cela a un effet direct sur la consommation d'énergie. Le fabricant d'équipements fournit, en principe, ces informations.

Un large éventail de calculateurs sont disponibles sur Internet (voir la rubrique Références bibliographiques ci-dessous, et dans des sections spécifiques de ces documents). Ils sont généralement destinés à évaluer les économies d'énergie pour divers équipements.

Avantages obtenus pour l'environnement
Facilite l'identification des possibilités d'économie d'énergie et la réalisation d'économies d'énergie.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
Voir la rubrique Description, ci-dessus.

Applicabilité
Utilisation très répandue. L'application de calculateurs devrait être prise en considération par rapport aux possibilités d'économies de coûts avec une mesure ou un comptage plus précis, même sur une base temporaire.

Redoubler de prudence avec les calculateurs en ligne :

- Ils peuvent avoir pour fonction de comparer le coût des utilités provenant de différents fournisseurs

- le conseil énoncé à la Section 2.2.2 est important : il faut tout d'abord prendre en considération l'ensemble du système dans lequel l'équipement est utilisé plutôt qu'une partie d'équipement individuel
- les calculateurs en ligne peuvent être trop simplistes et ne pas tenir compte de la charge, de la hauteur de charge, etc. (voir la rubrique Description, ci-dessus).

Un problème rencontré avec les estimations et des calculs réside dans le fait qu'ils peuvent être utilisés de manière répétée, d'une année sur l'autre, et que la base initiale risque d'être perdue, vide ou inconnue. Ceci peut conduire à des erreurs coûteuses (Voir Exemples, à l'Annexe 7.7.1). La base des calculs doit être révisée régulièrement.

Aspects économiques
Aucun investissement en équipement n'est requis ; le temps consacré par le personnel à effectuer des calculs précis doit être pris en compte, de même que l'analyse des coûts et des risques imputables à des erreurs.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Économies de coûts.

Exemples
Utilisation très répandue. Pour des exemples de calculateurs en ligne, voir la rubrique Références bibliographiques ci-dessous.

Références bibliographiques
[270, Tempany, 2008]

Une recherche sur Internet portant sur les « calculateurs d'efficacité énergétique industriels » a donné les résultats suivants qui n'ont pas été validés (remarque : ces sites peuvent changer au fil du temps ou cesser d'exister) :

- centre de calculateurs en ligne. Liste importante de calculateurs :
  http://www.martindalecenter.com/Calculators1A_4_Util.html

- Le site ci-après est conçu comme un guide pour les directeurs des petites et moyennes usine de fabrication afin de leur permettre d'évaluer les économies potentielles d'énergie et d'argent qu'ils peuvent obtenir grâce à une mesure de conservation de l'énergie :
  http://www.ceere.org/iac/assessment%20tool/index.html

- calculateurs d'énergie et outils d'analyse comparative :
  http://energypathfinder.blogspot.com/2007/02/energy-calculators-and-benchmarking.html

- activités générales, éclairage, équipements, équipements de bureau.
  http://www1.eere.energy.gov/femp/procurement/eep_eccalculators.html

- calculateurs pour variateurs de vitesse (EVV) : ventilateurs, pompes, eau chaude/refroidie, tour de refroidissement :
  http://www.alliantenergy.com/docs/groups/public/documents/pub/p010794.hcsp

- éclairage :
  http://www1.eere.energy.gov/femp/procurement/eep_hid_lumen.html

- chaudières, CVC, éclairage, variateur de vitesse :
  http://www.alliantenergy.com/docs/groups/public/documents/pub/p013446.hcsp

- calculateur d'intensité énergétique - gigajoule :

http://oee.nrcan.gc.ca/commercial/technical-info/tools/gigajoule.cfm ?attr=20

- rendement des chaudières :
  http://oee.nrcan.gc.ca/industrial/technical-info/tools/boilers/index.cfm ?attr=24

- pertes thermiques, bâtiments industriels
  http://www.energyideas.org/default.cfm ?o=h,g,ds&c=z,z,2633

2.10.3 Systèmes de mesure et systèmes de mesure avancée

Description
Les compteurs d'utilités classiques mesurent simplement la quantité d'un vecteur d'énergie consommé dans une installation, une activité ou un système. Ils permettent d'établir des factures d'énergie pour les installations industrielles et sont, en principe, relevés manuellement. Toutefois, les progrès technologiques modernes se sont traduits par des compteurs meilleur marché, qui peuvent être installés sans que soit interrompue la fourniture d'énergie (lorsqu'ils sont montés avec des capteurs de courant à noyau ouvrant) et nécessitent beaucoup moins d'espace que les compteurs plus anciens.

Les systèmes Advanced Metering Infrastructure (Infrastructure de comptage avancée, AMI) ou Advanced Metering Management (Management de comptage avancé, AMM) font référence à des systèmes qui mesurent, recueillent et analysent l'utilisation de l'énergie, grâce à des dispositifs modernes tels que les compteurs d'électricité, les compteurs de gaz, et/ou les compteurs d'eau, par le biais de divers moyens de communication à la demande ou selon un calendrier prédéfini. Cette infrastructure comprend des matériel et logiciel pour la gestion des communications, des systèmes associés aux clients et des données relevées aux compteurs.

Les centres de comptabilisation de l'énergie sont des unités sur le site dans lesquelles la consommation d'énergie peut être reliée à une variable de production telle que le volume de production (voir Section 1.4). La Figure 2.8 représente un exemple de structure d'un système de mesure avancé.

Un système de mesure avancé est indispensable pour des systèmes de gestion de l'énergie automatisés, voir Sections 2.15 et 2.15.2.

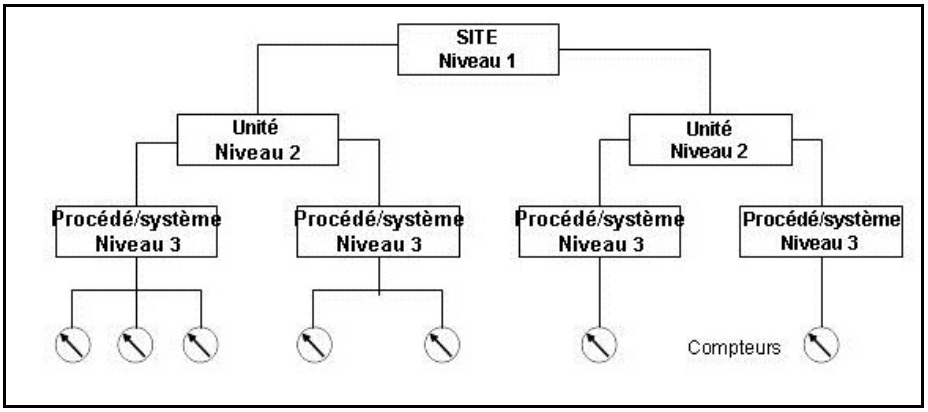


Figure 2.8 : Structure d'un système de mesure avancé
[98, Sitny, 2006]

Avantages obtenus pour l'environnement
Meilleur contrôle de l'utilisation de l'énergie.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
Permet une mesure précise de la consommation d'énergie au bénéfice des centres de comptabilisation de l'énergie, au sein d'une installation, avec des unités et des systèmes spécifiques.

Applicabilité
Là où il existe plusieurs systèmes unitaires utilisant de l'énergie

Plusieurs études montrent qu'il existe une raison majeure pour ne pas mettre en œuvre les techniques d'efficacité énergétique, à savoir que l'incapacité des responsables d'unité individuelle à identifier et à contrôler leurs propres coûts énergétiques. C'est pourquoi, ils ne retirent aucun bénéfice des actions qu'ils entreprennent.

Aspects économiques
Allocation des coûts en fonction de l'utilisation.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Voir la rubrique Aspects économiques.

Exemples
Voir Annexe 7.7.1

Références bibliographiques
[183, Bovankovich, 2007]
Verrerie Schott : [127, TWG]
Hôpital Atrium, Heerleen, NL [179, Stijns, 2005].

2.10.4 Mesure de débit avec faible perte de charge dans les canalisations

Description
La mesure de débit est utilisée dans les fluides tels que les matières premières et les produits liquides et gazeux, l'eau (eau brute, eaux des chaudières et des procédés, etc.), vapeur, etc. En règle générale les débits sont mesurés en créant artificiellement une perte de charge à travers un diaphragme, un tube venturi ou tube de Pitot, ou par un débitmètre à induction. Cela se traduit habituellement par une perte de charge permanente, en particulier pour les diaphragmes et les venturi, c'est-à-dire par une perte d'énergie dans le système.

Les débitmètres de la nouvelle génération réduisent considérablement les pertes de charge, avec une précision accrue.

Les mesures par ultrasons peuvent être utilisées pour les liquides qui sont des conducteurs d'ultrasons et qui ont un écoulement relativement bien établi (non turbulent). Les dispositifs peuvent être installés à demeure ou fixés sur la canalisation. Cette dernière fonction est utile pour vérifier les débitmètres existants, vérifier et étalonner des systèmes de pompage, etc. Comme ils ne sont pas intrusifs, ils n'ont pas de perte de charge. Les débitmètres à ultrasons peuvent avoir une précision de 1 - 3 % sur une valeur mesurée à 0,5 %, avec un étalonnage du procédé en fonction de l'application.

Avantages obtenus pour l'environnement
Les débitmètres et les tubes de Pitot de nouvelle génération ont une précision très élevée et un potentiel de réduction des pertes de charge, avec une perte d'énergie de 1 +/- 2 % de celle d'un diaphragme classique, et environ 8 % de celle d'un tube de Pitot classique.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles

Données de base	Centrale électrique avec vapeur haute pression	Incinération des déchets avec vapeur surchauffée
Q max (t/h)	200	45
T (°C)	545	400
P (bar abs.)	255	40
Diamètre int. (mm)	157	130,7
Pressions différentielles en mbar (approximatives) :		
Diaphragmes	2580	1850
Tubes de Pitot jusqu'ici	1770	595
Tubes de Pitot de nouvelle génération	1288	444
Chute de perte de charge permanente en mbar et par système de mesure en mbar (approximative) :		
Diaphragmes	993	914
Tubes de Pitot jusqu'ici	237	99
Tubes de Pitot de nouvelle génération	19,3	7,3
Perte d'énergie cinétique par système de mesure en kWh/h (avec 100 mbar ≈ 67,8 kWh/h) (approximatifs) :		
Diaphragmes	673	620
Tubes de Pitot jusqu'ici	161	67
Tubes de Pitot nouvelle génération	13	5

Tableau 2.5 : Exemples de perte de charge provoquée par différents systèmes de mesure

Applicabilité
Nouvelles installations ou modernisations importantes.

Il y a lieu d'être prudent avec les mesures par ultrasons et de s'assurer qu'il y a un minimum de turbulence et d'autres effets dans le liquide (tels que les interférences provoquées par les particules en suspension) lors de la mesure.

Aspects économiques
Le coût d'un dispositif de mesure de nouvelle génération, installation comprise est d'environ 10 000 EUR. Ce coût varie en fonction du nombre de dispositifs installés. Le retour sur investissement (ROI) est habituellement inférieur à une année.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Économies de coût. Précision des données pour le contrôle des procédés et potentiel d'optimisation (voir Section 2.6)

Exemples
Voir la rubrique Données opérationnelles, ci-dessus ; utilisation très répandue dans tous les secteurs.
Il existe d'autres exemples, à savoir les compteurs à ultrasons (aucune donnée opérationnelle communiquée) et les capteurs de Poetter.

Références bibliographiques
www.flowmeters.f2s.com/article.htm

2.11 Audits et diagnostics énergétiques

Description
En règle générale, un audit consiste à évaluer une personne, une organisation, un système, un procédé, un projet ou un produit. Les audits sont menés pour s'assurer de l'exactitude et de la fiabilité des informations, mais également pour fournir une évaluation du contrôle interne d'un système. Traditionnellement, les audits portaient essentiellement sur des opérations financières et la comptabilité. Toutefois, aujourd'hui on a recours aux audits pour obtenir d'autres informations sur les systèmes, y compris pour des audits environnementaux. [182, Wikipedia]. Un audit repose sur un échantillonnage et il n'apporte pas la garantie que ses conclusions seront exemptes d'erreur. L'objectif est toutefois de réduire au maximum les erreurs en validant les informations autant que possible au plan de leur exactitude et leur fiabilité.

L'expression « audit énergétique » est utilisée communément, avec la signification d'inspection, d'évaluation et d'analyse systématique des flux d'énergie dans un bâtiment, un procédé ou un système avec l'objectif d'appréhender la dynamique énergétique du système objet de l'étude. En général, un audit énergétique est mené pour rechercher les opportunités de réduction du niveau d'énergie en entrée sans pénaliser les valeurs en sortie.
Un diagnostic énergétique peut constituer un audit initial approfondi ou prendre une forme plus large avec un cadre de référence pour l'audit : méthodologie bien définie, indépendance et transparence de l'audit, qualité et professionnalisme de l'audit, etc. Voir ci-dessous [250, ADEME, 2006]

Dans la pratique, il existe un très large éventail de types et de degrés de complexité pour les audits énergétiques. Il est possible de recourir à des types d'audits différents, selon les différentes phases concernées dans la gestion de l'énergie et/ou selon les divers niveaux de complexité des situations. Différents champs d'application, niveaux d'approfondissement et objectifs sont illustrés sur la Figure 2.9 :

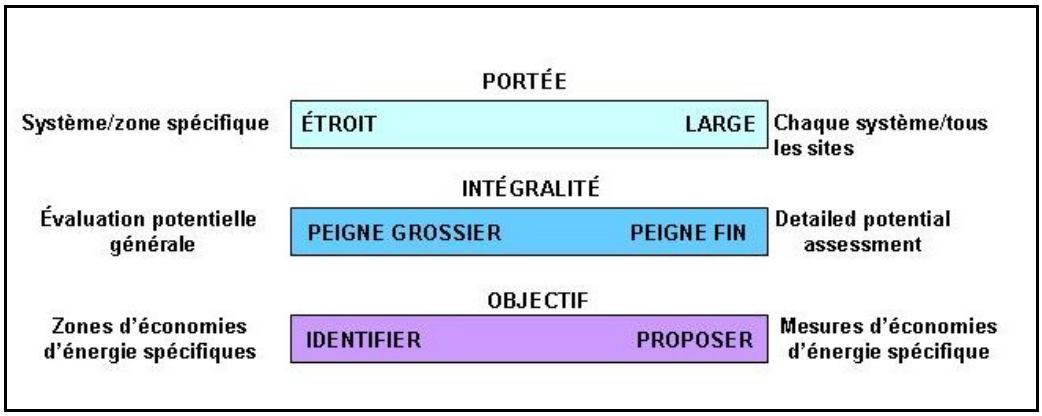


Figure 2.9 : Propriétés des modèles d'audits énergétiques
[7, Lytras, 2005]

Certains outils pouvant faciliter la réalisation ou la standardisation des audits sont répertoriés dans l'Annexe7.8.

Les différents modèles d'audits énergétiques peuvent être classés en deux types principaux selon leur domaine d'application :

1. les modèles à balayage
2. les modèles analytiques.

À l'intérieur de ces deux types, il existe des modèles différents pouvant être spécifiés en fonction de leur champ d'application et de leur niveau d'approfondissement. Dans les faits, l'audit peut être particularisé pour faire face aux besoins de la situation.

Il existe des normes, en général au sein des sociétés d'audit ou des schémas d'économie d'énergie. La première norme nationale relative aux audits énergétiques a vu le jour. Elle constitue un cadre de référence pour le diagnostic énergétique qui :

- propose une méthode pour effectuer un diagnostic énergétique ;
- érige l'objectivité, l'indépendance et la transparence en tant que principes et objectifs généraux d'une telle mission ;
- formule des recommandations qui sont indispensables pour obtenir un service de première classe.

Pour l'exploitant, les avantages du cadre de référence résident dans la présentation d'une méthode consensuelle, un soubassement facilitant le dialogue, un outil permettant des économies de temps, des exemples de résultats (listes d'équipements, bilans, lancement d'une campagne de suivi, etc.).

Un type d'audit particulier est l'audit de catégorie investissement, c'est-à-dire un audit conduit pour évaluer les options d'investissement possibles dans l'efficacité énergétique. Dans les audits de catégories investissement, l'une des caractéristiques essentielles est l'évaluation de l'erreur dans la prévision des économies d'énergie : si une société se propose d'investir 1 million d'EUR dans l'efficacité énergétique, elle doit connaître les risques associés aux prévisions d'économies, ainsi que la méthode permettant de minimiser ces risques (par exemple l'incertitude quant aux erreurs de calcul et celle relative à l'investissement).

Au même titre que les audits financiers, les audits énergétiques peuvent être conduit par du personnel interne ou externe, en fonction des objectifs de l'audit, de la complexité du site et des ressources disponibles. Certaines PME peuvent ne pas disposer en leur sein de suffisamment de personnel ou d'expérience et font appel à des consultants extérieurs (notamment si cela devient possible en tant que partie d'une initiative, voir Annexe 7.12). Les gros consommateurs d'énergie peuvent avoir du personnel affecté à cette tâche mais peuvent également faire appel à des consultants extérieurs pour des audits supplémentaires ou exceptionnels, ou mettre sur pied une équipe temporaire avec du personnel provenant d'autres divisions ou sites (voir Sections 2.5 et 2.6).

(1) Modèles à balayage

L'objectif principal du modèle d'audit énergétique à balayage est de mettre en exergue les zones où existent (ou peuvent exister) des possibilités d'économies d'énergie et aussi d'appeler l'attention sur les mesures d'économies les plus évidentes. Les audits à balayage ne vont pas en profondeur dans la profitabilité des zones indiquées ou dans le détail des mesures proposées. En préalable à toute action, les zones désignées doivent faire l'objet d'une analyse plus fouillée.

Un modèle d'audit à balayage constitue un bon choix si des volumes importants doivent être soumis à un audit dans un laps de temps très court. Ces types d'audits sont en général peu onéreux et peuvent être menés rapidement. Un audit à balayage n'apportera pas les résultats escomptés par un exploitant parce qu'il ne propose pas nécessairement des mesures d'économies concrètes, prêtes à être mises en œuvre mais qu'en général, il suggère plutôt une analyse plus poussée des zones clés. Il existe deux exemples principaux de modèle à balayage, qui sont décrits ci-dessous :

- les audits énergétiques de type « walkthrough » (à cheminement général direct)
- les audits énergétiques préliminaires

Audit énergétique de type « walkthrough »

Un audit énergétique de type « walkthrough » est adapté aux sites industriels de petite ou moyenne taille lorsque les procédés de fabrication ne sont pas très compliqués, en ce qui concerne les flux d'énergie primaire et secondaire, l'interconnexion des procédés, les opportunités de réemploi des niveaux de chaleur inférieurs, etc.

Un audit énergétique de type « walkthrough » donne un aperçu global de l'utilisation de l'énergie sur le site, désigne les potentiels d'économies les plus évidents et fait apparaître la nécessité d'aller plus avant (avec des audits supplémentaires de « seconde phase »).

Audit énergétique préliminaire

Le modèle d'audit énergétique à balayage pour les grands sites est souvent dénommé audit énergétique préliminaire. Les audits de ce type sont généralement utilisés dans les industries de transformation. Bien que l'objectif principal de l'audit énergétique préliminaire ne s'écarte pas de celui de l'audit énergétique de type « walk-through », il n'en reste pas moins que la taille et le type du site imposent une approche différente.

Dans l'audit énergétique préliminaire, la majeure partie de la mission consiste à établir une photographie nette de la consommation d'énergie totale du moment, à définir les zones où la consommation d'énergie est importante ainsi que souvent, les mesures d'économies d'énergie probables. Le rapport identifie également les zones où des audits supplémentaires de « seconde phase » sont nécessaires et indique la manière de les appréhender.

Un audit énergétique préliminaire doit normalement être réalisé par une équipe d'experts.

La présence d'experts est nécessaire tant pour la procédure d'audit proprement dite que pour le procédé de production. L'audit énergétique préliminaire requiert invariablement une participation engagée du personnel technique du site.

(2) Modèles analytiques

Les modèles d'audit énergétique analytiques débouchent sur des spécifications détaillées concernant des mesures d'économies d'énergie, en fournissant au client soumis à l'audit, suffisamment d'informations pour la prise de décision. Les audits de ce type sont plus onéreux, nécessitent davantage de travail et de temps mais apportent des propositions concrètes sur la manière de réaliser des économies d'énergie. L'exploitant voit clairement les potentiels d'économies sans qu'aucune étude supplémentaire ne soit nécessaire.

Les modèles analytiques peuvent être classés en deux types principaux :

- les audits énergétiques sélectifs, pour lesquels l'auditeur a toute latitude pour choisir les principales zones d'intérêt,
- les audits énergétiques ciblés, pour lesquels l'exploitant définit les principales zones d'intérêt, et qui sont généralement :
  - les audits énergétiques spécifiques d'un système
  - les audits énergétiques exhaustifs.

Audit énergétique sélectif

Les audits énergétiques sélectifs recherchent principalement les économies les plus importantes et ne prêtent pas attention aux économies mineures. Ce modèle d'audit offre un très bon rapport qualité prix lorsqu'il est utilisé par une équipe d'auditeurs expérimentés mais, dans le plus mauvais des cas, peut n'être qu'un « écrémage ». Il y a toujours le risque qu'après la découverte de quelques mesures d'économies significatives, le reste soit ignoré.

Audit énergétique ciblé

Pour l'audit énergétique ciblé, le détail de la mission est fixé dans des directives détaillées émises par l'exploitant, ce qui signifie que la plupart des systèmes soumis à l'audit énergétique ciblé sont connus d'avance. Les directives rédigées par l'exploitant peuvent délibérément exclure certaines zones. La raison de cette exclusion est que ces zones sont réputées anodines au plan des coûts (ou plus faciles à maîtriser).

En règle générale, l'audit énergétique ciblé donne une répartition détaillée de la consommation et comporte des calculs détaillés relatifs aux économies d'énergie et aux investissements. Si les directives sont adéquates, l'audit donne lieu à un rapport standard.

Du point de vue de l'exploitant, il existe toujours un risque, si le contrôle qualité d'un audit énergétique ciblé est négligé : les auditeurs peuvent être tentés de glisser tout doucement vers un audit énergétique sélectif parce que ce modèle nécessite toujours moins de travail.

Audit énergétique spécifique d'un système
Un exemple d'audit énergétique ciblé réduit à sa plus simple expression est l'audit énergétique spécifique d'un système. Ce type d'audit a un objectif strictement limité (un seul système, dispositif ou procédé), mais la minutie apportée à la tâche est généralement très élevée. L'avantage de ce type de modèle d'audit est qu'il est possible de définir l'expertise nécessaire pour le travail, qui peut être supérieure à celle qu'un auditeur plus généraliste peut apporter.

L'audit énergétique spécifique d'un système fournit une description détaillée du système en identifiant toutes les mesures d'économies, avec des options relatives au système particulier, et il peut fournir le rapport coût-avantage desdites options.

Un bon choix consiste à associer ce type d'audit avec d'autres modèles d'audit plus exhaustifs, par exemple effectuer un audit énergétique préliminaire suivi d'audit(s) spécifique(s) des systèmes pour lesquels des possibilités d'économies importantes ont été identifiées.

Les audits énergétiques spécifiques d'un système apportent de fortes potentialités d'économies en comparaison de l'énergie utilisée par le système. Le problème est qu'en étudiant uniquement une partie du site, il manque la vue d'ensemble et qu'il existe un risque d'optimisation partielle. Par exemple, en étudiant que le rendement énergétique des systèmes à air comprimé ou des systèmes de refroidissement, les opportunités de récupération de chaleur ne peuvent être évaluées, faute de savoir où cette chaleur pourrait être utilisée de la manière la plus efficace possible. Les systèmes énergétiques sont en général interconnectés et rarement indépendants.

Audit énergétique exhaustif
Un audit énergétique exhaustif est un audit énergétique ciblé se situant à l'extrémité la plus large de l'échelle (voir Figure 2.10). Il porte sur la totalité des utilisations de l'énergie sur le site, y compris sur les systèmes mécaniques et électriques, les systèmes d'alimentation des procédés, tous les procédés consommant de l'énergie, etc. Certains systèmes mineurs peuvent être exclus, lorsqu'ils n'ont qu'une influence réduite sur la consommation totale d'énergie par exemple les portes actionnées par moteurs électriques).

La différence entre un audit énergétique exhaustif et un audit énergétique ciblé réside dans le fait que l'audit énergétique ciblé ignore délibérément certaines zones qui sont connues et spécifiées à l'avance tandis que l'audit énergétique exhaustif porte à priori sur toutes les consommations d'énergie importantes.

Le point de départ d'un audit énergétique exhaustif est toujours une analyse de la répartition détaillée de la consommation d'énergie totale. Ce type d'audit émet des observations sur tous les systèmes consommateurs d'énergie spécifiés au début, indépendamment des économies d'énergie identifiées. Il met en évidence toutes les mesures d'économies potentielles et comporte des calculs détaillés des économies d'énergie et des coûts d'investissement.

Ce modèle réunit aussi les éléments de base pour l'élaboration d'un compte-rendu très détaillé et standard qui offre certains avantages à l'exploitant, notamment en matière de contrôle qualité et de surveillance.

Avantages obtenus pour l'environnement
Étant donné qu'un audit énergétique identifie les principales zones, opérations et types d'énergie utilisés dans une unité, un procédé ou un site, les constatations qui y sont mentionnées peuvent

servir à identifier et à hiérarchiser les opportunités d'économie d'énergie offrant un bon rapport coût efficacité.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
Voir Description, ci-dessus.

Applicabilité
Voir la rubrique Description, ci-dessus.

Le type d'audit énergétique et sa fréquence de mise en œuvre sont spécifiques à une usine. Un audit énergétique à cheminement direct (walk-through) convient habituellement aux petites installations.

Un audit énergétique peut être réalisé dans un premier temps pour évaluer l'état de l'efficacité énergétique dans une installation ou un système. Par la suite, des audits peuvent être menés consécutivement à des modifications importantes dans l'installation qui sont susceptibles de faire varier la production et/ou la consommation, ou encore consécutivement à des changements dans les paramètres d'exploitation, etc. Cette approche suppose que tous les audits énergétiques soient exhaustifs. Toutefois, même après des périodes ne comportant pas de modification significative apparente, il faut de temps à autre procéder à des audits afin de s'assurer qu'il n'existe pas de dérive dans l'efficacité énergétique de l'exploitation.

Une autre démarche consiste à faire effectuer un audit préliminaire pour identifier les domaines méritant d'être soumis à des audits plus approfondis, audits qui seront ensuite planifiés en fonction de facteurs tels la facilité d'application des techniques d'efficacité énergétique, les besoins en capital, etc. (voir Section 2.2.1). C'est pourquoi, un système particulier peut ne faire l'objet que d'audits espacés dans le temps, mais des audits peuvent être effectués régulièrement dans l'installation, sur des systèmes différents.

Aspects économiques
Voir la rubrique Description, ci-dessus.

Agent moteur pour la mise en œuvre
- Réduction des coûts.
- Adhésion à des contrats d'économie d'énergie, etc.

Exemples
Les audits sont largement utilisés. Un audit énergétique de type exhaustif pour une entreprise donnée peut être réalisé conformément à la Figure 2.10.

Norme nationale française : référentiel de bonnes pratiques intitulé « Diagnostic énergétique dans l'industrie » AFNOR BP X 30 - 120

Références bibliographiques
[7, Lytras, 2005, 31, Despretz, 40, ADENE, 2005, 92, Motiva Oy, 2005, 165, BESS_EIS, 227, TWG, 250, ADEME, 2006]

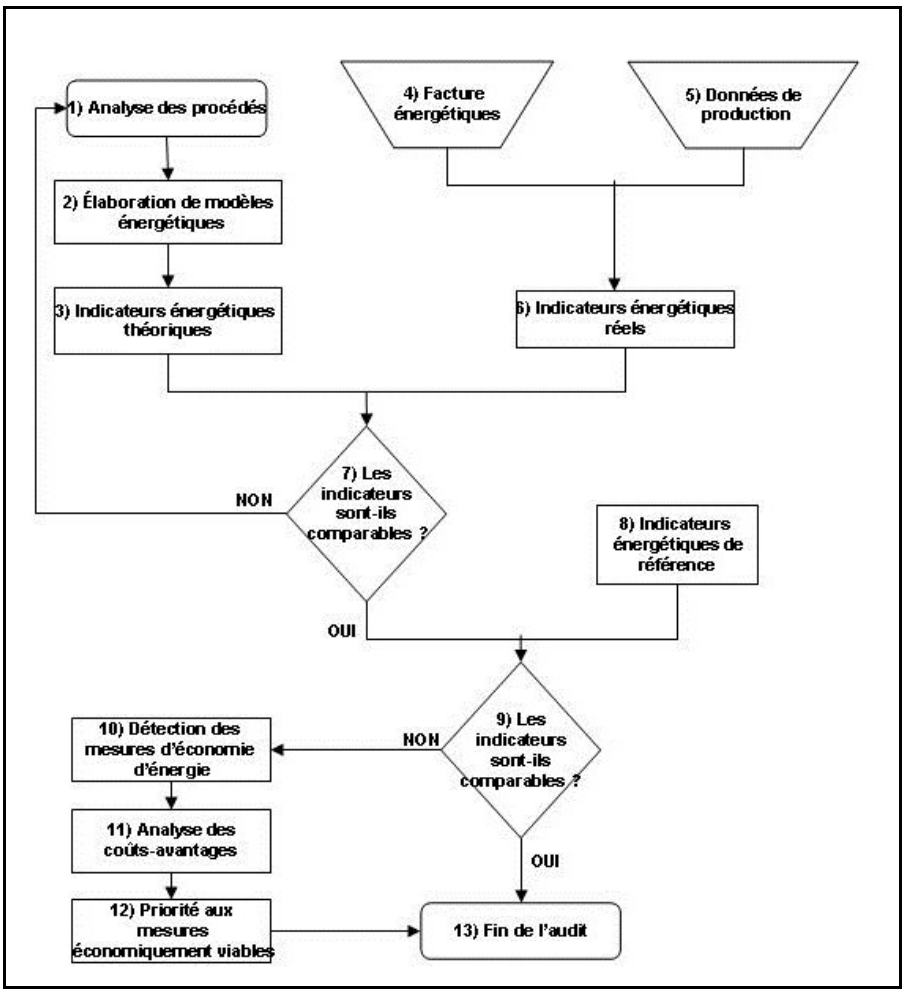


Figure 2.10 : Schéma d'un audit énergétique de type exhaustif
[11, Franco, 2005]

2.12 Méthodologie du pincement

Description

La méthodologie du pincement est l'application de la technologie du pincement. Il s'agit d'une méthodologie pour minimiser la consommation d'énergie dans les procédés en fixant par le calcul des objectifs énergétiques pouvant être atteints du point de vue de la thermodynamique et en les réalisant grâce à l'optimisation des systèmes de récupération de chaleur, des méthodes d'alimentation en énergie et des conditions de fonctionnement des procédés. Bien qu'elle soit également connue en tant que *intégration des procédés* ou *intégration énergétique,* il s'agit toujours des retombées de l'application des résultats de la méthodologie du pincement (per ex. voir Section 2.4).

Tous les procédés comprennent des flux chauds et des flux froids. Un flux chaud est un flux qu'il faut refroidir et un flux froid est un flux qu'il faut chauffer. Pour tout procédé, on peut tracer sur un diagramme température-enthalpie une ligne unique qui représente soit la totalité des flux chauds, soit la totalité des flux froids du procédé. Une ligne représentant la totalité des flux chauds ou des flux froids est dénommée, respectivement, courbe composite chaude ou courbe composite froide. La construction d'une courbe composite est illustrée sur la figure 2.11 où sont représentés deux flux chauds dans un diagramme température-enthalpie.

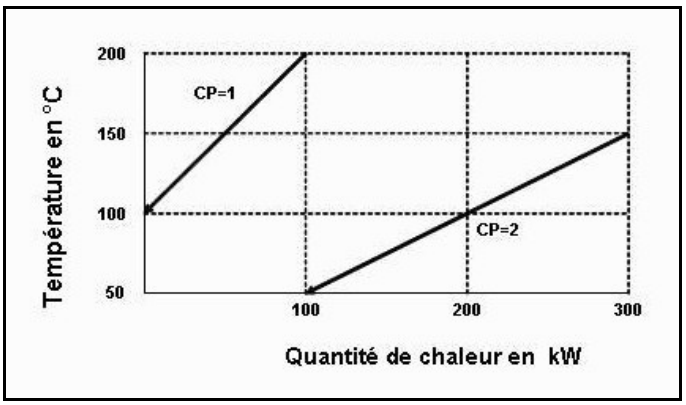


Figure 2.11 : Deux flux chauds

Le flux 1 est refroidi de 200 à 100 °C. Il possède un CP (c'est-à-dire un débit massique x pouvoir calorifique spécifique) égal à 1 ; il perd donc une quantité de chaleur égale à 100 kW. Le flux 2 est refroidi de 150 à 50 °C. Il possède un CP égal à 2 ; il perd donc une quantité de chaleur égale à 200 kW.

La courbe composite chaude est obtenue par simple addition des quantités de chaleur sur les différentes plages de température :

- entre 200 et 150 °C, il n'existe qu'un flux avec un CP de 1. La perte de chaleur dans cette plage de température est donc de 50 kW
- entre 150 et 100 °C, il existe deux flux avec un CP total de 3. La perte de chaleur totale de 150 à 100 °C est donc de 150 kW. Comme le CP total de 150 à 100 °C est supérieur au CP de 200 à 150 °C, le tronçon de la courbe composite chaude devient plus plat dans la seconde plage de température de 150 à 100 °C
- entre 100 et 50 °C, il n'existe qu'un flux, avec un CP de 2. La perte de chaleur dans cette plage de température est donc de 100 kW.

La Figure 2.12 représente la courbe composite chaude.

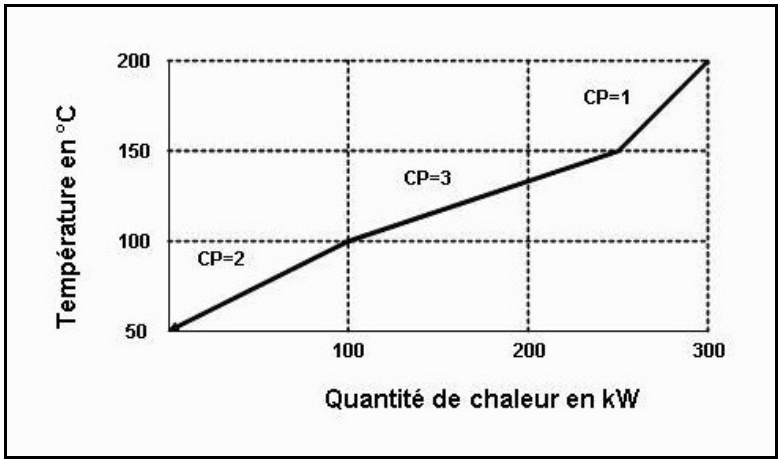


Figure 2.12 : Courbe composite chaude

La courbe composite froide se construit de la même manière. Dans les applications pratiques, le nombre de flux est généralement bien plus élevé, mais ces flux sont représentés exactement de la même manière.

La Figure 2.13 représente les courbes composites chaudes et froides portées sur le même diagramme température-enthalpie. Ce diagramme montre la totalité des besoins du procédé en chauffage et en refroidissement.

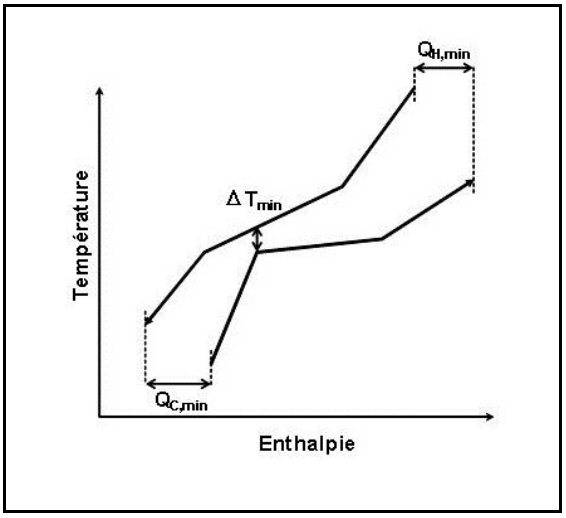


Figure 2.13 : Courbes composites faisant apparaître le pincement et les objectifs énergétiques

Le long de l'axe des enthalpies, il existe une zone de recouvrement. La courbe composite chaude peut être utilisée pour réchauffer la courbe composite froide par échange de chaleur de procédé à procédé. Néanmoins, à chaque extrémité il existe un surplomb de sorte que l'extrémité haute de la courbe composite froide nécessite une source de chaleur extérieure ($Q_{H,min}$) et que l'extrémité basse de la courbe composite nécessite une source de refroidissement extérieur ($Q_{C,min}$). Ces sources sont dénommées les utilités cibles chaudes et froides.

Le point pour lequel les courbes sont au plus près de se toucher est connu comme étant le pincement. Au point de pincement, les courbes sont séparées par l'écart de température minimum ΔT_{min}. Pour cette valeur de ΔT_{min}, la zone de recouvrement fait apparaître la quantité maximum possible d'échange de chaleur de procédé à procédé. En outre, $Q_{H,min}$ et $Q_{C,min}$ sont les besoins minimum en utilités.

Dès lors que le point de pincement et les utilités cibles ont été identifiés, les trois règles d'or de la méthodologie du pincement peuvent être appliquées. Le procédé peut être considéré comme constitué de deux systèmes séparés (voir Figure 2.14), un système au-dessus du pincement et un système au-dessous du pincement. Le système au-dessus du pincement nécessite un apport de chaleur en provenance d'une source extérieure et constitue donc un puits de chaleur tandis que le système au-dessous du pincement peut rejeter de la chaleur vers un puits extérieur et constitue donc une source de chaleur.

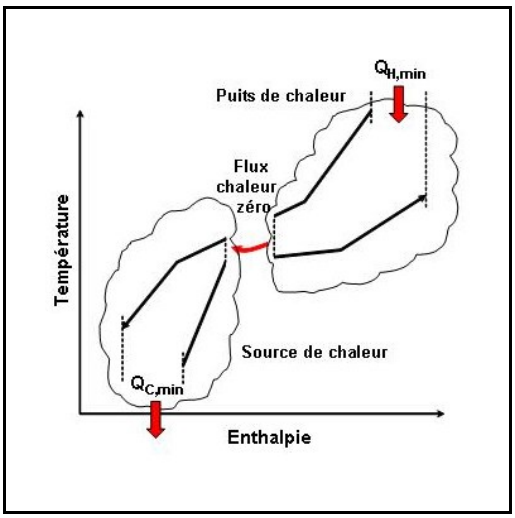


Figure 2.14 : Représentation schématique des systèmes au-dessus et au-dessous du pincement

Les trois règles sont les suivantes :

- il ne faut pas de transfert de chaleur à travers le pincement
- il ne faut pas de refroidissement extérieur au-dessus du pincement
- il ne faut pas d'apport de chaleur au-dessous du pincement.

Si l'on appelle α la quantité de chaleur circulant à travers le pincement, alors un apport supplémentaire (α) en chauffage (utilité) doit être fourni et un apport supplémentaire α en refroidissement (utilité) est nécessaire (voir Figure 2.15). De manière similaire, tout refroidissement du puits de chaleur et tout chauffage extérieur de la source de chaleur accroît la demande en énergie.

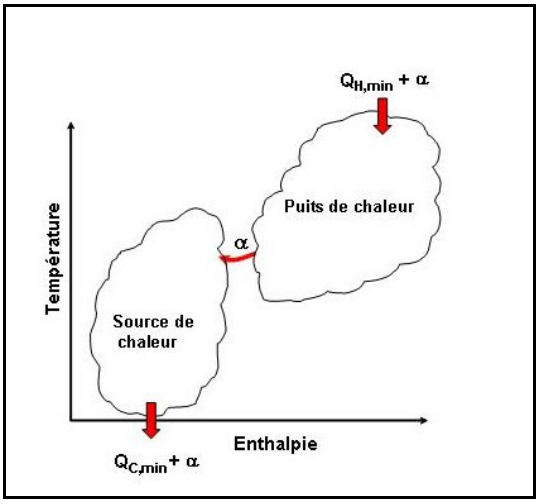


Figure 2.15 : Transfert de chaleur par pincement depuis le puits de chaleur vers la source de chaleur

Ainsi :

$$T = A - \alpha$$ **Équation 0.1**

où :

T = consommation d'énergie cible
A = consommation d'énergie réelle
α = Flux de chaleur à travers le pincement.

Pour atteindre les cibles énergétiques, les flux de chaleur à travers le pincement doivent être éliminés.

Avantages obtenus pour l'environnement
Optimisation du bilan énergétique sur un site de production.

Effets croisés
Vraisemblablement aucun.

Données opérationnelles
La clé de l'application de la méthodologie du pincement à des procédés discontinus réside dans l'extraction des données. Il n'existe aucun moyen de faire autrement ; des mesures et une chronologie précise concernant tous les flux des procédés sont indispensables si l'on veut découvrir des opportunités de réduction des coûts (= économies d'énergie).

Applicabilité
La méthodologie du pincement peut être appliquée à une grande variété d'industries mettant en œuvre des flux de procédé à différents niveaux de température. On y fait appel pour la conception de nouvelles usines ou de nouvelles unités, pour des modernisations importantes ou pour des études détaillées des performances d'une usine telles que :

- analyse énergétique dans les unités de traitement
- analyse du système d'alimentation électrique et thermique (chaleur) ainsi que des utilités
- conception et analyse d'un réseau d'échangeur de chaleur
- analyse globale d'un site pour optimiser l'intégration des procédés et des utilités
- analyse du système d'eau et d'hydrogène.

Les premières applications de la méthodologie du pincement ont vu le jour dans les usines de raffinage, de pétrochimie, et de produits chimiques en vrac, où elle a permis des économies d'énergie et de capital. Toutefois, la méthodologie a récemment fait ses preuves dans un large éventail de procédés et d'industries, y compris dans la cogénération, l'industrie pharmaceutique, l'industrie papetière, l'industrie du ciment, l'industrie alimentaire, l'industrie des boissons et l'industrie laitière (par exemple brassage de la bière, torréfaction du café, production de glaces et de produits laitiers), voir les exemples, ci-dessous.

La méthodologie du pincement a également été utilisé dans divers types de procédés incluant les opérations discontinues (par lots), semi-continues, et continues comprenant des paramètres d'exploitation variés comme des charges d'alimentation variables, des fluctuations saisonnières de la demande, des utilités multiples, des contraintes de qualité et des contraintes dans le domaine de l'environnement.

Aspects économiques
Voir les délais de retour sur investissement dans le Tableau 2.5.

La méthodologie du pincement passe souvent pour être onéreuse et compliquée. Néanmoins pour des cas simples, les calculs peuvent se faire à la main ou en utilisant des outils logiciels (certains sont mis à disposition gratuitement). Des projets peuvent être entrepris à partir d'environ 5000 EUR. Les données nécessaires pour faire une analyse sont très peu nombreuses, et l'analyse par la méthodologie du pincement est un élément de base dans la formation des ingénieurs de l'industrie.

Dans des situations plus complexes, il faudra faire appel à une équipe expérimentée pour assurer l'analyse du pincement, la simulation du procédé, l'estimation des coûts et le fonctionnement de l'usine.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Économies en capital et en coûts de fonctionnement.

Lorsque cette méthodologie a été introduite dans des exploitations existantes, elle a souvent été à l'origine d'avantages pour le procédé, tels qu'une plus grande souplesse dans le fonctionnement de l'usine, la suppression de goulots d'étranglement, un accroissement de la capacité et une réduction des effets d'encrassement.

Exemples

Économies réalisées grâce à la mise en œuvre de la méthodologie du pincement[1] (Coûts : USD[2], extrait de Ullman's, 2000)	
Description du procédé	**Économies**
Unité de raffinage de pétrole brut	Économies d'environ 1,75 USD × 10^6 avec un retour sur investissement de 1,6 an
Important complexe pétrochimique fabricant de l'éthylène, du butadiène, des polyéthylènes haute et basse densité (HDPE et LDPE), et du polypropylène	Économies d'environ 7,00 USD × 10^6 avec des retours sur investissement de 12 à 20 mois
Produits chimiques sur mesure, procédés discontinus avec 30 réacteurs et plus de 300 produits	Économies d'environ 0,45 USD × 10^6 avec retour sur investissement de 3 mois à 3 ans
Produits chimiques de spécialités à base de soufre, traitements discontinus et continus	30 % d'économies sur la facture totale d'énergie du site (soit une valeur d'environ 0,18 USD × 10^6 avec des retours sur investissement de 9 – 16 mois
Raffinerie d'huile comestible, traitement discontinu, large éventail de charges d'alimentation	Économies de 70 % d'énergie du procédé soit l'équivalent d'environ 0,.79 USD × 10^6 avec des retours sur investissement de 12 à 18 mois et une suppression des goulots d'étranglement équivalant à 15 % d'augmentation de capacité
Traitement discontinu des produits laitiers et des boissons lyophilisées	Économies de 30 % (soit l'équivalent d'environ 0,20 USD × 10^6) avec un retour sur investissement de moins de 1 an
Brasserie	Économies de 12 à 25 % des coûts d'énergie avec des retours sur investissement de 9 mois à 2 ans
Distillerie de whisky à la pointe de la technique	Suppression importante des goulots d'étranglement et économies d'environ 0,35 USD × 10^6 avec des retours sur investissement de 18 mois à 2 ans
Usine à papier	Économies de 8 à 20 % de la facture d'énergie avec des retours sur investissement de 1 à 3 ans
Traitement continu de l'acétate de cellulose	Économies d'environ 0,28 USD × 10^6 avec un retour sur investissement de 1 an
Traitement continu du ciment sec	Grandes économies d'énergie
Remarques : [1] Les économies susmentionnées concernent principalement les coûts d'énergie. La majorité des sociétés ont aussi bénéficié d'une augmentation de leur rendement et d'une amélioration de la souplesse et de l'efficacité opérationnelle des procédés ; la valeur économique de ces avantages n'est pas incluse dans le tableau ci-dessus. [2] Aucun taux de change n'est communiqué car les dates exactes des données et des mises en œuvre sont inconnues.	

Tableau 2.6 : Méthodologie du pincement : quelques exemples d'application et d'économies [266, Ullmann's, 2000]

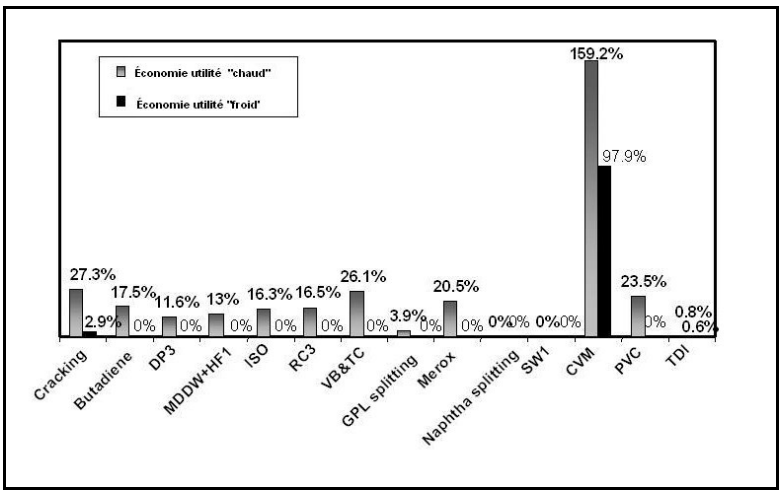


Figure 2.16 : Économies d'énergie identifiées par la méthodologie du pincement
Remarque : les acronymes font référence à des stades de traitement en chimie organique et pour les polymères
[51, Pini, 2005]

Références bibliographiques
[117, Linnhoff March], [118, KBC], [12, Pini, 2005, 51, Pini, 2005, 67, Marttila, 2005, 119, Neste Jacobs Oy]

Logiciel de pincement gratuit : Pinch2.0 de Fraunhofer ISI/Peter Radgen.

Cette technique est également cité dans d'autres BREF : OFC (Chimie fine organique), SIC (Chimie organique de spécialités), LVIC-S (Chimie inorganique – produits solides et autres), REF (Raffineries), etc.

2.13 Analyse de l'enthalpie et de l'exergie

Description
L'analyse de l'énergie (ou de l'enthalpie) et l'analyse de l'exergie sont des techniques fondées sur la détermination de l'énergie ou de l'exergie des flux du système thermique étudié et ainsi que des bilans énergétiques ou exergétiques des composants reliés par ces flux.

Pour conduire ces analyses, il convient de suivre les étapes ci-après :

1. Les limites du système étudié (l'usine dans sa globalité ou seulement en partie) sont à définir avec précision.
2. Le système global doit être fractionné en diverses parties reliées entre elles par des flux de matières et d'énergie. L'importance du morcellement dépend du niveau d'approfondissement demandé à l'analyse et des informations disponibles.
3. Les propriétés thermodynamiques caractérisant les flux doivent être définies : débit massique, pression, température, composition, puissance sur l'arbre, flux thermique, etc. Lorsque l'analyse porte sur un système existant, ces informations sont obtenues par la mesure. En revanche, si l'analyse concerne une installation en devenir, on fait appel à la simulation.
4. Lorsque tous les flux définis ont été entièrement caractérisés, il est possible de déterminer leur enthalpie et leur exergie (voir Section 1.2.2 et Annexe 7.1).
5. Les enthalpies et les exergies peuvent servir à déterminer d'autres paramètres tels que les pertes d'énergie dans les composants, les irréversibilités, les rendements, et peuvent

être démontrées, par exemple, avec les diagrammes de Sankey (énergie) ou de Grassmann (exergie).

6. Ces bilans et ces analyses peuvent être effectués en temps réel à des intervalles de temps différents et les informations relatives aux « coûts exergétiques », par exemple la quantité de ressources exergétiques nécessaires à l'établissement d'un flux donné, peuvent être utilisées pour diagnostiquer les dérives de la performance de l'usine par rapport à un état de référence reconnu comme tel.
7. Enfin, la relation entre thermodynamique et économie peut-être déterminée facilement, étant donné que le coût de tout dysfonctionnement ou inefficacité d'un sous-système de l'usine a deux composantes : premièrement, la quantité de ressources en matière et deuxièmement, l'argent dépensé pour la compenser. La théorie exposant les principes fondamentaux d'une telle technique est dénommée la thermoéconomie (voir Section 2.14).

Comme on peut le constater, les analyses énergétiques et exergétiques peuvent être menées en parallèle, et leurs résultats s'expriment dans les mêmes unités. Toutefois, l'analyse exergétique, bien que moins utilisée et plus complexe, s'avère plus utile parce qu'elle met directement en évidence les points où des économies d'énergie sont possibles.

L'énergie est une grandeur physique qui se conserve : elle n'est ni créée, ni détruite, de sorte qu'une analyse énergétique ne peut que rendre compte de l'énergie perdue à travers les limites du système (pertes de chaleur, gaz évacués dans la cheminée, etc.). Toutefois, chaque transformation de l'énergie donne lieu à une dégradation de sa qualité : l'énergie se conserve mais son utilité décroît toujours. Dans cet ordre d'idée, l'exergie est une mesure définie pour prendre en compte la qualité de l'énergie. L'énergie électrique et le travail mécanique sont les formes d'énergie offrant la meilleure qualité et par conséquent leurs contenus énergétiques et exergétiques sont exactement identiques. D'un autre côté, une masse d'eau chauffée à 20 degrés au-dessus de la température ambiante possède de l'énergie, mais son contenu exergétique est négligeable. Le contenu exergétique mesure exactement la convertibilité maximum (en unités d'énergie) d'un flux donné en d'autres formes d'énergie. De ce fait, l'exergie n'est pas une grandeur qui se conserve. Dans chaque processus à l'état stable, l'exergie des flux entrants est toujours supérieure à l'exergie des flux sortants. Cette différence est dénommée irréversibilité, et sa quantification par une analyse exergétique permet de déceler les points où la qualité de l'énergie se dégrade (en d'autres termes, les endroits où il est possible d'économiser de l'énergie). (Ces aspects sont expliqués de manière plus détaillée dans l'Annexe 7.1).

A titre d'exemple, considérons une chaudière utilisée pour produire de la vapeur basse pression pour un procédé donné. Si l'on fait une analyse énergétique, cette chaudière peut avoir un rendement énergétique de 85 %, et semble être un dispositif efficace. Toutefois, la qualité de l'énergie contenue dans la vapeur est faible, de sorte que le rendement exergétique de la chaudière peut n'être que de 25 % environ. Cette valeur faible indique qu'il existe un fort potentiel d'économie d'énergie, si par exemple, l'on remplace la chaudière, par un générateur de vapeur à récupération de chaleur d'un système de cogénération dans lequel les gaz chauds en entrée ont été utilisés pour entraîner une turbine qui capte l'énergie de haute qualité. Contrairement à ce que l'on pourrait croire intuitivement, plus la qualité de la sortie est faible, plus le rendement énergétique de la chaudière, pouvant être réalisé industriellement, est élevé ; toutefois l'indicateur de rendement exergétique est conforme à ce que dicte le bon sens.

Avantages obtenus pour l'environnement

Ces analyses permettent de localiser les pertes d'énergie et d'exergie, ainsi que les endroits offrant le plus fort potentiel pour économiser de l'énergie. Comme l'exergie dépend de toutes les propriétés caractérisant un flux donné, elle permet aussi de déceler les endroits où sont produits des polluants dans l'usine, ainsi que les quantités produites.

Effets croisés

Vraisemblablement aucun.

Données opérationnelles
La disponibilité des informations concernant les flux inhérents au système énergétique constitue le point clé de l'application de ces techniques. Ces informations sont obtenues par des mesures dans les usines en exploitation et par simulation au stade de la conception. Cette contrainte limite le degré d'approfondissement des analyses.

Applicabilité
Le concept d'exergie est utilisé dans de nombreuses situations pour localiser les endroits où il existe une perte de ressources naturelles (voir les références bibliographiques ci-dessous).

Cette technique peut être appliquée à tout système thermique. L'un de ses grands avantages réside dans le fait qu'elle rend possible les comparaisons entre différentes usines. En outre, l'analyse exergétique fournit une référence absolue : le système idéal qui est un système sans irréversibilité aucune.

L'analyse peut être utilisée pour déterminer l'état d'une usine en exploitation, en utilisant des résultats de mesures disponibles et en les comparant à des valeurs théoriques. Par ailleurs, il est utile d'étudier des voies alternatives et les possibilités d'amélioration dès le stade de conception.

Toutefois, l'utilisation de l'exergie dans les sociétés est encore limitée. Aux Pays-Bas, par exemple, le concept d'exergie est utilisé dans les divisions ingénierie des grands groupes, tels que Shell, Dow Chemical, Unilever, DSM, AKZO NOBEL, etc. et dans un certain nombre de grandes société d'ingénierie. Plusieurs études ont été réalisées. Elles aboutissent toutes à la conclusion que les analyses d'exergie apportent des informations valables mais que les analyses prennent trop de temps, et qu'il n'existe pas suffisamment de données avec lesquelles comparer les résultats. Par exemple, une analyse comparative fondée sur les rendements exergétiques n'est pas chose facile, en raison de l'absence de données pour effectuer des comparaisons. Un programme commercial permettant de calculer les exergies a été mis au point pour faciliter les analyses d'exergie. A l'aide de ce programme, il est possible de calculer les exergies des flux sur des flowsheets propriétaires, avec une réduction importante du temps nécessaire à la conduite des analyses exergétiques. Toutefois, les flowsheets sont onéreuses et seul un nombre réduit de sociétés en ont suffisamment l'utilité pour en justifier le coût.

La plupart des petites et moyennes entreprises n'utilisent pas ce type de logiciel, en raison de leur coût élevé, du manque de personnel formé à cet effet et du niveau de précision requis pour l'introduction des données dans ces programmes. Pour ces sociétés, il a été inventé une nouvelle méthode qui est actuellement en cours de mise au point.

Aspects économiques
L'analyse exergétique a la réputation d'être onéreuse et difficile. Toutefois, si une information sur les propriétés des flux est disponible (ce qui est une situation fréquente), les analyses d'enthalpie et d'exergie peuvent être effectuées à coût réduit. Un nombre restreint d'outils sont disponibles pour effectuer ces analyses en y associant un progiciel de flowsheet. De cette manière, l'analyse peut être effectuée rapidement et efficacement. Les pertes d'exergie désignent les endroits où les économies les plus importantes peuvent être réalisées (en termes de matière, d'énergie et donc de coûts). Le coût d'une analyse énergétique est au moins de 5000 EUR.

En outre, pour des projets de faible amplitude, l'analyse peut être manuelle. Dans ce cas, l'utilisation qu'on peut faire de l'analyse exergétique est très limitée. Une nouvelle méthode dénommée balayage exergétique est en cours de mise au point afin de d'offrir un outil utile.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Il s'agit d'une technique à faible coût qui peut valoriser les mesures faites par l'usine. Elle fait également apparaître les composants offrant des possibilités d'économies d'énergie. Les informations obtenues dans le cadre de cette analyse peuvent aussi être exploitées au moyen d'autres outils, comme les diagrammes de Sankey (voir Section 2.7.1).

Exemples
Les analyses de l'énergie (ou de l'enthalpie) sont couramment utilisées pour l'évaluation d'un système thermique en fonctionnement ou lors de sa conception. L'utilisation de l'exergie n'est pas aussi fréquente, même si elle a tendance à augmenter. Comme mentionné ci-dessus, de grands groupes tels que Shell, Dow Chemical, Unilever, DSM, AKZO NOBEL, etc. ainsi que de grandes sociétés d'ingénierie y ont fait appel.

Références bibliographiques
[227, TWG]
Des informations et des exemples d'analyses d'enthalpie et d'exergie peuvent être trouvés dans n'importe quel ouvrage de thermodynamique de l'enseignement supérieur. Pour de plus amples précisions sur l'analyse exergétique, consulter

- T. J. KOTAS. Krieger, The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Florida, 1996
- Kotas, T.J., The Exergy Method of thermal and chemical processes, Krieger Publishing Company, Melbourne, USA, 1999.
- Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes, Hemisphere, New York, 1988
- Cornelissen, R.L., 1997, Thermodynamics and sustainable development, The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility, Ph.D. thesis, University of Twente, http ://www.ub.utwente.nl/webdocs/wb/1/t0000003.pdf)
- Cornelissen, R.L., and Boerema C. 2001, Exergy Scan - the new method for cost effective fuel saving, Proceedings of ECOS 2001, p.p. 725-731, Istanbul.

Outils :

- Exergy calculator : http ://www.exergoecology.com/excalc
- ExerCom and Exergy Scan : des informations supplémentaires sont disponibles à l'adresse suivante : www.exergie.nl

2.14 Thermoéconomie

Description
Les techniques d'analyses thermoéconomiques associent la première et la deuxième loi de la thermodynamique avec des informations de coûts au niveau du système. Ces techniques aident à comprendre le processus de formation des coûts, à minimiser les coûts de production globaux et à affecter des coûts à plusieurs produits issus du même procédé.

Comme indiqué dans la Section 1.2, l'énergie n'est pas consommée dans les procédés, mais en revanche, l'énergie utile se dégrade en des formes moins utiles. Des processus éminemment irréversibles, comme la combustion, le transfert de chaleur, la réduction de pression etc. ne peuvent être analysés qu'au moyen d'une analyse exergétique (voir Section 2.13). L'exergie constitue une mesure du changement, objective et universelle, et peut être considérée comme le trait d'union entre la thermodynamique et les méthodologies d'évaluation des coûts parce qu'elle est reliée aux propriétés d'état comme la pression, la température, l'énergie, etc., qui sont mesurables. Une analyse économique peut évaluer les coûts en combustible, les coûts d'investissement, d'exploitation et d'entretien de l'installation.

Ainsi, la thermoéconomie évalue le coût des ressources consommées, l'argent et les irréversibilités du système au regard du procédé de production dans sa globalité. La thermoéconomie fait apparaître de quelle manière il est possible d'utiliser plus efficacement les ressources dans l'optique de les économiser. Les coûts en argent traduisent l'impact économique des inefficacités et sont utilisés pour améliorer les rapports qualité-prix des procédés de

production. L'évaluation du coût des flux et des procédés dans une usine aide à comprendre leur processus de formation, depuis les ressources en entrée jusqu'aux produits finaux.

Avantages obtenus pour l'environnement
Principalement, des économies d'énergie, mais également une réduction des matières consommées et gaspillées ou émises sous forme d'effluents

Effets croisés
Il n'a pas lieu d'en attendre d'une technique de calcul.

Données opérationnelles

Ces analyses permettent de résoudre des problèmes liés à des systèmes énergétiques complexes qui ne sauraient être résolus par des analyses énergétiques traditionnelles. Entre autres applications, l'analyse thermoéconomique est utilisée pour:

- l'évaluation rationnelle des prix des produits de l'usine, fondée sur des critères physiques.
- l'optimisation des variables spécifiques à une unité de traitement en vue de minimiser le coût de production final c'est-à-dire une optimisation totale et globale.
- la détection des inefficacités et le calcul de leur impact économique dans les usines en exploitation c'est-à-dire le diagnostic thermoéconomique de l'exploitation de l'usine.
- l'évaluation des diverses alternatives pour la conception, les décisions opérationnelles et la rentabilité de l'entreprise.
- les audits énergétiques.

Applicabilité
Aucune donnée disponible.

Aspects économiques
Selon le cas considéré.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Réductions des coûts et économies de matières.

Exemples
Diverses centrales électriques (y compris avec cycle combiné à gazéification), raffineries, usine de produits chimiques, raffineries de sucre, usine combinée de production électrique et de dessalement, systèmes de chauffage urbain, etc.

Références bibliographiques
[258, Tsatsaris and Valero, 1989]

À l'adresse : http://teide.cps.unizar.es
Valero : Thermoeconomics : A new chapter of physics, etc.
A.Valero and C. Torres : Thermoeconomic analysis

D'autres informations sont disponibles sur des sites tels que : http ://www.eolss.net/E3-19-toc.aspx

2.15 Modèles énergétiques

2.15.1 Modèles énergétiques, bases de données et bilans

Description
Les modèles énergétiques, les bases de données et les bilans sont des outils très utiles pour réaliser une analyse énergétique complète et approfondie et constituent, en principe, une partie d'un audit énergétique analytique ou exhaustif (voir Section 2.11). Un modèle est un plan ou une description visant à faire apparaître où et comment l'énergie est utilisée dans une installation, un système (par exemple une base de données). C'est pourquoi le modèle cherche à enregistrer les informations techniques relatives à l'installation, à l'unité ou au système. Il enregistre le type d'équipement, la consommation d'énergie et les données opérationnelles comme le temps de fonctionnement. Il doit être assez complet (mais pas trop) pour remplir son office, facilement accessible à différents utilisateurs appartenant à des divisions telles que les divisions opérationnelle, gestion de l'énergie, maintenance, achats, comptabilité, etc. Il peut utilement faire partie d'un système de maintenance, ou y être relié, pour faciliter la mise à jour des données enregistrées, comme le rebobinage des moteurs, les dates d'étalonnage, etc. (voir Section 2.9).

Lorsqu'on utilise un modèle énergétique, une base de données ou un bilan, ceux-ci peuvent être construits en fonction des limites du système, (voir Section 1.5), par ex. :

- unités (départements, ligne de production, etc.)
  - système
    - équipements individuels (pompes, moteurs, etc.)
- système d'utilité (par exemple air comprimé, systèmes de pompage, vide, éclairage extérieur, etc.)
  - équipements individuels (pompes, moteurs, etc.).

L'auditeur (ou le collecteur de données) doit prendre soin de s'assurer que le rendement enregistré est bien le rendement effectif du système (comme décrit dans la Section 1.5.1).

Dans la mesure où un modèle énergétique ou une base de données constitue un outil d'importance stratégique pour réaliser un audit énergétique, une bonne pratique consiste à le valider avant utilisation en effectuant un bilan. La première étape consiste à comparer la consommation totale d'énergie telle que résultant des calculs avec la quantité consommée que font apparaître les mesures des approvisionnements énergétiques. Lorsqu'il s'agit d'une installation complexe, ceci peut-être effectué, au niveau d'une unité ou d'un système (voir limites des systèmes, Section 1.5.1 et mesurage, Section 2.10.3). En cas de déséquilibre entre les consommations calculées et les consommations mesurées, il est nécessaire de revérifier les données contenues dans le modèle, en particulier les estimations, telles que les facteurs de charge et le temps de fonctionnement. S'il y a lieu, ils devront être établis avec une plus grande précision. Une autre cause d'erreur peut résider dans la mauvaise identification de tous les systèmes consommant de l'énergie.

Avantages obtenus pour l'environnement
Permet d'établir une planification fondée sur une bonne connaissance des « centres » de consommation d'énergie.

Effets croisés
Aucun, selon toute vraisemblance.

Données opérationnelles
Énergie électrique
Pour modèle, une base de données ou un bilan électrique, il est possible de collecter les données ci-après de chaque dispositif fonctionnant à l'électricité, tels que les moteurs et les entraînements, les pompes, les compresseurs, les fours électriques, etc.

- puissance nominale
- rendement nominal
- facteur de charge
- nombre d'heures de fonctionnement par an.

Alors que la puissance et le rendement sont faciles à obtenir puisqu'ils sont en principe étiquetés sur l'appareil proprement dit, le facteur de charge et le temps de fonctionnement annuel sont estimés.

Des exemples de données collectées pour un modèle énergétique électrique simple sont présentés à l'Annexe 7.7.3.

Lorsque le facteur de charge estimé est supérieur à 50 %, le facteur de charge proprement dit est approximativement égal à :

$$LF = \frac{P_{(eff)} \times \eta}{P_{(nominal)}}$$

où :

- LF est le facteur de charge
- $P_{(eff)}$ est la puissance moyenne électrique estimée, effectivement absorbée par le dispositif pendant son temps de fonctionnement (kW)
- $P_{(nominal)}$ est la puissance nominale (kW)
- η est le rendement nominal du dispositif (à pleine charge).

Si nécessaire, P_{eff} peut être mesuré au moyen de wattmètres.

Il doit être souligné que le rendement et le facteur de puissance d'un dispositif dépendent du facteur de charge comme représenté sur la Figure 2.17, dans le cas d'un moteur générique.

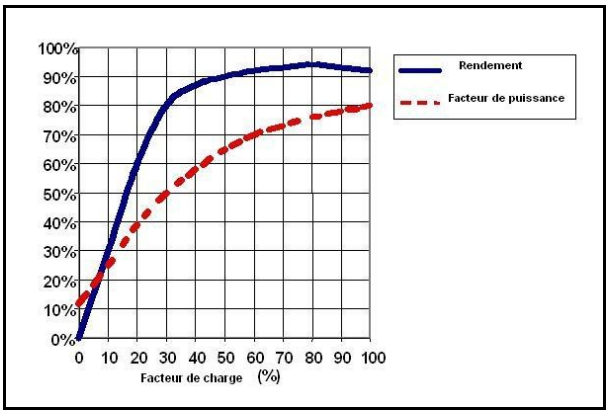


Figure 2.17 : Facteur de puissance d'un dispositif en fonction du facteur de charge [11, Franco, 2005]

Énergie thermique

L'élaboration d'un modèle, d'une base de données ou d'un bilan d'énergie thermique est plus complexe que celle d'un modèle électrique. Pour obtenir une image complète de la consommation thermique, il faut compiler deux types de modèles ou (de bases de données ou de bilans) : un modèle de premier niveau et un modèle de second niveau.

Pour compiler le modèle énergétique de premier niveau, il est nécessaire de faire un inventaire de tous les utilisateurs de tous les types de combustibles. Pour tout consommateur de combustibles (chaudières, fours), il faut collecter les données ci-après :

- type de combustible fourni sur une période de temps donnée, en général une année
- type de caloporteur entrant dans la chaudière (par exemple eau pressurisée) : débit, température, pression
- condensat : pourcentage de récupération, température, pression
- corps de la chaudière : fabricant, modèle, année d'installation, puissance thermique, rendement nominal, superficie de la surface d'échange, temps de fonctionnement annuel, température du corps, facteur de charge moyen
- brûleur : fabricant, modèle, année d'installation, puissance thermique
- échappement : débit, température, teneur moyenne en dioxyde de carbone
- type de caloporteur en sortie (par exemple vapeur) : température, pression.

Bien qu'en théorie toutes ces données devraient être collectées dans le modèle thermique de premier niveau (« côté générateur »), seuls les consommateurs les plus importants sont à prendre en compte (voir Tableau 7.9). Il est, en règle générale, commode de transformer toutes les énergies en énergie primaire ou dans les types d'énergies spécifiques utilisées dans l'industrie en vue de comparaisons ultérieures (voir Section 1.3.6.1).

Les modèles de deuxième niveau (« côté utilisateurs ») sont aussi élaborés en faisant l'inventaire de toutes les machineries pour lesquelles de l'énergie thermique est nécessaire sous quelque forme que ce soit (eau chaude, vapeur, air chaud, etc.) à l'exception du combustible (pris en compte dans le modèle de premier niveau). Pour tout élément d'équipement utilisant de l'énergie thermique, il convient de recueillir les données ci-après :

- type de thermovecteur utilisé
- heures/années de demande thermique
- facteur de charge sous lequel l'énergie thermique est utilisée
- puissance thermique nominale.

Le Tableau 7.9 de l'Annexe 7.7.3 donne un exemple de présentation des données.

Le modèle de deuxième niveau (« côté consommateurs ») permet de vérifier l'adéquation entre la chaleur fournie par les utilités (chaudières, générateurs de chaleur, etc.) et la chaleur demandée par les utilisateurs.

Si la différence est considérée comme acceptable, alors les deux modèles peuvent être considérés comme validés. Dans le cas contraire, il y a lieu de refaire les calculs ou de procéder à des examens plus poussés.

Si la différence entre les deux quantités est importante, elle est vraisemblablement due à un niveau de pertes élevé dans la chaîne production-distribution-utilisation des différents caloporteurs (par exemple vapeur, eau chaude, etc.). Dans ce cas, des actions pour améliorer les rendements énergétiques sont à entreprendre.

Applicabilité
Le type de modèle et le détail des informations collectées dépendent de l'installation.

Une analyse de chaque élément consommant de l'énergie s'avère souvent impossible ou inutile. Les modèles d'énergie électrique sont adaptés à des installations de taille réduite. Une analyse du procédé incluant les détails de la consommation électrique et de la consommation thermique est davantage adaptée aux grandes installations.

Des priorités peuvent être définies afin d'optimiser le rapport coût-bénéfice de la collecte des données, par exemple en la limitant aux équipements dont la consommation de puissance excède un seuil donné ou en demandant dans un premier temps de se concentrer sur les 20 % d'équipements qui utilisent 80 % de la puissance (par exemple, vapeur, électricité), etc. Il convient de remarquer qu'au fur et à mesure de l'utilisation du modèle et de l'obtention de gains en matière d'efficacité énergétique, il devient peu à peu possible d'ajouter le reste des équipements, là encore selon un mode planifié.

Aspects économiques
En fonction du site.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Réduction de coût.

Exemples
Des exemples de fiches de données et de calculs de bilans énergétiques sont présentés dans l'Annexe 7.7.3.

Références bibliographiques
[127, TWG] [11, Franco, 2005]

2.15.2 Optimisation et management modélisé des utilités

Description
Cette démarche réunit les techniques telles que celles décrites dans les Sections 2.10.3 à 2.15 en y ajoutant des systèmes de contrôle et / ou de modélisation informatique.

Pour des installations simples, la possibilité de pouvoir disposer facilement d'une surveillance à moindre coût, de la capture et du contrôle électronique des données, facilite, pour les exploitants, la collecte des données, l'évaluation des besoins énergétiques des procédés de fabrication et le contrôle de ces procédés. Il peut s'agit au départ d'un simple minutage, de mises en service / hors service, de contrôles de pression et de température, de l'emploi de collecteurs de données, etc. et cela est facilité par un recours à des modèles informatiques pour des contrôles plus élaborés.

À des niveaux de complexité plus élevés, une grosse installation disposera d'un système de gestion des informations (systèmes de fabrication et d'exécution), enregistrant et contrôlant toutes les conditions des procédés de fabrication.

Une application spécifique réside dans les modes d'approvisionnement en énergie et de fourniture d'énergie (gestion de l'énergie côté fourniture, gestion de sa distribution ou gestion des utilités), voir la rubrique Applicabilité, ci-dessous. Elle fait appel à un modèle informatique lié à des systèmes de contrôle pour optimiser et gérer les utilités énergétiques (électricité, vapeur, refroidissement, etc.).

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction de la consommation d'énergie et des rejets associés. Voir la rubrique Exemples, ci-dessous.

Effets croisés
En règle générale, les efficacités s'additionnent, mais dans certains cas, si le côté fourniture / distribution des utilités n'est pas bien étudié, alors les avantages inhérents à une réduction de la demande ne sont pas concrétisés (par ex., si des économies de vapeur réalisées dans une seule unité de production ne débouchent que sur une évacuation à l'air libre ailleurs, si le système vapeur ne fait pas l'objet d'un nouveau bilan).

Données opérationnelles
Dans un contexte de complexité croissante, une exploitation optimale et efficace au plan énergétique peut être obtenue en utilisant des outils adéquats ; ceux-ci pouvant aller des simples outils de simulation à base de tableurs ou de la programmation de systèmes de contrôle réparti à des systèmes plus puissants d'optimisation et de gestion des utilités mettant en œuvre des modèles informatiques et pouvant être intégrés à d'autres systèmes de fabrication et de contrôle-commande sur le site.

Un système d'optimisation des utilités sera accessible à du personnel ayant des acquis professionnels et des objectifs très différents (par ex. ingénieurs, personnel d'exécution, directeurs d'usines, acheteurs, comptables). Les principales exigences générales sont énoncées ci-après :

- facilité d'utilisation : les différents utilisateurs ont besoin d'accéder au système et celui-ci doit offrir différentes interfaces utilisateur comme l'intégration des données d'autres systèmes d'information pour éviter une double saisie des données, comme par exemple le plan de gestion des ressources de l'entreprise (ERP), la planification de la production, l'historique des données
- robustesse : doit être un interlocuteur cohérent et fiable pour être accepté par les utilisateurs
- reflet de la réalité : doit refléter la réalité de l'usine (coûts, équipement, temps de démarrage) sans présenter un niveau de détails ingérable
- souplesse : doit avoir la souplesse nécessaire pour absorber à peu de frais les évolutions du contexte de l'usine (par ex. contraintes temporaires, mise à jour des coûts).

Un optimiseur d'utilités devrait permettre de calculer de manière fiable les avantages de telle ou telle option (en ligne ou hors ligne, étude de scénarios de simulation de type « Que se passerait-il si ») et contribuer à apporter les éléments de motivation pour les changements nécessaires (voir Section 2.5).

Les exigences clefs pour un optimiseur d'utilités modélisé sont les suivantes :

- un modèle du combustible, des procédés de génération d'électricité et de vapeur et de système de distribution. Au minimum, le modèle doit rendre compte avec précision :
  - des propriétés de tous les combustibles, y compris leur pouvoir calorifique inférieur et leur composition
  - des propriétés thermodynamiques de tous les flux d'eau et de vapeur de l'installation
  - les performances de tous les équipements d'utilités sur leur plage de fonctionnement normal
- un modèle de toutes les conventions de rachat qui s'appliquent au système d'utilités
- une capacité d'optimisation partiellement en nombres entiers, qui permet des décisions de marche / arrêt sur des équipements d'utilités ainsi que des discontinuités dans le modèle de contrat et / ou le modèle de procédé d'utilités
- validation des données en ligne et détection des erreurs brutes
- boucle ouverte
- optimisation en ligne
- possibilité de réaliser des études de simulation pour études hors ligne (impact des projets, impact des différents types de contrats pour par ex. l'électricité et le combustible).

Applicabilité
Des systèmes de contrôle simples sont applicables même dans les petites installations. La complexité du système ira croissant avec celle du procédé et du site.

L'optimisation et la gestion des utilités est applicable sur des sites mettant en jeu des formes d'utilisations d'énergies multiples (vapeur, refroidissement, etc.), ainsi que différentes options pour l'approvisionnement en énergie entre ces caloporteurs et/ou y compris la génération en interne (cogénération et trigénération, voir Section 3.4).

Les exigences clés pour un optimiseur d'utilités faisant appel à un modèle sont un modèle du combustible,t un modèle des procédés de génération d'électricité et de vapeur et un modèle de système de distribution. Le modèle doit au minimum rendre compte avec précision des caractéristiques de tous les combustibles, y compris de leur pouvoir calorifique inférieur et de leur composition. Ceci peut s'avérer difficile lorsqu'il s'agit de combustibles variés et complexes comme les déchets municipaux qui limitent les possibilités d'optimiser l'exportation d'énergie.

Aspects économiques
Voir Exemples.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Les coûts constituent la motivation principale. Leur réduction, grâce aux économiques d'énergie est compliquée en raison de la complexité des tarifs (voir Section 7.11) sur des marchés soumis à une déréglementation croissante que sont ceux des utilités, des combustibles et de l'électricité, et des quotas d'émissions. Le Tableau 2.7 récapitule les principaux agents moteurs de la démarche des sociétés.

Démarche des sociétés	**Agent moteur (si repéré par +)**	
	Rendement énergétique	**Coûts énergie/contrats**
Prévision de la demande : connaissance des demandes présentes et à venir en utilités par rapport à des intervalles de temps (jours, semaines, mois, années, en fonction des procédés et des fluctuations du marché). Permet de réduire : • l'utilisation de moyens d'appoint en chauffage (par ex. chaudières) • les rejets de vapeur en excès • les pertes de fourniture en raison d'appoint ou de contrôles insuffisants	+	
Plan de production des utilités : à partir des profils de la demande, et développe un plan de production optimisé en s'appuyant sur la disponibilité des utilités. Il peut être tactique (24 h) ou stratégique (dates de mise en service ou de mise hors service des équipements pour des interventions de maintenance)	+	+
Optimisation du fonctionnent de l'usine (optimisation en ligne) : alors qu'un plan peut être mis au point à l'avance, (par ex. par périodes de 24 h) les opérations sont susceptibles de varier et de le rendre caduque. Un optimiseur d'utilités peut fournir en temps réel les conseils permettant au personnel d'exploitation d'assurer le fonctionnement du système au coût minimum basé sur la demande et les prix du moment	+	+
Surveillance de la performance (équipements d'utilités) : un optimiseur d'utilités peut surveiller /suivre la performance des systèmes et des constituants. Ceci peut être utilisé pour optimiser les programmes d'entretien et de nettoyage et prévenir les incidents d'exploitation	+	

Démarche des sociétés	Agent moteur (si repéré par +)	
	Rendement énergétique	Coûts énergie/contrats
Planification des investissements : un optimiseur d'utilités peut permettre d'évaluer des options de conception pour la mise en place de nouveaux équipements et pour le remplacement des équipements existants à la fois dans les systèmes de procédé et dans les systèmes d'utilités, par ex. • désaération de l'eau d'alimentation utilisant la chaleur du procédé • choix d'un entraînement (turbine à vapeur ou moteur) ou encore entraînements mixtes pour conférer davantage de souplesse à l'équilibrage du système vapeur • amélioration du retour du condensat • modification de la fourniture d'énergie (par ex. utilisation de la vapeur basse pression pour réduire une utilisation de vapeur moyenne pression) • utilisation de vapeur pour préchauffer l'air de combustion des fours • intégration au réseau vapeur existant dans le cas d'une nouvelle unité construite sur le site ou modification d'un réseau existant lorsque des unités sont fermées	+	+
Surveillance, gestion et commercialisation des émissions : Certaines émissions gazeuses (SO_X et CO_2) peuvent être directement reliées aux combustibles brûlés (si la composition des combustibles et leur variation sont connues avec précision). Le NO_X nécessite des modèles prédictifs, car sa formation dépend du combustible, de la température de flamme, de l'équipement, etc. Un optimiseur d'utilités peut inclure un service de prévision et de compte-rendu en matière d'émissions, lorsque l'autorisation d'exploitation le nécessite (par ex. pour la conformité aux valeurs limites d'émissions). L'optimiseur peut également faciliter la prise de décision pour la gestion et le négoce des émissions en établissant des prévisions de la demande et des émissions correspondantes	+	+
Gestion des contrats : (voir Section 7.11) : un optimiseur fournit à l'exploitant les données lui permettant de réduire et de déplacer les pics de demandes	**(+)**	+
Évaluation des tarifs : la déréglementation dans le domaine des utilités a amené une grille d'options tarifaires déroutante. Les calculs et choix manuels ne sont pas suffisamment précis et rapides, ce qui conduit les gros utilisateurs à les automatiser		+
Négoce de l'électricité et des combustibles : les industries de transformation investissent de plus en plus dans la cogénération et la trigénération, en se dotant de la possibilité d'exporter de l'énergie. Ceci complique l'évaluation des tarifs et un optimiseur prend en charge une commercialisation efficace de l'énergie		+
Comptabilité des coûts : un optimiseur d'utilités fournit une affectation précise des coûts en temps réel et fournit également des coûts marginaux réels. Il facilite la prise de décision pour l'arbitrage entre différentes sources d'énergie.		+

Tableau 2.7 : Agents moteurs de la démarche des sociétés pour utiliser un optimiseur

Exemples

1. Schott AG, DE. Voir Annexe 7.7.1

Coûts :

- logiciel : environ 50 000 EUR
- matériel : environ 500 EUR / point de mesure.

Économies annuelles :

- abaissement des pics de fourniture d'électricité : de l'ordre de 3 à 5 % ;

- période de retour sur investissement : environ 0,9 à 2 ans (en fonction du projet).

2. Hôpital Atrium, Heerleen, Pays Bas. Voir Annexe 7.2)
On y a installé un système de gestion des utilités. Le retour sur investissement interne est de 49 % (environ 75 000 – 95 000 EUR/an sur un coût d'énergie variable d'environ 1,2 millions EUR.

Valero Energy Corporation, Refinery, Houston, Texas, États-Unis
Un optimiseur d'utilités pour un système pétrolier a été installé en 2002. Les bénéfices de la première année identifiés se sont élevés à 3,06 millions EUR, incluant une réduction des importations de gaz naturel et d'électricité.

DSM, usine chimique, Geleen, Pays-Bas
Les avantages ont été appréciés sous forme de retour sur investissement >25 %, avec 3 à 4 % d'économie sur le total des coûts en énergie du site, provenant à la fois des économies d'énergie et d'une négociation plus favorable des contrats avec les fournisseurs.

Références bibliographiques
Informations générales, exemples Valero et DSM : [171, de Smedt P. Petela E., 2006]
Schott glass :[127, TWG]
Atrium Hospital [179, Stijns, 2005]

2.16 Analyse comparative

Description
Dans sa plus simple expression, un repère est un point de référence. Dans le monde des affaires, une analyse comparative est le procédé utilisé par une société pour évaluer divers aspects de ses procédés par rapport à la meilleure pratique, en général dans son propre domaine d'activité. Le procédé a été décrit comme :

- « l'analyse comparative est la démarche consistant à établir des comparaisons avec d'autres sociétés et à tirer les enseignements qui ressortent des pratiques de celles-ci » (Code de bonne conduite européen pour l'analyse comparative)
- « l'analyse comparative est l'attitude consistant à faire preuve de suffisamment d'humilité pour admettre que quelqu'un d'autre est meilleur que soi même, dans un domaine donné puis à être assez sage pour apprendre à être aussi bon, voire meilleur » (American Productivity and Quality Center, Centre américain de la productivité et de la qualité).

L'analyse comparative est un outil puissant pour combattre « l'aveuglement paradigmatique » (qui peut s'exprimer comme suit : « notre façon de faire est la meilleure parce que nous avons toujours fait comme ça »). Il peut de ce fait être utilisé pour promouvoir l'amélioration permanente et entretenir une dynamique (voir Sections 2.2.1 et 2.5).

L'analyse comparative énergétique fait appel à des données qui ont été collectées et analysées (voir mesurage et surveillance, et audit énergétique, Sections 2.10 et 2.11). Les indicateurs d'efficacité énergétique sont ensuite établis pour permettre à l'exploitant d'évaluer la performance de l'installation au fil du temps ou de la situer par rapport à d'autres dans le même domaine. Les Sections 1.3, 1.4 et 1.5 étudient les aspects relatifs à l'établissement et à l'utilisation des indicateurs.

Il est important de noter que les critères utilisés pour la collecte des données doivent être traçables et mis à jour.

Dans certains cas, la confidentialité de certaines données peut avoir son importance (par ex. lorsque le poste énergie constitue une part significative du coût de production). Il est donc essentiel de prendre en compte les avis des sociétés participantes et des associations

professionnelles du secteur concerné pour préserver la confidentialité des données de la société tout en assurant la convivialité des outils. La protection de la confidentialité peut être obtenue par :

- un contrat
- une présentation des données à même de protéger les données confidentielles (par ex. en regroupant en un seul bloc les données relatives à plusieurs installations ou produits)
- une collecte de données confiée à une tierce partie digne de confiance (par ex. une organisation commerciale, une agence étatique, etc.).

L'analyse comparative peut aussi porter sur des procédés et des méthodes de travail (voir aussi Excellence opérationnelle, Section 2.5, et les exemples ci-dessous).

La collecte des données relatives à l'énergie doit s'effectuer avec le plus grand soin. Les données doivent être comparables. Dans certains cas, il convient de leur appliquer des facteurs correctifs (normalisation). Par exemple, pour tenir compte des charges d'alimentation, de la vétusté des équipements, etc. (voir l'analyse comparative de l'industrie du verre, ci-dessous), et ces corrections doivent avoir fait l'objet au préalable d'accords au niveau adéquat (par ex. national ou international, etc.). Comme exemples clefs, on peut citer la nécessité d'avoir l'assurance que les comparaisons en matière d'énergie sont faites sur une base appropriée telle que l'énergie primaire, le pouvoir calorifique inférieur, etc., voir Sections 1.3, 1.4 et 1.5.

L'évaluation peut être faite sur une base de séries de comparaisons échelonnées dans le temps. Ceci :

- illustre le bénéfice que peut représenter une mesure (ou un groupe de mesures) au titre de la consommation d'énergie globale (en interne, ou du secteur ou de la région concernée, etc.)
- est une méthode simple qui peut être appliquée en interne si les données de référence sont disponibles et s'il est difficile d'effectuer des comparaisons en externe.

L'inconvénient principal de la comparaison dans le temps réside dans la nécessité d'avoir des conditions sous-jacentes stables pour évaluer l'efficacité énergétique.

L'évaluation peut également se faire par rapport aux demandes théoriques d'enthalpie (voir analyse comparative dans l'industrie du verre, dans les exemples ci-dessous). Celles-ci sont calculées à partir des énergies thermiques, des énergies de fusion, des énergies cinétiques ou potentielles, pour un procédé. Elles :

- constituent une bonne approche pour des estimations initiales
- doivent être relativement faciles à utiliser avec une expérience appropriée
- doivent mettre en évidence la distance séparant la consommation d'énergie de la demande théorique (ceci peut être associé à une comparaison dans le temps pour faciliter le calcul du rapport coût-avantage de mesures ultérieures).

L'inconvénient principal réside dans le fait qu'il est impossible de prendre en compte par le calcul toutes les caractéristiques particulières d'une exploitation.

Avantages obtenus pour l'environnement
Un outil puissant pour aider à la mise en œuvre de mesure d'efficacité énergétique s'inscrivant dans la durée.

Effets croisés
Aucun à ce jour.

Données opérationnelles
Voir Description.

Applicabilité

L'analyse comparative peut facilement être utilisée pour toutes installations, groupes de sociétés et d'usines ou associations professionnelles. Il peut également s'avérer utile ou nécessaire d'effectuer une analyse comparative d'unités, de procédés ou d'utilités prises séparément comme celle étudiée au Chapitre 3 (voir également les Sections 1.3, 1.4 et 1.5).

Les données figurant dans les BREF relatifs aux secteurs verticaux, ou celles vérifiées par une tierce partie sont réputées être validées.

La période séparant les analyses comparatives est particulière à un secteur donné et en règle générale longue (par ex. plusieurs années), étant donné que les données sur lesquelles elles s'appuient présentent rarement des variations rapides ou significatives sur une courte période de temps.

Des aspects de compétitivité sont mis en jeu, aussi le caractère confidentiel des données doit être étudié. Par exemple, il se pourrait que les résultats d'une analyse comparative doivent rester confidentiels ou qu'ils ne soit pas possible de mener une analyse comparative, par ex. là où seulement une ou un nombre réduit d'usines dans l'Union Européenne ou dans le monde fabriquent le même produit.

Aspects économiques
La collecte des données peut représenter le poste de coûts principal. Toutefois, d'autres coûts sont induits en établissant des données sur une échelle plus grande et pour collecter des données en fonction de la normalisation des modèles.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Réduction des coûts.

Exemples
Des détails de ces activités d'analyses comparatives sont présentés dans l'annexe 7.9.

Agence autrichienne de l'énergie
Le rapport de l'AEA analyse énergétique comparative au niveau de la société dans sa partie agenda de compte-rendu de la société présente des éléments d'analyse comparative autre que la consommation d'énergie spécifique.

Schéma à usage des PME en Norvège
La Norvège diffuse sur internet un schéma d'analyse comparative à usage des PME.

Conventions d'analyses comparatives (covenants), Pays-Bas.
Aux Pays-Bas, les accords à long terme (conventions entre le gouvernement et les grosses sociétés) (consommant plus de 0,5 PJ/an) s'appuient sur l'analyse comparative. Un schéma similaire est vigueur en Flandres belges (Belgique).

Analyse comparative dans l'industrie du verre
L'industrie du verre effectue des recherches sur plusieurs méthodes pour identifier les opérations de fusion du verre, offrant le meilleur rapport coût- efficacité et quelques résultats ont été publiés :

- méthodes pour une meilleure pratique des bilans énergétique et mise en application
- détermination des demandes théoriques en énergie et enthalpie et niveau de consommation minimum d'énergie dans la pratique
- analyse comparative des consommations spécifiques dans les fours à verre industriels
- mise au point de nouvelles techniques de fusion, et d'affinage du verre.

Allocation d'énergie/d'émissions de CO_2 entre différents produits dans un procédé complexe à étapes multiples, France

L'industrie française de l'amidon, avec l'aide de consultants, a mis au point une méthode pour l'évaluation d'allocations énergétiques dans le procédé de fabrication de l'amidon et de ses dérivés. Cette méthodologie a été utilisée pour :

- allouer des consommations énergétiques à différentes étapes du procédé et à différents types de produits ;
- allouer des autorisations d'émission de CO_2 à différentes étapes du procédé et à différents types de produits ;
- évaluer les améliorations dans la consommation d'énergie.

Elle peut donc être utilisée en tant qu'outil d'analyse comparative.

Références bibliographiques
[10, Layer, 1999, 13, Dijkstra, 108, Intelligent Energy - Europe, 2005, 127, TWG, 156, Beerkens, 2004, 157, Beerkens R.G.C. , 2006, 163, Dow, 2005, 227, TWG]

2.17 Outils divers

L'Annexe 7.8 présente une liste d'outils divers pouvant aussi être utilisés au niveau du site pour la réalisation d'audits et la gestion de l'énergie.

3 TECHNIQUES À PRENDRE EN CONSIDÉRATION POUR PARVENIR À L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES SYSTÈMES, LES PROCÉDÉS OU LES ACTIVITÉS UTILISANT DE L'ÉNERGIE

Une approche hiérarchisée a été utilisée pour les Chapitres 2 et 3 :

- Le Chapitre 2 décrit les techniques à prendre en considération au niveau global d'une installation offrant un potentiel pour atteindre une efficacité énergétique optimale
- Le Chapitre 3 présente les techniques à prendre en considération à un niveau inférieur à celui de l'installation : tout d'abord pour les systèmes (par ex. air comprimé, vapeur) ou les activités (par ex. combustion) consommant de l'énergie, et ensuite à un niveau plus faible encore pour certains composants ou équipements consommateurs d'énergie (par ex. les moteurs).

Les systèmes de gestion, les techniques intégrées au procédé et les mesures techniques spécifiques font partie des deux chapitres, mais il y a recouvrement complet lorsqu'il s'agit de rechercher des résultats optimaux. De nombreux exemples d'une approche intégrée illustrent ces trois types de mesures. Il est donc quelque peu difficile et arbitraire d'établir une distinction entre les techniques pour les décrire.

Ni le présent chapitre, ni le chapitre 2 ne présentent une liste exhaustive des techniques et des outils, et d'autres techniques peuvent exister ou être en cours de développement, toutes également valables dans le cadre de l'IPPC et des MTD. Les techniques décrites dans le présent chapitre et dans le chapitre 2 peuvent être utilisées séparément ou en association et sont étayées par les informations contenues dans le chapitre 1 pour atteindre les objectifs de l'IPPC.

Le présent chapitre et le chapitre 2, lorsque cela est possible, adoptent un plan standard pour décrire chaque technique dans ses grandes lignes, comme indiqué dans le Tableau 3.1. Il convient de remarquer que ce plan est également utilisé pour décrire les systèmes pris en considération, tels que (au niveau d'une installation) la gestion de l'énergie et (à un niveau inférieur) les systèmes d'air comprimé, la combustion, etc.

Désignation du type d'information	**Type d'informations présentées**
Description	Brèves descriptions des techniques d'efficacité énergétique présentées avec des chiffres, des illustrations, des diagrammes de procédé, etc. qui illustrent cette technique
Avantages obtenus pour l'environnement	Principaux avantages de la technique pour l'environnement à l'appui des données de consommation et des émissions obtenues par des mesures appropriées. Dans le présent document, il s'agit spécifiquement de l'augmentation de l'efficacité énergétique, mais en y incluant toutes les informations sur la réduction d'autres niveaux de polluants et de consommation
Effets croisés	Tous les effets défavorables et les inconvénients affectant l'environnement, provoqués par la mise en œuvre de la technique. Détails sur les problèmes environnementaux de la technique en comparaison avec d'autres
Données opérationnelles	Données de performance sur la consommation d'énergie et d'autres consommations (matières premières et eau). Toute autre information utile sur la façon d'utiliser, d'entretenir et de contrôler la technique, notamment les aspects de sécurité, les contraintes d'exploitation de cette dernière, la qualité en sortie, etc.

Applicabilité	Prise en compte des facteurs liés à l'application et à l'actualisation de la technique (par ex. espace disponible, spécificités du procédé, autres contraintes ou inconvénients de la technique)
Aspects économiques	Informations sur les coûts (investissement et exploitation) et les économies d'énergie s'y rapportant en EUR/kWh (thermique ou électrique) et autres économies possibles (par ex. réduction de consommation de matières premières, des charges relatives aux déchets) également liés à la capacité de la technique
Agents moteurs pour la mise en œuvre	Motifs, (autres que la directive IPPC) ayant poussé à la mise en œuvre de la technique (par ex. législation, engagements volontaires, raisons économiques)
Exemples	Référence à au moins une situation dans laquelle est citée l'utilisation de la technique
Références bibliographiques	Références bibliographiques et autres sources d'informations permettant de trouver des informations plus détaillées concernant la technique

Tableau 3.1 : Décomposition des informations pour les systèmes et techniques décrits dans les Chapitres 2 et 3

3.1 Combustion

Introduction

La combustion est une séquence complexe de réactions chimiques exothermiques entre un combustible et un oxydant accompagnée d'une production de chaleur ou à la fois d'une production de chaleur et de lumière sous forme d'incandescence ou de flammes.

Dans une réaction de combustion complète, un composé réagit avec un élément oxydant, et les produits sont des composés de chaque élément du combustible avec l'élément oxydant. En réalité, les procédés de combustion ne sont jamais ni parfaits ni complets. Les gaz de combustion issus de la combustion du carbone (combustion du charbon) ou les composés du carbone (hydrocarbures, bois, etc.), contiennent à la fois le carbone non brûlé (sous forme de suie) et des composés du carbone (CO et autres). Par ailleurs, lorsque l'air est l'oxydant, de l'azote est oxydé en divers oxydes d'azote (NO_x) ayant des impacts sur l'environnement [122, Wikipedia_Combustion, 2007].

Installations de combustion

Les installations de combustion étudiées dans la présente section sont des dispositifs de chauffage ou des installations utilisant la combustion d'un combustible (y compris des déchets) pour produire et transférer de la chaleur à un procédé donné. Les applications incluses sont les suivantes :

- chaudières de production de vapeur ou d'eau chaude (voir aussi 3.2)
- réchauffeurs de procédés, par exemple pour réchauffer du pétrole brut dans les unités de distillation, pour le vapocraquage dans les usines pétrochimiques, ou pour le reformage à la vapeur dans la production d'hydrogène
- fours ou unités dans lesquels les matières sont chauffées à des températures élevées pour induire une transformation chimique, par exemple, les fours à ciment et les fours de production des métaux.

Dans toutes ces applications, il est possible d'opérer une gestion de l'énergie grâce à un contrôle des paramètres du procédé et grâce à un contrôle côté combustion. Les stratégies de gestion de l'énergie concernant un procédé donné sont fonction du procédé proprement dit et sont traitées dans les brefs sectoriels concernés.

Pertes dans un procédé de combustion
L'énergie thermique résultant de la combustion de combustibles est transférée au fluide moteur. Les pertes thermiques peuvent peut-être classées comme suit [125, EIPPCB] :

- pertes par dégagement gazeux. Elles dépendent de la température des gaz de combustion, du mélange d'air, de la composition du combustible et du niveau d'encrassement de la chaudière ;
- pertes dues au combustible non brûlé, l'énergie chimique de ce dernier non transformée. Une combustion incomplète entraîne la présence de CO et d'hydrocarbures dans les gaz de combustion ;
- pertes par conduction et par rayonnement. Pour la production de vapeur, elles dépendent principalement de la qualité de l'isolation du générateur de vapeur et des tuyaux vapeur ;
- pertes dues aux matières non brûlées dans les résidus, incluant des pertes provenant du carbone non brûlé via les cendres lourdes et les cendres volantes d'une chaudière à cendres sèches (DBB) et les scories et les cendres volantes d'une chaudière à cendres humides (WBB) ;
- pertes dues aux purges dans les chaudières pour la production de vapeur.

En plus des pertes thermiques, la consommation d'énergie nécessaire pour le fonctionnement des machineries auxiliaires (équipements de transport des combustibles, broyeur à charbon, pompes et ventilateurs, systèmes d'élimination des cendres, nettoyage des surfaces de chauffage, etc.) doit également être prise en considération.

Choix des techniques de combustion
Les techniques de production d'énergie courantes dans les grandes installations de combustion (puissance thermique >50 MW) et avec différents combustibles (par exemple biomasse et tourbe, combustibles liquides ou gazeux) sont présentées en détail dans le BREF LCP (Grandes installations de combustion). Le BREF LCP indique que les informations fournies sont également valides pour des installations plus petites (car une installation ayant une puissance thermique >50 MW peut comprendre plusieurs unités plus petites).

Pour faciliter la tâche du lecteur, le tableau 3.2 présente une vue d'ensemble des techniques contribuant au rendement énergétique de la combustion, mentionnées à la fois dans le présent document et dans le BREF[1] LCP. Afin d'éviter des répétitions, les techniques de combustion déjà traitées dans le BREF LCP ne sont pas reprises dans le présent document. Pour de plus amples détails concernant ces techniques, le lecteur est invité à se reporter au BREF LCP. Toutefois, dans certains cas, des informations complémentaires concernant des techniques déjà couvertes par le BREF LCP ont été incluses dans le présent document. Il convient de remarquer que le BREF LCP classe les techniques de combustion à prendre en considération pour la détermination des MTD en fonction du type de combustible utilisé. L'applicabilité des techniques est susceptible de varier en fonction du site.

	Techniques pour les secteurs et les activités associées où la combustion n'est pas traitée dans un BREF vertical	
	Techniques dans le BREF LCP de juillet 2006 par type de combustible et par section	**Techniques dans le présent document par section**

[1] Référence au BREF LCP édition de Juillet 2006

	Charbon et lignite	**Biomasse et tourbe**	**Combustibles liquides**	**Combustibles gazeux**	
Préséchage du lignite	4.4.2				
Gazéification du charbon	4.1.9.1, 4.4.2 et 7.1.2				
Séchage du combustible		5.1.2, 5.4.2 5.4.4			
Gazéification de la biomasse		5.4.2 7.1.2			
Pressage de l'écorce		5.4.2 5.4.4			
Utilisation d'une turbine de détente pour récupérer la teneur énergétique des gaz pressurisés				7.1.1, 7.1.2, 7.4.1 7.5.1	
Cogénération	4.5.5, 6.1.8	5.3.3 5.5.4	4.5.5, 6.1.8	7.1.6, 7.5.2	3.4 Cogénération
Systèmes de contrôle informatisés avancés des conditions de combustion pour réduction des émissions et augmentation des performances de la chaudière	4.2.1, 4.2.1.9, 4.4.3 4.5.4	5.5.3	6.2.1, 6.2.1.1 6.4.2 6.5.3.1	7.4.2 7.5.2	
Utilisation du contenu calorifique des gaz de combustion pour le chauffage urbain	4.4.3				
Excès d'air faible	4.4.3 4.4.6	5.4.7	6.4.2 6.4.5	7.4.3	3.1.3 Réduction du débit massique des gaz de combustion par une réduction de l'excès d'air

	Techniques pour les secteurs et les activités associées où la combustion n'est pas traitée dans un BREF vertical				
	Techniques dans le BREF LCP de juillet 2006 par type de combustible et par section				Techniques dans le présent document par section
	Charbon et lignite	**Biomasse et tourbe**	**Combustibles liquides**	**Combustibles gazeux**	
Diminution des températures des gaz d'échappement	4.4.3		6.4.2		3.1.1 Réduction de la température des gaz de combustion grâce à • dimensionnement pour obtenir les performances maximales plus un facteur de sécurité calculé pour les surcharges • augmentation du transfert de chaleur vers le procédé soit par une augmentation du taux de transfert de chaleur, soit par agrandissement ou amélioration des surfaces de transfert de chaleur • récupération de chaleur avec l'association d'un procédé supplémentaire (par ex. génération de vapeur en utilisant des économiseurs), pour récupérer la chaleur perdue dans les gaz de combustion • installation d'un préchauffeur d'air ou d'eau (voir Section 3.1.1.1) ou préchauffage du combustible par échange de chaleur avec les gaz de combustion (voir section 3.1.1). Remarque : ce procédé nécessite parfois un préchauffage de l'air lorsqu'une température de flamme élevée est requise (verre, ciment, etc.) • nettoyage des surfaces de transfert de chaleur qui sont progressivement recouvertes de cendres ou de particules carbonées, afin de conserver une efficacité élevée pour le transfert de chaleur. Des souffleurs de suie fonctionnant périodiquement peuvent garder les zones de convection propres. Le nettoyage des surfaces de transfert de chaleur dans la zone de combustion est généralement effectué au cours des arrêts pour inspection et maintenance, mais un nettoyage en ligne peut être appliqué dans certains cas (par exemple pour les réchauffeurs de raffinerie)
Faible concentration de CO dans les gaz de combustion	4.4.3		6.4.2		
Accumulation de chaleur			6.4.2	7.4.2	
Rejet de la tour de refroidissement	4.4.3		6.4.2		
Différentes techniques pour système de refroidissement (voir BREF ICS)	4.4.3		6.4.2		

	Techniques pour les secteurs et les activités associées où la combustion n'est pas traitée dans un BREF vertical				
	Techniques dans le BREF LCP de juillet 2006 par type de combustible et par section				Techniques dans le présent document par section
	Charbon et lignite	**Biomasse et tourbe**	**Combustibles liquides**	**Combustibles gazeux**	
Préchauffage du gaz combustible par utilisation de la chaleur perdue				7.4.2	3.1.1 Réduction de la température des gaz de combustion • préchauffage du combustible par échange de chaleur avec les gaz de combustion (voir Section 3.1.1). Remarque : le procédé nécessite parfois un préchauffage de l'air lorsqu'une température de flamme élevée est requise (verre, ciment, etc.)
Préchauffage de l'air de combustion				7.4.2	3.1.1 Réduction de la température des gaz de combustion • installation d'un préchauffeur d'air par échange de chaleur avec les gaz de combustion (voir Section 3.1.1.1). Remarque : le procédé nécessite parfois un préchauffage de l'air lorsqu'une température de flamme élevée est requise (verre, ciment, etc.)
Brûleurs récupératifs et régénératifs					3.1.2
Régulation et contrôle-commande des brûleurs					3.1.4
Choix du combustible					3.1.5
Oxy-combustion (oxy-combustible)					3.1.6
Réduction des pertes thermiques grâce à l'isolation					3.1.7
Réduction des pertes par les portes du four					3.1.8
Combustion en lit fluidisé	4.1.4.2	5.2.3			

Tableau 3.2 : Présentation générale des techniques pour améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes de combustion figurant dans les BREF LCP et ENE [236, Fernández-Ramos, 2007]

Les questions relatives à la vapeur font l'objet d'une étude complète dans la Section 3.2 bien qu'un recouvrement partiel avec cette section ne puisse être évité.

Bilan énergétique général

Les informations ci-après concernent à la fois la combustion avec flamme (avec un brûleur) et la combustion en lit fluidisé. Elles traitent la gestion de l'énergie du côté combustion uniquement, depuis les admissions d'air et de combustible jusqu'à l'échappement des gaz de combustion dans la cheminée.

La Figure 3.1présente le bilan énergétique général d'une installation de combustion lorsque les températures du procédé sont basses.

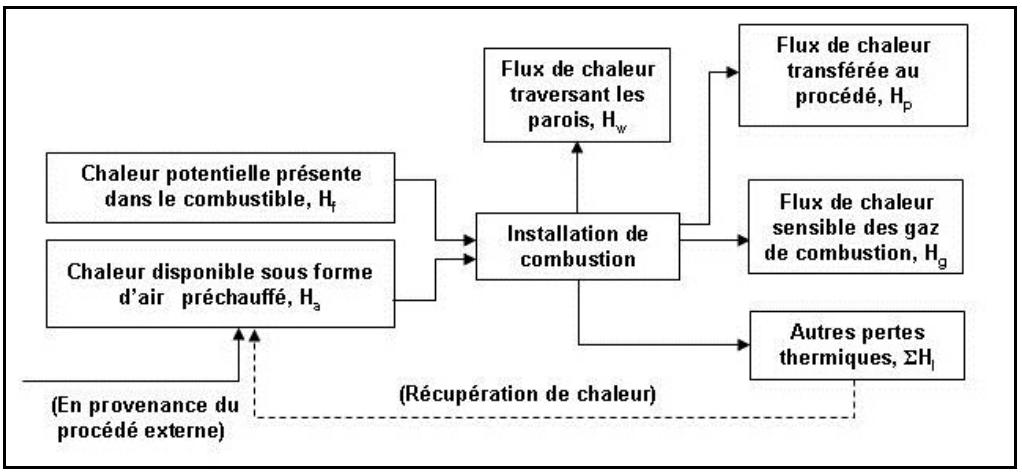


Figure 3.1: Bilan énergétique d'une installation de combustion [91, CEFIC, 2005]

Explication des différents flux d'énergie

La chaleur potentielle présente dans le combustible H_f repose sur son débit massique et son pouvoir calorifique (la quantité d'énergie qui est libérée par la combustion d'une masse spécifique de combustible). Le pouvoir calorifique est exprimé en MJ/kg. Le pouvoir calorifique supérieur ou valeur calorifique brute (HHV ou pouvoir calorifique supérieur PCS) d'un combustible est la chaleur totale développée après refroidissement des produits de la combustion à la température d'origine du combustible. Le pouvoir calorifique inférieur (LHV) est la chaleur totale produite par la combustion moins l'énergie dans les produits de la combustion non refroidis, incluant la vapeur d'eau non condensée. Le pouvoir calorifique inférieur d'un combustible est généralement de 5 à 10 % inférieur au pouvoir calorifique supérieur. (Pour une explication complémentaire et certaines valeurs types, voir la Section 1.3.6.2).

La chaleur transférée au procédé H_p est l'énergie libérée par le procédé de combustion du système de combustion. Elle est constituée de chaleur sensible (augmentation de la température), de chaleur latente de vaporisation (si le fluide chauffé est partiellement ou totalement vaporisé), et de chaleur chimique (si une réaction chimique endothermique se produit).

Le flux de chaleur résiduelle des gaz de combustion H_g est libéré dans l'air et perdu. Il est fonction du débit des gaz de combustion, de leur capacité thermique, de la chaleur latente de l'eau formée par la combustion et présente dans les gaz de combustion et de leur température. Le débit des gaz de combustion peut être divisé en deux parties :

- le « flux stœchiométrique » de CO_2 et de H_2O qui provient des réactions de combustion et son azote associé (ce flux stœchiométrique est proportionnel au H_f) et
- le flux d'excès d'air, qui correspond à la quantité d'air introduite en plus de l'air stœchiométrique afin d'obtenir une combustion complète. Il existe une relation directe entre l'excès d'air et la concentration d'oxygène dans les gaz de combustion.

Le flux de chaleur à travers les parois H_W correspond à l'énergie dissipée dans l'air environnant par transfert de chaleur à partir de la surface extérieure du four/de la chaudière jusque dans l'air ambiant. D'autres pertes thermiques sont regroupées sous la dénomination ΣH_l et comprennent :

- des résidus non oxydés ou partiellement oxydés, tels que le carbone, CO, etc.
- la quantité de chaleur contenue dans les résidus solides (cendres).

Fondamentalement, la conservation de l'énergie donne :

$$H_f + H_a = H_p + H_g + H_w + \Sigma H_l$$ **Équation 3.1**

Il s'agit d'un bilan générique, qui peut être adapté au cas par cas par H_a et ΣH_l :

- en fonction de la configuration, d'autres flux d'énergie peuvent devoir être inclus dans le bilan, notamment dans le cas où d'autres matériaux sont ajoutés au four ou perdus à partir de celui-ci, par exemple :
  - cendres chaudes dans la combustion du charbon
  - injection d'eau dans la chambre de combustion pour contrôler les émissions
  - contenu énergétique de l'air de combustion
- ce bilan suppose que la combustion est complète : ce qui est raisonnable aussi longtemps que les composants non brûlés comme le monoxyde de carbone ou les particules carbonées sont en petite quantité dans les gaz de combustion, ce qui est le cas lorsque l'installation satisfait aux limites[2] d'émission.

<u>Efficacité énergétique d'une installation de combustion</u>
Fondamentalement, l'efficacité énergétique d'une installation de combustion est le rapport entre l'énergie libérée par le processus de combustion et l'entrée d'énergie due au combustible :

$$\eta = \frac{H_p}{H_f}$$ **Équation 3.2**

Ou en combinaison avec l'Équation 3.1 :

$$\eta = 1 - \frac{H_g + H_w}{H_f}$$ **Équation 3.3**

Les deux formules peuvent être utilisées, mais il est généralement plus pratique d'utiliser l'Équation 3.3 qui montre la quantité d'énergies perdues, où il est possible de réaliser des économies. Les stratégies en faveur de l'efficacité énergétique reposent sur la réduction des flux de chaleur perdue par les parois ou dans les gaz de combustion.

Une amélioration de l'efficacité énergétique d'une installation de combustion a pour avantage de réduire les émissions de CO_2, si elle se traduit par une réduction de la consommation du combustible. Dans ce cas, le CO_2 est réduit proportionnellement à la teneur en carbone du combustible économisé. Toutefois, l'amélioration de l'efficacité peut également être utilisée pour augmenter l'énergie libérée par le processus de combustion tout en gardant le même débit de combustible (H_p supérieur pour le même H_f dans l'Équation 3.2). Ceci peut augmenter la capacité de l'unité de production tout en améliorant l'efficacité énergétique. Dans ce cas, il existe une réduction des émissions

[2] Dans une centrale électrique à charbon pulvérisé, le carbone non brûlé contenu dans les cendres volantes, dans des conditions normales courantes, est inférieur à 5 %.

spécifiques de CO_2 (en référence au niveau de production) mais aucune réduction des émissions de CO_2 en valeur absolue (voir Section 1.4.1)

Les valeurs et les calculs d'efficacité énergétique pour divers procédés de combustion peuvent être consultés dans les BREF sectoriels et dans d'autres sources. Par exemple, le document EN 12952-15 sur le calcul de l'efficacité énergétique des chaudières à vapeur à tubes d'eau et des installations auxiliaires, ou le document EN 12953-11 sur les chaudières à chambre d'eau.

3.1.1 Réduction de la température des gaz de combustion

Description
Une option pour réduire les déperditions de chaleur possibles dans un procédé de combustion consiste à réduire la température des gaz de combustion sortant de la cheminée, ce qui peut être obtenu comme suit :

- dimensionnement pour obtenir les performances maximales plus un facteur de sécurité calculé pour les surcharges
- augmentation du transfert de chaleur vers le procédé par une augmentation du taux de transfert de chaleur, (installation de turbulateurs ou d'autres dispositifs qui favorisent la turbulence des fluides et augmente l'efficacité des échanges thermiques), ou agrandissement ou amélioration des surfaces de transfert de chaleur
- récupération de chaleur avec l'association d'un procédé supplémentaire (par exemple génération de vapeur en utilisant des économiseurs, voir Section 3.2.5) pour récupérer la chaleur perdue dans les gaz de combustion
- installation d'un préchauffeur d'air (ou d'eau) ou préchauffage du combustible par échange de chaleur avec les gaz de combustion (voir Section 3.1.1.1). Il y a lieu de remarquer que le procédé de fabrication peut nécessiter un préchauffage de l'air lorsqu'une température de flamme élevée est nécessaire (verre, ciment, etc.). Il est possible d'utiliser de l'eau préchauffée comme alimentation de la chaudière ou dans les systèmes à eau chaude (tels que les schémas urbains)
- nettoyage des surfaces de transfert de chaleur qui sont progressivement recouvertes de cendres ou de particules carbonées, afin de conserver une efficacité élevée pour le transfert de chaleur. Des souffleurs de suie fonctionnant périodiquement peuvent garder les zones de convection propres. Le nettoyage des surfaces de transfert de chaleur dans la zone de combustion est généralement effectué au cours des arrêts pour inspection et maintenance, mais un nettoyage en ligne peut être appliqué dans certains cas (par exemple pour les réchauffeurs de raffinerie).
- vérification de la correspondance entre la sortie de la combustion et les exigences en chauffage (la sortie ne devant pas être excédentaire). Ceci peut être contrôlé en réduisant la puissance thermique du brûleur, en réduisant le débit de combustible, par exemple en installant un injecteur moins puissant pour les combustibles liquides ou en réduisant la pression d'alimentation des combustibles gazeux.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
La réduction de la température des gaz de combustion est, dans certains cas, incompatible avec la qualité de l'air, par exemple :

- le préchauffage de l'air de combustion entraîne une élévation de la température de flamme, avec pour conséquence une augmentation de la formation de NO_x qui peut aboutir à des niveaux supérieurs aux valeurs limites d'émissions. La modernisation d'une installation de combustion existante pour préchauffer l'air peut s'avérer difficile à justifier en raison des contraintes d'espace, de l'installation de ventilateurs supplémentaires et de l'ajout d'un procédé d'élimination des NO_x, si les émissions de NO_x dépassent les valeurs limites d'émission. Il y a lieu de remarquer qu'un procédé d'élimination des NO_x avec injection d'ammoniac ou d'urée risque d'induire un échappement d'ammoniac dans les gaz de combustion, qui ne peut être contrôlé que par la mise en place d'un capteur d'ammoniac coûteux et d'une boucle de contrôle, et en cas de grosses fluctuations de charge par l'ajout d'un système d'injection complexe, (par exemple avec deux rampes d'injection à des niveaux différents) pour injecter l'agent réducteur des NO_x dans la bonne zone de température ;
- les systèmes d'épuration des gaz, comme les systèmes d'élimination des NO_x ou des SO_x, fonctionnent uniquement dans une plage de température donnée. L'aménagement des systèmes d'épuration des gaz et de récupération de chaleur devient plus compliqué lorsqu'ils doivent être installés afin de satisfaire aux valeurs limites d'émission et peut être difficile à justifier d'un point de vue économique.
- dans certains cas, les autorités locales exigent une température minimum au niveau de la cheminée pour garantir une dispersion correcte des gaz de combustion et éviter la formation d'un panache. La finalité d'une telle pratique est souvent d'avoir une bonne image publique. Un panache de fumée s'échappant de la cheminée d'une usine risque en effet d'être aux yeux du public le symbole d'une usine source de pollution. L'absence de panache suggère un fonctionnement propre et dans certaines conditions climatiques, des usines (par exemple dans le cas des incinérateurs de déchets) réchauffent les gaz de combustion avec du gaz naturel avant de les laisser s'échapper de la cheminée. Il s'agit là d'un gaspillage d'énergie.

Données opérationnelles

Plus la température des gaz de combustion est basse, meilleure est l'efficacité énergétique. Néanmoins, certains inconvénients peuvent survenir lorsque la température des gaz de combustion est abaissée en dessous de certains niveaux. En particulier, un fonctionnement en dessous du point de rosée acide (une température au-dessous de laquelle la condensation de l'eau et de l'acide sulfurique se produit, généralement comprise entre 110 et 170ºC, qui dépend essentiellement de la teneur en soufre du combustible) risque d'entraîner une détérioration des surfaces métalliques. Il est possible d'utiliser des matières qui sont résistantes à la corrosion, notamment pour les unités alimentées avec du mazout, des déchets et du gaz bien qu'il soit parfois nécessaire de recueillir et de traiter le condensat acide.

Applicabilité

Les stratégies ci-dessus – en dehors d'un nettoyage périodique – nécessitent un investissement supplémentaire et leur application n'en est que meilleure à la conception et la construction de l'installation. Toutefois, la modernisation d'une installation existante est possible (sous couvert de disposer de l'espace nécessaire à cet effet).

Certaines applications sont limitées par la différence entre la température d'entrée du procédé et la température d'échappement des gaz de combustion. La valeur quantitative de cette différence est le résultat d'un compromis entre récupération d'énergie et coût des équipements.

La récupération de chaleur dépend toujours de l'existence d'une utilisation appropriée (voir Section 3.3).

Voir le potentiel de formation de polluants, dans la rubrique Effets croisés, ci-dessus.

Aspects économiques
La période de retour sur investissement peut être de cinq à cinquante ans, en fonction de nombreux paramètres, tels que la taille de l'installation et la température des gaz de combustion.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Augmentation de l'efficacité du procédé en cas de chauffage direct (par exemple verre, ciment).

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[17, Åsbland, 2005, 26, Neisecke, 2003, 122, Wikipedia_Combustion, 2007, 125, EIPPCB]

3.1.1.1 Installation d'un préchauffeur d'air ou d'eau

Description
En plus d'un économiseur (Section 3.2.5), un préchauffeur d'air (échangeur de chaleur air-air) peut également être installé. Le préchauffeur d'air ou APH réchauffe l'air qui alimente le brûleur. En d'autres termes, les gaz de combustion sont davantage refroidis, car l'air est souvent à température ambiante. Une température d'air plus élevée améliore la combustion, et le rendement général de la chaudière va augmenter. En règle générale, pour chaque diminution de 20 °C de la température des gaz de combustion, on obtient une augmentation du rendement de 1 %. La Figure 3.2 représente un schéma d'un système de combustion doté d'un préchauffeur d'air.

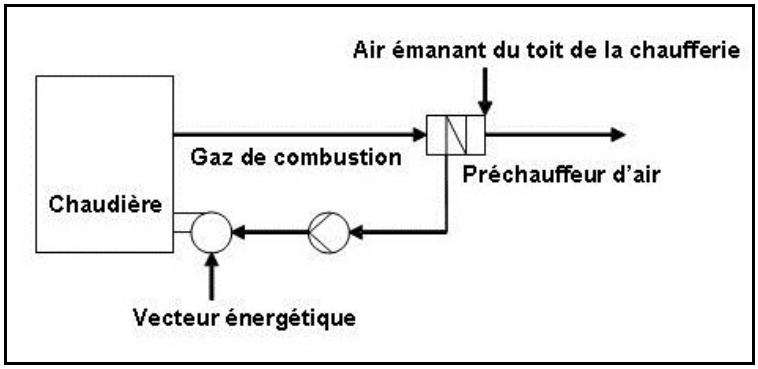


Figure 3.2 : Schéma d'un système de combustion avec préchauffeur d'air [28, Berger, 2005]

Une manière moins efficace mais plus simple d'assurer le préchauffage consiste à installer l'entrée d'air du brûleur sur le plafond de la chaufferie. En règle générale, l'air y est souvent de 10 à 20 °C plus chaud par rapport à la température extérieure. Il est ainsi possible de compenser en partie les pertes d'efficacité.

Une autre solution consiste à extraire l'air destiné au brûleur par le biais d'un tuyau d'échappement à double paroi. Les gaz de combustion sortent de la chaufferie par le tuyau intérieur et l'air destiné au brûleur est acheminé par la seconde couche. Il est ainsi possible de préchauffer l'air par les déperditions émanant des gaz de combustion.

En variante, il est possible d'installer un échangeur de chaleur air-eau.

Avantages obtenus pour l'environnement
En pratique, un préchauffeur d'air (APH) peut contribuer à une augmentation du rendement de 3 à 5 %.

Les autres avantages d'un préchauffeur d'air (APH) sont entre autres les suivants :

- l'air chaud permet de sécher le combustible, ce qui est applicable en particulier pour le charbon ou les combustibles organiques ;
- il est possible d'utiliser une chaudière plus petite si l'on envisage d'employer un APH au stade de la conception ;
- le préchauffage des matières premières.

Effets croisés
Il existe toutefois certains inconvénients pratiques liés à la présence d'un préchauffeur d'air (APH), qui constituent souvent une entrave à son installation :

- l'APH est un échangeur de chaleur gaz-gaz et occupe beaucoup d'espace. L'échange de chaleur n'est pas toujours aussi efficace qu'un échange gaz-eau ;
- une perte de charge plus élevée des gaz de combustion signifie que le ventilateur du brûleur doit fournir une pression plus élevée ;
- le brûleur doit s'assurer que le système est alimenté avec de l'air préchauffé. L'air chauffé occupe un volume plus grand, ce qui complexifie le problème pour ce qui est de la stabilité de la flamme ;
- il peut y avoir des émissions de NO_x plus élevées en raison des températures de flamme plus élevées.

Données opérationnelles
Le fait d'alimenter le brûleur avec de l'air chauffé a un impact sur la quantité de pertes de chaleur par les gaz de combustion dans la chaudière.

Le pourcentage de pertes de chaleur par les gaz de combustion est généralement déterminé en utilisant la formule de Siegert :

$$W_L = \frac{H_g}{H_f} = c \cdot \frac{T_{gas} - T_{air}}{\%CO_2}$$ **Équation 0.1**

où :

- W_L = pertes de chaleur par les gaz de combustion, en % de la valeur de combustion (%)
- c = coefficient de Siegert
- T_{gaz} = température des gaz de combustion mesurée en (°C)
- T_{air} = température de l'air d'alimentation (°C)

- % CO_2 = mesure de la concentration de CO_2 dans les gaz de combustion exprimée en pourcentage.

Le coefficient de Siegert dépend de la température des gaz de combustion, de la concentration en CO_2 et du type de combustible. Le Tableau 3.3 ci-dessous présente les diverses valeurs :

Type de combustible	Coefficient de Siegert
Anthracite	0,6459 + 0,0000220 x t_{gaz} + 0,00473 x CO_2
Fioul lourd	0,5374 + 0,0000181 x t_{gaz} + 0,00717 x CO_2
Pétrole	0,5076 + 0,0000171 x t_{gaz} + 0,00774 x CO_2
Gaz naturel (LCV)	0,385+ 0,00870 x CO_2
Gaz naturel (HCV)	0,390+ 0,00860 x CO_2

Tableau 3.3 : Calcul du coefficient de Siegert pour différents types de combustibles [29, Maes, 2005]

Exemple : les gaz de combustion d'une chaudière à vapeur alimentée avec du gaz naturel de qualité élevée ont les caractéristiques suivantes : $t_{gaz} = 240$ °C et $CO_2 = 9{,}8$ %. Après modification de l'amenée d'air, on prélève de l'air plus chaud au niveau du plafond de la chaufferie alors qu'autrefois, l'air fourni était à la température extérieure.

La température moyenne extérieure est de 10 °C, tandis que la température moyenne annuelle à proximité du plafond de la chaufferie est de 30 °C.

Dans ce cas, le coefficient de Siegert est de : 0,390 + 0,00860 x 9,8 = 0,4743.

Avant l'intervention, la perte de chaleur par les gaz de combustion s'élevait à :

$$W_R = 0{,}4743 \times \frac{240-10}{9{,}8} = 11{,}1\ \%$$

Après l'intervention, elle est de :

$$W_R = 0{,}4743 \times \frac{240-30}{9{,}8} = 10{,}2\ \%$$

L'augmentation du rendement est donc de 0,9 % pour une modification facile à réaliser, par exemple en repositionnant l'admission d'air.

Applicabilité

L'installation d'un préchauffeur d'air est d'un bon rapport coût-efficacité pour une nouvelle chaudière. En revanche, la modification de l'entrée d'air ou l'installation d'un APH se heurtent souvent à des limites techniques ou de sécurité incendie. Le montage d'un APH dans une chaudière existante est souvent trop complexe et d'une rentabilité limitée.

Les préchauffeurs d'air sont des échangeurs de chaleur gaz-gaz, dont la conception dépend de la plage de températures. Le préchauffage d'air est à exclure d'office sur les brûleurs à tirage naturel.

Il est possible d'utiliser de l'eau préchauffée comme alimentation de chaudière ou dans les systèmes à eau chaude (tels que les schémas urbains).

Aspects économiques
En pratique, les économies possibles grâce au préchauffage de l'air de combustion s'élèvent à plusieurs pourcents de volume de vapeur généré, comme représenté sur le Tableau 3.4. C'est pourquoi les économies d'énergie, même dans les petites chaudières, peuvent être de l'ordre de plusieurs GWh par an. Par exemple, avec une chaudière de 15 MW, il est possible d'obtenir des économies de l'ordre de 2 GWh/an, soit 30 000 EUR/an et environ 400 t de CO_2/an.

	Unité	Valeur
Économies d'énergie	MWh/an	Plusieurs milliers
Réduction du CO_2	t/an	Plusieurs centaines
Économies en EUR	EUR/an	Dizaines de milliers
Nombre d'heures de fonctionnement annuel	h/an	8 700

Tableau 3.4 : Économies possibles grâce au préchauffage de l'air de combustion [28, Berger, 2005]

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Augmentation de l'efficacité énergétique des procédés.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [16, CIPEC, 2002]

3.1.2 Brûleurs récupératifs et régénératifs

Les pertes d'énergie constituent un problème majeur pour les procédés de chauffage des fours industriels. Avec une technologie classique, environ 70 % de la chaleur en entrée sont perdus par le biais des gaz de combustion à des températures d'environ 1 300 °C. C'est pourquoi des mesures d'économie d'énergie peuvent jouer un rôle important en particulier pour les procédés à température élevée (températures de 400 à 1 600 °C).

Description
Les brûleurs récupératifs et régénératifs ont donc été mis au point pour permettre la récupération directe de la chaleur perdue grâce au préchauffage de l'air de combustion. Un récupérateur est un échangeur de chaleur qui extrait la chaleur des gaz résiduaires sortant du four afin de préchauffer l'air de combustion en entrée. Par rapport aux systèmes de combustion à air froid, on peut s'attendre à ce que les récupérateurs permettent de réaliser des économies d'énergie de l'ordre de 30 %. Toutefois, normalement, ils ne préchauffent l'air que jusqu'à une température maximale de 550 à 600 °C. Il est possible d'utiliser des brûleurs récupératifs dans les procédés à température élevée (700 – 1 100 °C).

Les brûleurs régénératifs opèrent par paires et fonctionnent sur le principe d'un stockage de la chaleur à court terme en utilisant des régénérateurs de chaleur en céramique, voir

Figure 3.3. Ils récupèrent entre 85 et 90 % de la chaleur émanant des gaz résiduaires des fours ; c'est pourquoi l'air de combustion en entrée peut être préchauffé à des températures très élevées allant jusqu'à 100 à 150 °C en dessous de la température de fonctionnement du four. Les températures des applications vont de 800 à 1 500 °C. La réduction de la consommation de combustible peut atteindre 60 %.

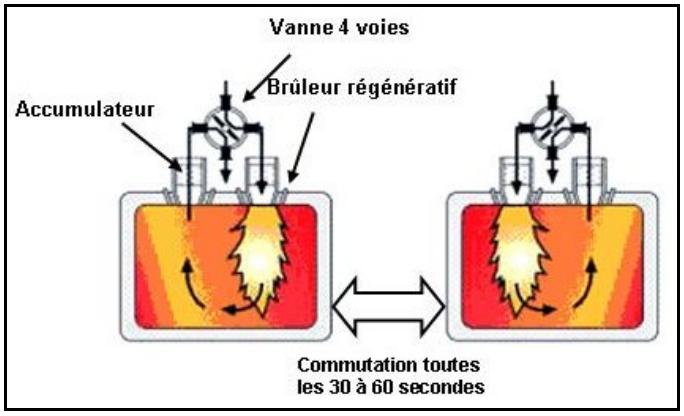


Figure 3.3 : Principe de fonctionnement des brûleurs régénératifs
[17, Åsbland, 2005]

Les brûleurs récupératifs et régénératifs (technologie HiTAC) sont mis en œuvre dans un nouveau mode de combustion avec une température de flamme homogène (combustion sans flamme, voir Section 5.1), sans les crêtes de température d'une combustion classique, dans une zone de combustion substantiellement élargie. La Figure 3.4 présente les différentes régions de combustion à différentes concentrations en oxygène et températures de l'air.

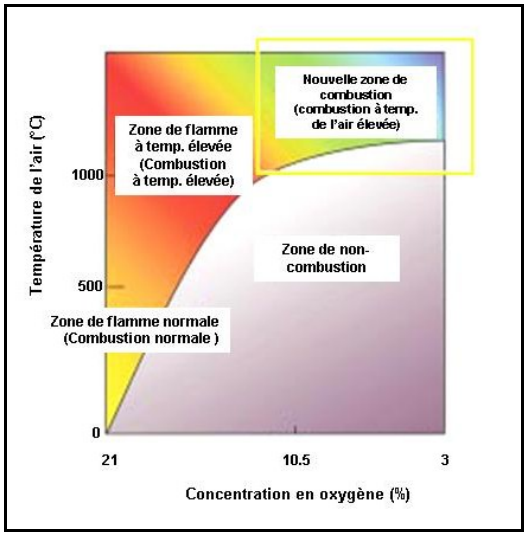


Figure 3.4 : Différentes régions de combustion
[17, Åsbland, 2005]

Avantages obtenus pour l'environnement

Économies d'énergie.

Effets croisés

La contrainte importante de la technologie des brûleurs récupératifs/régénératifs d'avant-garde réside dans le conflit entre des technologies conçues pour réduire les

émissions et celles centrées sur l'efficacité énergétique. La formation de NO_x, pour les combustibles exempts d'azote, est en principe fonction de la température, de la concentration d'oxygène et du temps de résidence. En raison des températures élevées de l'air préchauffé, et du temps de résidence, les flammes classiques ont un pic de température qui s'accompagne d'une forte augmentation des émissions de NO_x.

Données opérationnelles
Dans les fours industriels, l'air de combustion peut atteindre des températures comprises entre 800 et 1 350 °C, grâce à un échangeur de chaleur à performances élevées. Par exemple, un échangeur de chaleur régénératif moderne basculé sur un cycle élevé peut récupérer de l'ordre de 90 % de la chaleur perdue, ce qui engendre de fortes économies d'énergie.

Applicabilité
Utilisation très répandue.

Aspects économiques
Ces brûleurs ont pour inconvénient leur coût d'investissement. La réduction des coûts d'énergie permet rarement, à elle seule, de compenser le surcoût d'investissement. C'est pourquoi l'augmentation de la productivité dans le four et la réduction des émissions d'oxydes d'azote sont des facteurs importants à inclure dans l'analyse coût/avantage.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
L'augmentation de la productivité dans le four et la réduction des émissions d'oxydes d'azote sont des facteurs importants.

Usines à titre d'exemple
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[220, Blasiak W., 2004, 221, Yang W., 25 May 2005,, 222, Yang W., 2005, 223, Rafidi N., 2005, 224, Mörtberg M., 2005, 225, Rafidi N., June 2005, 226, CADDET, 2003, March]

3.1.3 Réduction du débit massique des gaz de combustion par une réduction de l'excès d'air

Description
Il est possible de minimiser l'excès d'air en ajustant le débit d'air proportionnellement au débit de combustible. Cette opération est fortement facilitée par la mesure automatisée de la teneur en oxygène des gaz de combustion. En fonction de la rapidité de fluctuation de la demande thermique du procédé, l'excès d'air peut être réglé manuellement ou régulé automatiquement. Un niveau d'air insuffisant entraîne l'extinction de la flamme, puis son réallumage et un retour de flamme provoquant des dégâts sur l'installation. Pour des raisons de sécurité, il doit donc toujours y avoir une certaine quantité d'air en excès présente (en règle générale de 1 à 2 % pour les combustibles gazeux et de 10 % pour les combustibles liquides).

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
La réduction de l'excès d'air peut entraîner une combustion incomplète et la formation de particules carbonées, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures qui risquent de dépasser les valeurs limites d'émission, ce qui limite les possibilités de gain en termes d'efficacité énergétique d'une telle mesure. En pratique, l'excès d'air est réglé aux valeurs auxquelles les émissions sont inférieures à la valeur limite.

Données opérationnelles
La réduction de l'excès d'air est limitée en raison de l'augmentation induite de la température du gaz brut ; des températures extrêmement élevées peuvent détériorer l'ensemble du système.

Applicabilité
Le point de réglage minimum de l'excès d'air, afin de maintenir les émissions en dessous de la valeur limite, dépend du brûleur et du procédé.

Il y a lieu de remarquer que l'excès d'air augmente lors de la combustion de déchets solides. Toutefois, les incinérateurs de déchets sont construits pour assurer un service de combustion des déchets et sont optimisés pour utiliser des déchets à titre de combustible.

Aspects économiques
Le choix des combustibles est souvent fonction du coût mais il peut aussi être influencé par la législation et les réglementations.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Obtention d'une température de procédé plus élevée, en particulier en cas de combustion directe.

Exemples
Certaines usines de ciment et de chaux et de transformation des déchets en énergie.

Références bibliographiques
[91, CEFIC, 2005, 125, EIPPCB]][126, EIPPCB]

3.1.4 Régulation et contrôle des brûleurs

Description
La régulation et le contrôle automatiques des brûleurs permettent de contrôler la combustion en surveillant et en contrôlant le débit de combustible, le débit d'air, la teneur en oxygène des gaz de combustion et la demande thermique. Voir aussi les Sections 2.10, 2.15.2 et 3.1.3.

Avantages obtenus pour l'environnement
Il est possible d'obtenir des économies d'énergie par une réduction de l'excès d'air et par l'optimisation de la consommation de combustible afin d'optimiser la combustion totale et de ne fournir que la chaleur nécessaire à un procédé.

Permet de minimiser la formation de NO_x dans le procédé de combustion.

Effets croisés

Aucun prévu.

Données opérationnelles
Il y a un stade de configuration initial, avec réétalonnage périodique des contrôles automatiques.

Applicabilité
Utilisation très répandue.

Aspects économiques
Bon rapport coût efficacité ; la période de retour sur investissement est spécifique à chaque site.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coût sur l'utilisation des combustibles.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[227, TWG]

3.1.5 Choix du combustible

Description
Le type de combustible choisi pour le procédé de combustion a une incidence sur la quantité d'énergie thermique fournie par unité de combustible utilisée (voir Introduction à Section 3.1 et Section 1.3.6.2). Le taux d'excès d'air requis (voir Section 3.1.3) est fonction du combustible utilisé, et cette dépendance augmente pour les solides. Le choix du combustible est par conséquent une option permettant de réduire l'excès d'air et d'augmenter le rendement énergétique du procédé de combustion. En règle générale, plus le pouvoir calorifique du combustible est élevé, plus le procédé de combustion est efficace.

Avantages obtenus pour l'environnement
Il est possible d'obtenir des économies d'énergie par une réduction de l'excès d'air et par l'optimisation de la consommation de combustible. Certains combustibles produisent moins de polluants pendant la combustion, en fonction de la source (par exemple le gaz naturel contient très peu de soufre (qui va s'oxyder en SO_x), aucun métal, etc.). Il existe des informations sur les émissions et les avantages des combustibles dans plusieurs BREF sectoriels verticaux dans lesquels le choix du combustible est réputé avoir un effet important sur les émissions.

Le choix de faire appel à un combustible ayant un pouvoir calorifique inférieur peut être dicté par d'autres facteurs environnementaux, (voir Section 1.1.3) tels que :

- combustible provenant d'une source durable
- récupération de l'énergie thermique provenant des gaz résiduaires, des effluents liquides ou solides utilisés comme combustibles
- minimisation d'autres impacts sur l'environnement, par exemple transport.

Effets croisés
Certaines émissions sont associées à certains combustibles, par exemple les poussières fines, les SO_x et les métaux sont associés aux charbons. Il existe des informations sur leurs effets dans divers BREF sectoriels verticaux dans lesquels le choix du combustible est réputé avoir un effet important sur les émissions.

Données opérationnelles
Aucune communiquée.

Applicabilité
Largement appliqué au cours des choix de conception pour une installation nouvelle ou pour une modernisation.

Pour les installations existantes, le choix des combustibles est limité par la conception de l' installation de combustion (en d'autres termes une installation de combustion au charbon ne peut être facilement convertie pour brûler du gaz naturel). Ce choix peut également être limité par l'activité centrale de l'installation, par exemple dans le cas d'un incinérateur de déchets.

Le choix du combustible peut également être influencé par la législation et les réglementations, incluant des exigences environnementales transfrontalières et locales.

Aspects économiques
La sélection du combustible repose de manière prédominante sur le coût.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- rendement du procédé de combustion,
- réduction des émissions d'autres polluants.

Exemples
- les déchets brûlés en tant que « service » dans les installations de transformation des déchets en énergie (incinérateurs de déchets à récupération de chaleur),
- déchets brûlés dans les fours à ciment,
- gaz résiduaires brûlés, par exemple hydrocarbures gazeux dans une raffinerie ou CO dans le traitement des métaux non ferreux,
- centrales de production d'électricité et/ou de chaleur à partir de la biomasse.

Références bibliographiques
[227, TWG]

3.1.6 Oxy-combustion (oxycombustible)

Description
On utilise de l'oxygène à la place de l'air ambiant que l'on extrait de l'air sur le site ou plus habituellement que l'on achète en vrac.

Avantages obtenus pour l'environnement
Son emploi offre divers avantages :

- une augmentation de la teneur en oxygène se traduit par une élévation de la température de combustion, entraînant une augmentation du transfert d'énergie vers

le procédé, qui aide à réduire la quantité de combustible non brûlé, et augmente de ce fait le rendement énergétique tout en réduisant les émissions de NO_x ;

- comme l'air contient environ 80 % d'azote, le débit massique des gaz est réduit en conséquence, et on a donc une réduction du débit massique des gaz de combustion ;
- il s'ensuit également une réduction des émissions de NO_x, dans la mesure où les niveaux d'azote au niveau des brûleurs sont considérablement réduits ;
- la réduction des débits massiques des gaz de combustion peut également se traduire par le recours à des systèmes de traitement des gaz résiduaires plus petits et donc par une réduction de la demande en énergie, par exemple pour les NO_x si toujours requis, les poussières fines, etc. ;
- si l'oxygène est produit sur le site, l'azote récupéré dans le procédé de séparation peut être utilisé, par exemple en mélange et/ou pour fournir une atmosphère inerte dans les fours où des réactions peuvent survenir dans des conditions d'oxydation (par exemple des réactions pyrophoriques dans les industries des métaux non ferreux)
- un avantage futur pourrait être la réduction de la quantité de gaz (et de la teneur élevée en CO_2) qui faciliterait la capture et la séquestration du CO_2 et vraisemblablement contribuerait à une diminution de la demande en énergie.

Effets croisés

La demande en énergie pour séparer l'oxygène de l'air est considérable et doit être incluse dans tous les calculs d'énergie (voir Section 1.3.6.1).

Au sein de l'industrie du verre, il existe une grande diversité de capacités de production de verre fondu, de types de verre et de types de fours de verre. Dans plusieurs cas, la conversion à cette nouvelle technologie utilisant l'oxygène comme combustible (par exemple par comparaison avec des fours récupératifs, pour des fours relativement petits et pour du verre spécial) améliore très souvent le rendement énergétique global (en prenant en compte l'équivalent d'énergie primaire requise pour produire l'oxygène). Toutefois, dans d'autres cas, la quantité d'énergie consommée pour la production d'oxygène est égale, voire supérieure à la quantité d'énergie économisée. Cette situation se vérifie notamment lorsqu'on compare le rendement énergétique global des fours verriers alimentés en oxygène avec celui des fours verriers régénératifs à boucle, pour la production à grande échelle de verre d'emballage. Toutefois, les recherches en cours sur les fours verriers à oxycombustion devraient déboucher sur des améliorations de leur rendement énergétique dans un proche futur. Les économies d'énergie ne compensent pas toujours les coûts d'achat de l'oxygène.

Données opérationnelles

La manutention de l'oxygène implique le respect de normes et de consignes de sécurité particulières, le risque d'explosion étant plus élevé avec des flux d'oxygène pur qu'avec des flux d'air.

Des précautions de sécurité supplémentaires sont nécessaires pour manipuler l'oxygène, car les conduites d'oxygène peuvent fonctionner à des températures très basses.

Applicabilité

Utilisation peu fréquente dans tous les secteurs. Dans le secteur du verre, les producteurs essaient de contrôler les températures dans l'espace de combustion des fours verriers à des niveaux acceptables pour les réfractaires et indispensables à la fusion d'un verre conforme à la qualité requise. En principe, une conversion à l'oxy-combustion ne signifie pas une augmentation des températures du four (températures

des réfractaires ou du verre), mais peut améliorer le transfert de chaleur. L'oxycombustion implique de contrôler plus étroitement les températures des fours, mais ces dernières ne sont pas supérieures à celles des fours aéro-combustibles (seules les températures des cœurs des flammes peuvent être supérieures).

Aspects économiques
Le prix d'achat de l'oxygène est élevé et dans le cas où l'oxygène est produit sur place, la demande en électricité est élevée. Les investissements dans une unité de séparation d'air sont loin d'être négligeables et vont fortement déterminer le rapport coût/efficacité de la combustion à l'oxygène.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Par suite de la réduction des flux de gaz résiduaires, les systèmes de traitement des gaz résiduaires, par exemple de NO_x, dont on a besoin sont plus petits. Toutefois, ceci ne s'applique qu'aux nouvelles constructions ou à des endroits dans lesquels les usines de traitement des déchets doivent être installées ou remplacées.

Exemples
Utilisation dans l'industrie du verre et dans l'industrie du raffinage des métaux (en Pologne, conjointement à l'utilisation d'azote).

Références bibliographiques
[157, Beerkens R.G.C. , 2006]

3.1.7 Réduction des pertes de chaleur grâce à l'isolation

Description
Les déperditions de chaleur par les parois du système de combustion sont déterminées par le diamètre du tuyau et l'épaisseur de l'isolation. Une épaisseur d'isolation optimale eu égard à la consommation d'énergie et aux aspects économiques doit être trouvée au cas par cas.

Lors du démarrage de l'installation, l'isolation thermique permet en principe de contenir au minimum les déperditions de chaleur à travers les parois. Toutefois, les matériaux d'isolation peuvent progressivement se détériorer et doivent être remplacés après une inspection dans le cadre des programmes de maintenance. Certaines techniques faisant appel à l'imagerie infrarouge sont pratiques pour identifier à partir de l'extérieur et alors que l'installation de combustion est en exploitation, les zones dans lesquelles l'isolation est endommagée, afin d'en prévoir la réparation au cours d'un arrêt.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Utilisation de matériau d'isolation.

Données opérationnelles
Une maintenance régulière et des contrôles périodiques sont importants afin de vérifier l'absence de fuites masquées à l'intérieur du système (sous les isolations). Dans les systèmes à pression négative, une fuite peut entraîner une augmentation de la quantité

de gaz dans le système et par conséquent une demande de puissance électrique au niveau des ventilateurs.

En outre, les parties non isolées du système peuvent blesser les exploitants si :

- il existe un risque de contact,
- les températures dépassent 50 °C.

Applicabilité
À tous les cas.

Aspects économiques
Faible coût, notamment en cas d'intervention pendant les périodes d'arrêt. Une réparation au titre de l'isolation peut être effectuée pendant des campagnes.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Maintien de la température du procédé.

Exemples
Une réparation au titre de l'isolation est effectuée pendant des campagnes dans les industries de l'acier et du verre.

Références bibliographiques
[91, CEFIC, 2005]

3.1.8 Réduction des pertes de chaleur par les ouvertures du four

Description
Les déperditions de chaleur par rayonnement peuvent se produire par les ouvertures des fours servant au chargement/déchargement. Ceci est particulièrement important dans les fours fonctionnant à une température supérieure à 500 °C. Les ouvertures sont, entre autres, les trappes d'évacuation et les cheminées, les trous de regard permettant de vérifier visuellement le procédé, les portes laissées partiellement ouvertes pour s'adapter à une tâche surdimensionnée, le chargement et le déchargement des matières et/ou des combustibles, etc.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune donnée communiquée.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Les pertes sont nettement visibles lorsqu'on procède à des balayages avec des caméras infrarouges. L'amélioration de la conception permet de minimiser les pertes par les portes et les trous de regard.

Applicabilité
Aucune donnée communiquée.

Aspects économiques

Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[127, TWG, , 271, US_DOE, 2004]

3.2 Systèmes à vapeur

3.2.1 Caractéristiques générales de la vapeur

Description
La vapeur est l'un des vecteurs d'énergie possibles dans les systèmes de chauffage à base de fluide. Les autres vecteurs d'énergie courants sont notamment l'eau et l'huile thermique. L'eau est utilisée lorsque la ou les température(s) requise(s) ne dépasse(nt) pas 100 °C et l'eau pressurisée (pour éviter qu'elle ne soit à ébullition) est utilisée pour des températures supérieures à 100 °C, voire supérieures à 180 °C dans certains cas. Les huiles thermiques ont un point d'ébullition plus élevé (et ont été mises au point pour avoir des durées de vie supérieures). Toutefois, en règle générale, leurs capacités thermiques et leurs coefficients de transfert de chaleur sont inférieurs à ceux de la vapeur. La vapeur présente plusieurs avantages, notamment son utilisation dans de nombreuses applications à contact direct, qui sont décrits ci-dessous.

Ces avantages sont entre autre une faible toxicité, une sécurité d'utilisation avec des matières inflammables ou explosives, une facilité de transport, un rendement élevé, une capacité thermique élevée et un faible coût par rapport aux huiles thermiques. La vapeur contient une quantité importante d'énergie sur une base de masse unitaire (2 300 à 2 900 kJ/Kg) qui peut être extraite sous forme de travail mécanique grâce à une turbine ou sous forme de chaleur pouvant être utilisée par un procédé. Étant donné que la majorité de la chaleur contenue dans la vapeur est stockée sous forme de chaleur latente, de grandes quantités de chaleur peuvent être transférées de manière efficace à température constante, ce qui constitue un atout utile dans de nombreuses applications de chauffage des procédés (voir Section 1.2.2.4). La vapeur fait également l'objet d'une étude détaillée dans le BREF LCP (Grandes installations de combustion).

Le passage de l'eau à des conditions de vapeur nécessite une grande quantité d'énergie, qui est stockée sous forme latente. Il est donc possible d'obtenir un transfert de chaleur dimensionnable dans une petite surface lorsqu'on utilise de la vapeur par comparaison avec d'autres fluides de chauffage :

- eau 4 000 W/m^2 °C
- huile 1 500 W/m^2 °C
- vapeur >10 000 W/m^2 °C.

Dans la limite entre les deux phases du système eau liquide-gaz représentée par une ligne droite sur le diagramme de phases (voir Figure 1.5), la pression de vapeur est directement liée à la température. La température peut être modulée facilement en

modifiant la pression. Un fonctionnement à haute pression ou à basse pression a des effets différents sur l'installation (voir la rubrique Données opérationnelles, ci-dessous). La pression vapeur de l'installation doit donc être prise en compte avec soin afin d'obtenir une optimisation entre fiabilité et rendement énergétique.

Les nombreux avantages offerts par la vapeur se reflètent dans la quantité importante d'énergie utilisée par les industries pour la générer. Par exemple, en 1994, l'industrie de l'UE-15 a utilisé environ 5988 PJ d'énergie sous forme de vapeur, ce qui représentait environ 34 % de l'énergie totale utilisée dans les applications industrielles pour la fabrication de produits. Certains exemples de l'énergie utilisée pour générer de la vapeur dans les différentes industries sont présentés dans le Tableau 3.5.

Industrie	Énergie pour générer de la vapeur (PJ)	Pourcentage d'énergie totale utilisée par cette industrie
Papier et pâte à papier	2 318	83 %
Produits chimiques	1 957	57 %
Raffinage pétrolier	1 449	42 %

Tableau 3.5 : Énergie utilisée pour générer de la vapeur dans plusieurs industries

Avantages obtenus pour l'environnement

La vapeur en elle-même n'est pas toxique.

Effets croisés

- pour la génération de vapeur, les émissions sont les émissions habituelles issues de la combustion ;
- le traitement de l'eau d'une chaudière entraîne des émissions de produits chimiques, issues du traitement ou des déioniseurs
- la vapeur perdue ou le condensat chaud peut entraîner une élévation des températures des égouts récepteurs ou des eaux réceptrices.

Données opérationnelles

Un système à vapeur comporte quatre composants distincts : l'installation de production (la chaudière), le système de distribution (réseau vapeur, c'est-à-dire canalisation vapeur et canalisation de retour du condensat), le consommateur ou utilisateur final (c'est-à-dire l'usine/le procédé utilisant la vapeur/chaleur) et le système de récupération du condensat. Lorsqu'elles sont efficaces, la production, la distribution, l'exploitation et la maintenance de la chaleur contribuent de manière significative à la réduction des pertes de chaleur, comme décrit ci-dessous :

- génération (voir Combustion, Section 3.1) : la vapeur est générée dans une chaudière ou dans le générateur d'un système de récupération de chaleur en transférant la chaleur des gaz de combustion à de l'eau. Lorsque l'eau absorbe suffisamment de chaleur, elle change de phase et passe de la phase liquide à la phase vapeur. Dans certaines chaudières, un surchauffeur augmente davantage le contenu énergétique de la vapeur. Sous pression, la vapeur circule alors depuis la chaudière ou le générateur de vapeur pour aller dans le système de distribution.
- distribution : le système de distribution transporte la vapeur depuis la chaudière ou le générateur jusqu'aux points d'utilisation finale. Bon nombre de systèmes de distribution ont plusieurs conduites de prélèvement qui fonctionnent à des pressions différentes. Ces conduites de distribution sont séparées par divers types de vannes d'isolation, vannes de régulation de pression et parfois par des turbines à contre-

pression. Les performances d'un système de distribution efficace nécessitent un bon équilibre de la pression vapeur, un bon drainage de condensats, une isolation adéquate et une régulation efficace de la pression.

Une vapeur haute pression présente les avantages suivants :

- la vapeur saturée possède une température plus élevée ;
- son volume est plus petit, ce qui signifie que les tuyaux de distribution requis sont plus petits ;
- il est possible de distribuer la vapeur à pression élevée et de réduire sa pression avant une application. La vapeur devient plus sèche et la fiabilité est plus élevée ;
- une pression plus élevée accroît la stabilité du processus d'ébullition de la chaudière.

Les systèmes basse pression présentent les avantages suivants :

- la perte d'énergie est moindre au niveau de la chaudière et dans le réseau de distribution ;
- la quantité d'énergie restante dans le condensat est relativement plus petite (voir Sections 3.2.14 et 3.2.15) ;
- les pertes occasionnées par des fuites dans le réseau de canalisation sont plus faibles ;
- il y a une diminution de l'encrassement.

Dans les systèmes à vapeur, les valeurs des pressions d'exploitation sont élevées : la sécurité est donc un aspect extrêmement important des procédés à vapeur. En outre, un système à vapeur est souvent soumis à un phénomène de coup de bélier ou à divers types de corrosion. En conséquence, la fiabilité et la durée de vie des différents composants dépendent également fortement de la conception, de la configuration et de la maintenance de l'installation.

- Utilisation finale : il existe de nombreuses utilisations finales différentes de la vapeur, par exemple :
    - entraînement mécanique : turbines, pompes, compresseurs, etc. ils sont généralement destinés à des équipements à grande échelle, comme dans la production d'électricité, les grands compresseurs, etc. ;
    - chauffage des procédés, séchage de tout type de produits papiers ;
    - utilisation dans les réactions chimiques, modération des réactions chimiques, fractionnement des composants hydrocarbures et comme source d'hydrogène dans le reformage du méthane à la vapeur.

Les équipements d'utilisation finale des systèmes à vapeur courants comprennent des échangeurs de chaleur, des turbines, des tours de fractionnement, des revaporisateurs et des cuves de réaction chimique.

La génération d'électricité est traitée dans le bref LCP (Grandes installations de combustion) ; la cogénération et la trigénération sont traitées respectivement dans les sections 3.4 et 3.4.2 du présent document.

Dans le chauffage des procédés, la vapeur transfère sa chaleur latente à un fluide du procédé dans un échangeur de chaleur. La vapeur est maintenue dans l'échangeur de chaleur par un purgeur de vapeur jusqu'à ce qu'elle se condense, stade à partir duquel le purgeur laisse passer le condensat dans le système de retour du condensat. Dans une

turbine, la vapeur transforme son énergie en travail mécanique pour entraîner une machinerie rotative ou alternative, comme les pompes, les compresseurs ou les générateurs électriques. Dans les tours de fractionnement, la vapeur facilite la séparation des divers composants d'un fluide du procédé. Dans les applications de revaporisation, la vapeur permet d'extraire les contaminants d'un fluide du procédé. La vapeur est également utilisée en tant que source d'eau pour certaines réactions chimiques.

- Récupération du condensat : lorsque la vapeur transfère sa chaleur latente à une application, l'eau se condense dans le système à vapeur et est renvoyée à la chaudière par le système de retour du condensat. Tout d'abord, le condensat est renvoyé à un réservoir de collecte à partir duquel il est pompé vers le désaérateur, qui en élimine l'oxygène et les gaz non condensables. Il est possible d'ajouter une eau d'appoint et des produits chimiques soit dans le réservoir de collecte, soit dans le désaérateur. Les pompes d'alimentation de la chaudière augmentent la pression de l'eau d'alimentation jusqu'à une pression supérieure à celle de la chaudière avant de l'injecter dans la chaudière pour achever le cycle.

- Calcul des chaudières à vapeur efficace : le consensus pan-européen sur le calcul du rendement de certaines chaudières est exprimé dans les documents CEN EN 12952-15:2003 (chaudières à vapeur à tubes d'eau et installations auxiliaires : essais d'acceptation) et dans le document CEN EN 12953-11:2003 (chaudières à foyer intérieur : essais d'acceptation)

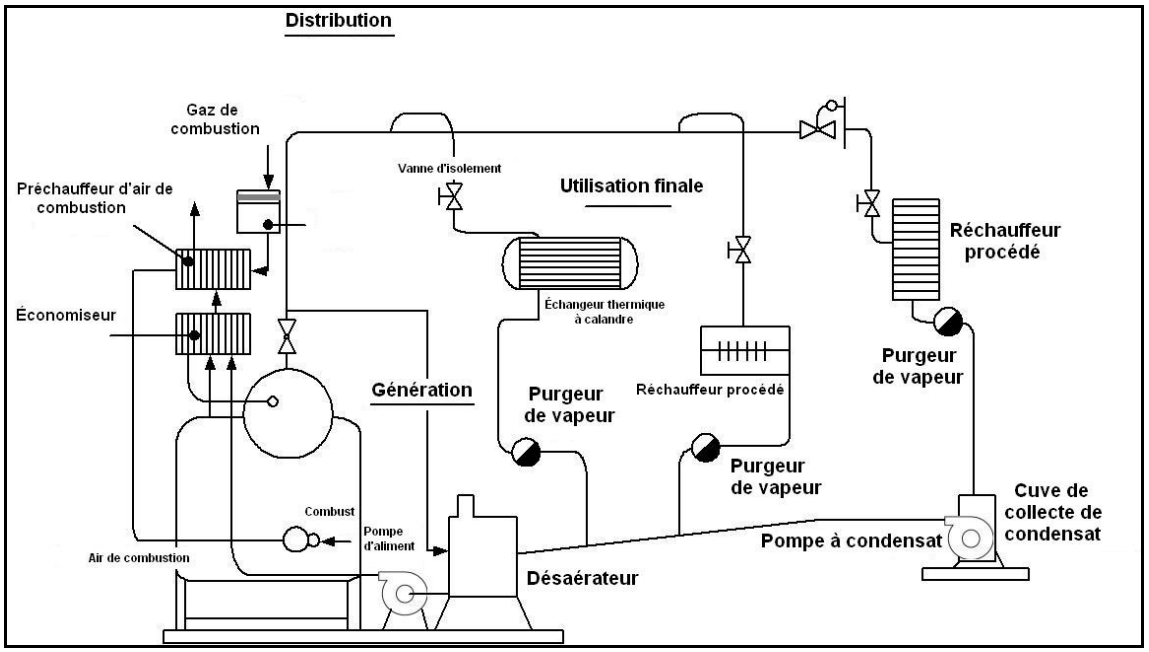


Figure 3.5 : Génération de vapeur et système de distribution type [123, US_DOE]
(combust=combustible)

Applicabilité

Utilisation très répandue.

Aspects économiques

Le coût de la génération de vapeur est directement influencé par le prix du combustible utilisé ; un avantage de prix en faveur d'un combustible donné peut fort bien contrebalancer l'inconvénient d'un rendement thermique relativement plus petit associé à ce combustible. Néanmoins, pour tout combustible donné, des économies importantes

peuvent être obtenues grâce à une amélioration du rendement thermique (voir Combustion, section 3.1).

L'élimination des pertes d'énergie associées à la génération de vapeur et à sa distribution (incluant le retour du condensat) qui sont évitables, réduit considérablement le coût de la vapeur au point d'utilisation.

Les économies d'énergie potentielles pour chaque site individuel peuvent s'échelonner d'une valeur inférieure à 1 % jusqu'à 35 % avec une économie moyenne de 7 %.

Agents moteurs pour la mise en œuvre

- Réduction des coûts d'énergie, des émissions et retour sur investissement rapide ;
- Utilisation de la vapeur : facilité et souplesse d'utilisation, faible toxicité, fourniture de chaleur élevée pour la taille du système.

Exemples

Utilisation très répandue dans de nombreux secteurs relevant de l'IPPC, tels que : la production d'électricité, tous les secteurs chimiques, l'industrie du papier et de la pâte à papier, l'industrie alimentaire, l'industrie des boissons et l'industrie laitière.

Références bibliographiques

[32, ADENE, 2005, 33, ADENE, 2005, 123, US_DOE, , 125, EIPPCB, , 236, Fernández-Ramos, 2007]

3.2.2 Présentation générale des mesures visant à améliorer la performance des systèmes à vapeur

Les systèmes à vapeur sont décrits de manière détaillée dans le bref LCP. Pour faciliter la tâche aux lecteurs, il est fait référence à la fois aux techniques du BREF LCP[3] et à celles décrites ici.

Le Tableau 3.6 présente les opportunités de performance les plus courantes en matière de génération, distribution et récupération.

Techniques pour les secteurs et activités associées où les systèmes à vapeur ne sont pas traités dans un BREF vertical		
Techniques par section du BREF ENE (Efficacité énergétique)		
	Avantages	**Section**
CONCEPTION		
Prise en compte de l'efficacité énergétique au niveau de la conception et de l'installation du réseau de canalisations vapeur	Optimisation des économies d'énergie	2.3
Dispositifs d'étranglement et utilisation des turbines à contre-pression. (Utilisation des turbines à contre-pression à la place des soupapes de réduction)	Fournit une méthode plus efficace de réduction de la pression vapeur pour les services basse pression Applicable lorsque la taille et les aspects économiques justifient l'emploi d'une turbine	3.2.3
FONCTIONNEMENT ET CONTROLE		
Amélioration des procédures et des contrôles des chaudières	Optimisation des économies d'énergie	3.2.4

[3] Référence au BREF LCP (Grandes installations de combustion), Édition de 2006

Techniques pour les secteurs et activités associées où les systèmes à vapeur ne sont pas traités dans un BREF vertical		
Techniques par section du BREF ENE (Efficacité énergétique)		
	Avantages	**Section**
Contrôle séquentiel des chaudières (applicable uniquement aux sites comportant plusieurs chaudières)	Optimisation des économies d'énergie	3.2.4
Installation de registres d'isolement des gaz de combustion (applicable uniquement aux sites comportant plusieurs chaudières))	Optimisation des économies d'énergie	3.2.4
GÉNÉRATION		
Préchauffage de l'eau d'alimentation en utilisant : • la chaleur perdue émanant par ex. d'un procédé, • des économiseurs qui transfèrent la chaleur des gaz de combustion, • l'eau d'alimentation désaérée pour chauffer le condensat ; et • en condensant la vapeur utilisée pour la revaporisation et en chauffant l'eau alimentant le désaérateur au moyen d'un échangeur de chaleur.	Récupération de la chaleur disponible dans les gaz d'échappement et renvoi de cette chaleur dans le système en préchauffant l'eau d'alimentation.	3.2.5 3.1.1
Prévention et élimination des dépôts de tartre sur les surfaces de transfert de chaleur. (Surfaces de transfert de chaleur de la chaudière propres)	Transfert efficace de la chaleur émanant des gaz de combustion à la vapeur	3.2.6
Minimisation des purges de la chaudière en améliorant le traitement de l'eau. Installation d'un contrôle automatique des matières solides dissoutes totales (TDS)	Réduction de la quantité de matières solides dissoutes totales (TDS) contenue dans l'eau de la chaudière, ce qui se traduit par une diminution du nombre de purges et donc par une réduction des pertes d'énergie	3.2.7
Ajout/réparation des réfractaires de la chaudière	Réduction des pertes d'énergie et restauration du rendement de la chaudière	2.10.1 2.9
Optimisation du taux de mise à l'air libre du désaérateur	Minimisation des pertes de vapeur pouvant être évitées	3.2.8
Minimisation des pertes dues aux cycles courts des chaudières	Optimisation des économies d'énergie	3.2.9
Maintenance de la chaudière		2.9
DISTRIBUTION		
Optimisation du système de distribution vapeur, (en particulier pour couvrir les points ci-dessous)		2.9, 3.2.10
Isolement des canalisations vapeur inutilisées	Minimisation des pertes de vapeur pouvant être évitées et réduction de pertes d'énergie liées aux canalisations et aux surfaces des équipements	3.2.10
Isolation des canalisations vapeur et des tuyaux de retour du condensat. (Vérifier que les canalisations du système à vapeur, les vannes, les raccords et les cuves sont bien isolés)	Réduction de pertes d'énergie liées aux canalisations et aux surfaces des équipements	3.2.11
Mise en place d'un programme de contrôle et de réparation pour les purgeurs de vapeur	Réduction du passage de la vapeur vive dans le système du condensat et optimisation du fonctionnement des équipements de transfert de chaleur pour utilisation finale. Minimise les pertes de chaleur évitables.	3.2.12
RÉCUPÉRATION		

Techniques pour les secteurs et activités associées où les systèmes à vapeur ne sont pas traités dans un BREF vertical				
Techniques par section du BREF ENE (Efficacité énergétique)				
	Avantages			**Section**
Collecte et retour du condensat à la chaudière en vue de son réemploi. (Optimisation de la récupération du condensat)	Récupération de l'énergie thermique contenue dans le condensat et réduction de la quantité d'eau d'appoint ajoutée au système, économies d'énergie et sur le coût du traitement de l'eau par des produits chimiques			3.2.13
Réemploi de la vapeur de détente. (Utilisation d'un condensat haute pression pour obtenir de la vapeur basse pression)	Exploitation de l'énergie disponible dans le retour du condensat			3.2.14
Récupération de l'énergie provenant des purges vapeur	Transfert de l'énergie disponible dans le flux de purge au système et réduction des pertes d'énergie			3.2.15
Techniques par type de combustible et par section dans le BREF LCP Juillet 2006				
	Charbon et lignite	***Biomasse et tourbe***	***Combustibles liquides***	***Combustibles gazeux***
Utilisation d'une turbine de détente pour récupérer le contenu énergétique des gaz pressurisés				7.4.1, 7.5.1
Changement des aubes de la turbine	4.4.3	5.4.4	6.4.2	
Utilisation de matières avancées pour atteindre des paramètres de vapeur élevés	4.4.3		6.4.2	7.4.2
Paramètres de vapeur supercritiques	4.4.3, 4.5.5		6.4.2	7.1.4
Double réchauffe	4.4.3, 4.5.5		6.4.2, 6.5.3.1	7.1.4, 7.4.2, 7.5.2
Chauffage de l'eau d'alimentation régénérative	4.2.3, 4.4.3	5.4.4	6.4.2	7.4.2
Utilisation du contenu calorifique des gaz de combustion pour le chauffage distant	4.4.3			
Accumulation de chaleur			6.4.2	7.4.2
Systèmes de contrôle informatisés avancés de la turbine à gaz et des chaudières de récupération suivantes				7.4.2

Tableau 3.6 : Techniques d'efficacité énergétique courantes pour les systèmes à vapeur industriels Adapté de [123, US_DOE]

Dans la plupart des cas, la vapeur est générée dans une installation industrielle au moyen d'une réaction de combustion : il existe ainsi un certain chevauchement des mesures globales d'efficacité énergétique applicable à la fois aux sections combustion et vapeur qui ne peut être évité ; voir Tableau 3.6. Les techniques spécifiques à la vapeur sont présentées dans cette section.

Pour mettre en œuvre l'une quelconque de ces mesures, il est capital de disposer d'informations pertinentes, quantifiées et d'une bonne connaissance de la consommation de combustible, de la génération vapeur et du réseau vapeur. La mesure et la surveillance de la vapeur contribuent à la compréhension du fonctionnement du procédé, conjointement à une connaissance des possibilités de modification des paramètres d'exploitation ; elles sont par conséquent indispensables à l'intégration réussie, par exemple, de la récupération de chaleur dans un procédé (voir Section 2.10).

3.2.3 Dispositifs d'étranglement et utilisation des turbines à contre-pression

Description
Les dispositifs d'étranglement sont courants dans l'industrie et permettent de réguler et de réduire la pression principalement par le biais de vannes. Étant donné que le processus d'étranglement est isenthalpique (à enthalpie constante en amont et en aval), il n'y a aucune perte d'énergie et en vertu de la première loi de la thermodynamique, le rendement énergétique est optimal. Toutefois, il s'agit d'une irréversibilité mécanique type qui réduit la pression et augmente l'entropie du fluide, sans contrepartie bénéfique. Il y a donc perte d'exergie et diminution de la capacité du fluide à produire de l'énergie (après la chute de pression) par exemple dans un processus de détente consécutif dans une turbine.

C'est pourquoi, si l'objectif est de réduire la pression d'un fluide, il est souhaitable de rechercher une détente isentropique avec effet complémentaire de production de travail utile par le biais d'une turbine. Si cela n'est pas réalisable, la pression de travail doit toujours être la plus élevée possible pour éviter de grandes variations de pression et les pertes d'exergie qui leur sont associées par le biais des vannes, des dispositifs de mesure (voir Section 2.10.4) ou par l'emploi de compresseurs ou de pompes pour apporter une énergie supplémentaire.

Une pratique fréquente dans les installations industrielles consiste à conserver la pression à l'entrée de la turbine aux conditions théoriques. Elle implique habituellement l'utilisation parfois abusive de vannes d'admission pour réguler la turbine. Selon la deuxième loi, il est plus avantageux d'avoir un flottement des spécifications de pression (pression glissante) et de laisser les vannes d'admission totalement ouvertes.

À titre de recommandation générale, les vannes doivent être dimensionnées de manière à être aussi grandes que possible. Un processus d'étranglement satisfaisant peut être obtenu avec une chute de pression de 5 à 10 % au flux maximum et non pas avec une chute de pression de 25 à 50 % comme c'était le cas dans le passé, lorsque les vannes étaient de petite dimension. Il va de soi que la pompe acheminant le fluide doit également être dimensionnée en fonction des conditions des variables.

Toutefois, une meilleure solution consiste à utiliser une turbine de contre-pression, qui conserve des conditions presque isentropiques et qui est complètement réversible (en termes de thermodynamique). La turbine est utilisée pour générer de l'électricité.

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction des pertes d'exergie.

Effets croisés
Augmentation de la consommation de combustible.

Données opérationnelles
Vois les exemples de l'Annexe 7.2.

Applicabilité
Applicable dans les nouveaux systèmes ou dans les systèmes ayant subi une modernisation de grande ampleur, en fonction des aspects économiques et des facteurs suivants :

- la turbine est utilisée pour générer de l'électricité ou pour fournir une puissance mécanique à un moteur, un compresseur ou un ventilateur. Tandis que les turbines à contre-pression sont les plus attrayantes au plan du rendement énergétique, la quantité de vapeur s'écoulant à travers les turbines à contre-pression doit correspondre au bilan vapeur global de tout le site. L'emploi d'un nombre excessif de turbines à contre-pression va se traduire par la génération d'une quantité de vapeur basse pression supérieure à celle pouvant être consommée par l'usine/le site. Cet excès de vapeur devra ensuite être mis à l'air libre, ce qui n'est pas efficace au plan de l'énergie. Le flux de vapeur en provenance de la turbine à contre-pression doit également être disponible pendant un grand pourcentage de temps, et de manière prévisible. Une source imprévisible ou discontinue ne peut être utilisée de manière fiable (sauf dans les rares cas où il est possible de faire correspondre les pics au niveau de l'offre et de la demande)

- les turbines à contre-pression ne sont pas utiles lorsque les deux niveaux de pression sont proches, car elles nécessitent un débit élevé et un différentiel de pression. Dans l'industrie de l'acier, dans le procédé des hauts-fourneaux, des turbines à chute de pression sont utilisées en raison du nombre élevé de gaz qui traversent le haut-fourneau.

Aspects économiques
Les turbines sont de plusieurs ordres de grandeur, plus onéreuses que les vannes de régulation. La taille minimum pour être efficace et dont il faut tenir compte avant de procéder à leur remplacement doit donc être examinée avec le bilan vapeur. Dans le cas de faibles débits massiques, les turbines ne sont pas un choix judicieux au plan de la rentabilité économique. À cette fin, l'énergie récupérée doit être suffisamment fiable, disponible, pendant un grand pourcentage du temps de production et correspondre à la demande.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Lorsqu'il est possible de les utiliser, économies de coût dans la fourniture de vapeur.

Exemples
Voir Annexe 7.2

Références bibliographiques
[6, Cefic, 2005, 123, US_DOE]

3.2.4 Techniques d'exploitation et de contrôle

Description
Amélioration des procédures d'exploitation et des contrôles de la chaudière
Un système de contrôle moderne optimisant l'emploi de la chaudière est représenté sur la figure 3.6 ci-dessous. Ce type de contrôle est traité plus avant dans la Section 2.15.2.

Utilisation de commandes séquentielles de pilotage des chaudières
Lorsqu'un site comporte plusieurs chaudières, il convient d'analyser la demande en vapeur et d'utiliser les chaudières de manière à optimiser la consommation d'énergie, en réduisant les cycles courts, etc.

Installation de registres d'isolement des gaz de combustion (s'applique uniquement aux systèmes comportant deux chaudières ou plus, qui ont une cheminée commune).

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
L'installation de plusieurs chaudières peut être envisagée pour faire face aux variations de la demande pendant le cycle de fonctionnement. Les chaudières peuvent être de types différents, en fonction de la courbe de la demande, des durées des cycles, etc.

L'utilisation de chaudière séquentielle peut être limitée lorsqu'une disponibilité élevée de la vapeur doit être garantie.

Aspects économiques
Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[123, US_DOE, , 134, Amalfi, 2006, 179, Stijns, 2005]

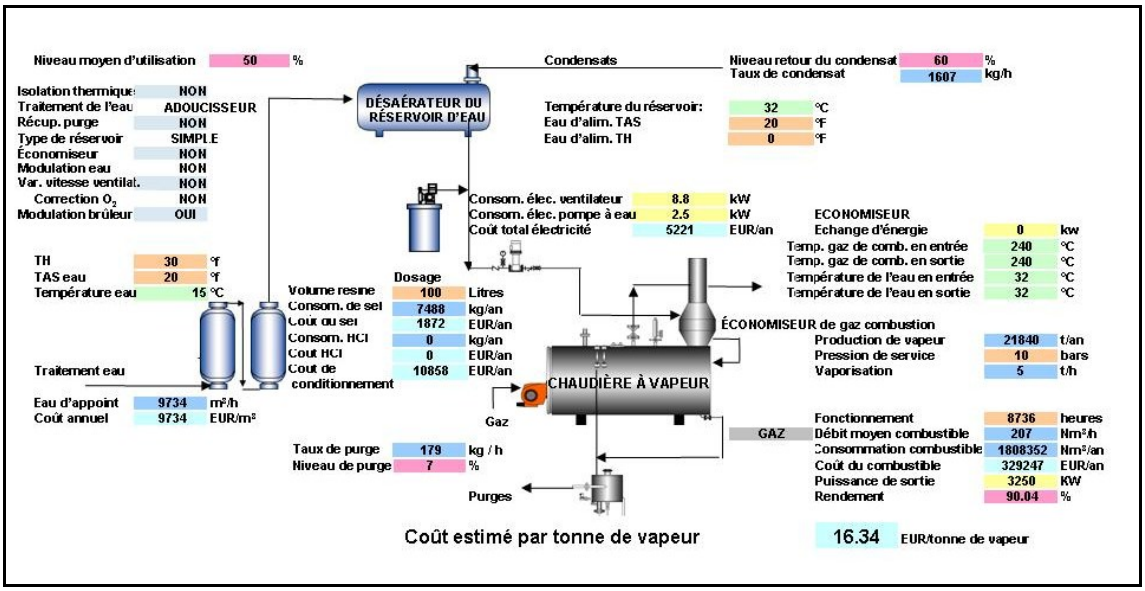


Figure 3.6 : Système de régulation moderne pour optimiser l'emploi d'une chaudière

3.2.5 Préchauffage de l'eau d'alimentation (incluant l'utilisation d'économiseurs)

Description

L'eau provenant du désaérateur qui est renvoyée à la chaudière a généralement une température d'approximativement 105 °C. L'eau de la chaudière dont la pression est plus élevée a une température plus élevée. La chaudière à vapeur est alimentée avec de l'eau pour compléter les pertes du système et recycler le condensat, etc. Il est possible de récupérer la chaleur en préchauffant l'eau d'alimentation, ce qui réduit ainsi les apports en combustibles requis par la chaudière à vapeur.

Le préchauffage peut être effectué de quatre manières :

- Utilisation de la chaleur perdue (par exemple émanant d'un procédé) : l'eau d'alimentation peut être préchauffée par la chaleur perdue disponible, par exemple en utilisant des échangeurs de chaleur eau/eau
- Utilisation d'économiseurs : un économiseur ((1) sur la figure 3.7) est un échangeur de chaleur qui réduit les apports en combustible nécessaires à la chaudière à vapeur en transférant la chaleur émanant des gaz de combustion vers l'eau d'alimentation en entrée
- Utilisation de l'eau d'alimentation désaérée : en outre, le condensat peut être préchauffé avec de l'eau d'alimentation désaérée avant d'atteindre le conteneur d'eau d'alimentation ((2) sur la figure 3.7)). L'eau d'alimentation provenant du réservoir de condensat ((3) sur la figure 3.7)) a une température inférieure à l'eau d'alimentation désaérée provenant du conteneur d'eau d'alimentation ((2) sur la figure 3.7)). Grâce à un échangeur de chaleur, l'eau d'alimentation désaérée est davantage refroidie (la chaleur est transmise à l'eau d'alimentation provenant du réservoir de condensats). En conséquence, l'eau d'alimentation désaérée acheminée au moyen d'une pompe d'eau d'alimentation est plus froide lorsqu'elle circule à travers l'économiseur ((1) sur la figure 3.7)). Il s'ensuit une augmentation de l'efficacité en raison d'une différence de température plus importante et une réduction de la température des gaz de combustion et des pertes dues aux gaz de combustion. Globalement, cela permet d'économiser de la vapeur vive, car l'eau d'alimentation du réservoir d'eau d'alimentation est plus chaude et la quantité de vapeur vive nécessaire est par conséquent moindre pour sa désaération.

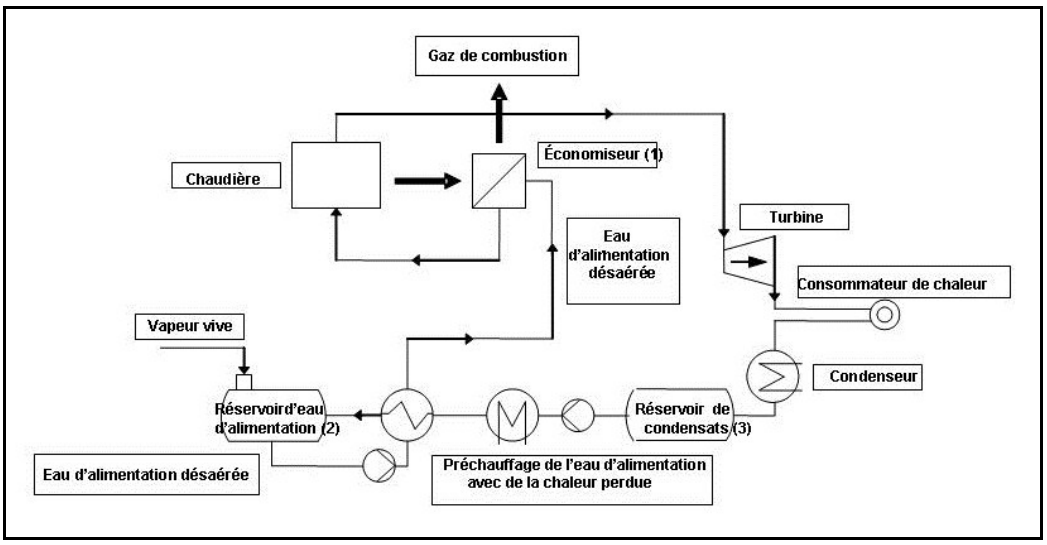


Figure 3.7 : Préchauffage de l'eau d'alimentation
[28, Berger, 2005]

- Installation d'un échangeur de chaleur dans le flux d'eau d'alimentation entrant dans le désaérateur et préchauffage de cette eau d'alimentation en condensant la vapeur utilisée pour la revaporisation (voir Section 3.28 pour plus de détails sur la désaération).

Le rendement global peut être amélioré grâce à ces mesures ; en d'autres termes l'apport d'énergie nécessaire sous forme de combustible est moindre pour une certaine quantité de vapeur en sortie.

Avantages obtenus pour l'environnement
La récupération d'énergie pouvant être obtenue dépend de la température des gaz de combustion (ou de celle du procédé principal), du choix de la surface et, dans une grande mesure, de la pression vapeur.

Il est largement admis qu'un économiseur peut accroître de 4 % le rendement de la production de vapeur. L'apport en eau doit être contrôlé afin d'obtenir une utilisation continue de l'économiseur.

Effets croisés
Les inconvénients éventuels de ces quatre approches sont les suivants : il est nécessaire de disposer de davantage d'espace et la possibilité d'y recourir pour les installations industrielles diminue avec l'augmentation de la complexité de ces dernières.

Données opérationnelles
Selon les spécifications des fabricants, il existe des économiseurs couramment disponibles avec une sortie nominale de 0,5 MW. Les économiseurs conçus avec des tubes nervurés sont utilisés pour des sorties nominales pouvant atteindre 2 MW, et ceux équipés avec des tubes à ailettes sont utilisés pour des sorties au-delà de 2 MW. Dans le cas des sorties de plus de 2 MW, environ 80 % des grandes chaudières à tubes d'eau livrées sont équipées avec des économiseurs, car elles demeurent économiques même lorsqu'elles fonctionnent en postes simples (à des charges système de 60 –70 %).

La température du gaz d'échappement dépasse généralement la température de la vapeur saturée d'environ 70 ºC. La température du gaz d'échappement pour un générateur de vapeur industriel standard est d'environ 180 °C. La limite inférieure de la température des gaz de combustion est le point de rosée acide des gaz de combustion. La température dépend du combustible utilisé et/ou de la teneur en souffre du combustible (elle est d'environ 160 °C pour le fioul, de 130 °C pour le fioul léger, de 100 °C pour le gaz naturel et de 110 ºC pour les déchets solides). Les chaudières utilisant du fioul domestique sont plus facilement sujettes à la corrosion et une partie de l'économiseur doit être conçue de manière à pouvoir être remplacée. Si la température du gaz d'échappement chute de manière significative en dessous du point de rosée, les économiseurs peuvent être l'objet d'une corrosion, qui se produit habituellement lorsque le combustible a une teneur en soufre importante.

À moins de prendre des mesures spéciales, la suie s'accumule dans les cheminées en dessous de cette température. En conséquence, les économiseurs sont fréquemment équipés d'un contrôleur de dérivation. Ce contrôleur déroute une partie des gaz d'échappement pour leur faire éviter l'économiseur, si la température des gaz dans la cheminée descend trop bas.

Si l'on part du principe qu'une réduction de 20 ºC de la température du gaz d'échappement augmente le rendement d'environ 1 %, cela signifie que, en fonction de la température de la vapeur et de la chute de température provoquée par l'échangeur de chaleur, le rendement peut être amélioré jusqu'à 6 – 7 %. La température de l'eau d'alimentation chauffée dans l'économiseur augmente généralement de 103 vers environ 140 °C.

Applicabilité

Dans certaines usines existantes, les systèmes de préchauffage de l'eau d'alimentation ne peuvent être intégrés qu'avec difficulté. En pratique, le préchauffage de l'eau d'alimentation avec de l'eau d'alimentation désaérée n'est pratiqué que rarement.

Dans les usines à forte production, le préchauffage de l'eau d'alimentation grâce à un économiseur est une pratique standard. Dans ce contexte, toutefois, il est possible d'améliorer le rendement de l'économiseur de jusqu'à 1 %, en augmentant la différence de température. L'utilisation de la chaleur perdue produite par d'autres procédés est également faisable dans la plupart des installations. Il existe aussi un potentiel d'utilisation dans les usines à plus faible production.

Aspects économiques

L'importance du potentiel d'économies d'énergie grâce à la mise en œuvre du préchauffage de l'eau d'alimentation de l'économiseur dépend de plusieurs facteurs, tels que les exigences du système local, l'état de la cheminée ou la qualité des gaz de combustion. Le retour sur investissement pour un système de distribution de vapeur donné est fonction du nombre d'heures de fonctionnement, du prix du combustible du moment et de sa situation géographique.

En pratique, les économies possibles grâce au préchauffage de l'eau d'alimentation représentent plusieurs pourcents du volume de vapeur généré. C'est pourquoi, même dans les petites chaudières, les économies d'énergie peuvent être de l'ordre de plusieurs GWh par an. Par exemple, pour une chaudière de 15 MW, des économies d'environ 5 GWh/an , soit 60 000 EUR/an et d'environ 1000 tonnes de CO_2/an peuvent être réalisées. Les économies sont proportionnelles à la taille de l'usine, ce qui signifie que les installations plus grandes enregistrent des économies plus élevées.

Les gaz de combustion des chaudières sont souvent rejetés dans la cheminée à des températures supérieures de 100 à 150 ºC par rapport à la température de la vapeur générée. En règle générale, le rendement d'une chaudière augmente de 1 % pour chaque tranche de réduction de 40 ºC de la température des gaz de combustion. Grâce à la récupération de la chaleur perdue, un économiseur peut souvent réduire la demande en combustible de 5 à 10 % et s'autofinancer en moins de 2 ans. Le tableau 3.7 montre des exemples de potentiel de récupération de chaleur.

Chaleur approximative récupérable à partir des gaz de combustion des chaudières				
Température initiale des gaz de combustion, ºC	Chaleur récupérable **(kW)**			
	Sortie thermique de la chaudière (kW)			
	7322	**14640**	**29290**	**58550**
205	381	762	1552	3105
260	674	1347	2694	5389
315	967	1904	3807	7644

Tableau 3.7 : Valeurs pour : gaz naturel comme combustible, 15 % d'excès d'air et température finale de la cheminée de 120 °C

Adapté à partir de [123, US_DOE]

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Réduction des coûts d'énergie et minimisation des émissions de CO_2.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[16, CIPEC, 2002, 26, Neisecke, 2003, 28, Berger, 2005, 29, Maes, 2005, 123, US_DOE]

3.2.6 Prévention et élimination des dépôts de tartre sur les surfaces de transfert de chaleur

Description
Sur les chaudières de production de vapeur ainsi que dans les tubes d'échange de chaleur, un dépôt de tartre peut se former sur les surfaces de transfert de chaleur. Ce dépôt se forme lorsque des matières solubles réagissent dans l'eau de la chaudière pour former une couche de matières sur le côté eau des tubes d'échange de la chaudière.

Un dépôt de tartre crée un problème parce qu'il possède généralement une conductivité thermique dont l'ordre de grandeur est inférieur à celle de l'acier nu. Lorsqu'un dépôt d'une certaine épaisseur et d'une composition donnée se forme sur la surface d'échange de chaleur, le transfert de chaleur par ces surfaces est réduit en fonction de l'épaisseur du tartre. Même de petits dépôts peuvent donc avoir un rôle d'isolant thermique efficace et par conséquent réduire le transfert de chaleur. Il s'en suit une surchauffe du métal du tube de la chaudière, des dégâts sur les tubes et une perte d'efficacité énergétique. En éliminant les dépôts, les exploitants peuvent facilement réaliser des économies d'énergie et réduire les coûts d'exploitation annuels.

Le gaspillage de combustible dû à la présence de tartre sur la chaudière peut être de 2 % pour les chaudières à tubes d'eau et atteindre jusqu'à 5 % pour les chaudières à tubes de fumées.

Au niveau de la chaudière, une élimination régulière de ce dépôt de tartre peut engendrer des économies d'énergie importantes.

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction des pertes d'énergie

Le tableau 3.8 présente les pertes de transfert de chaleur en cas de formation d'un dépôt de tartre sur la surface d'échange de chaleur :

Épaisseur du tartre (mm)	Différence de transfert de chaleur[4] (%)

[4] Ces valeurs ont été déterminées pour le transfert de chaleur dans une Chaudière à tubes d'acier. Le transfert de chaleur est analysé à partir des gaz de combustion jusqu'à l'eau d'alimentation. Les calculs prennent pour hypothèse que la composition du dépôt est toujours la même.

0,1	1,0 %
0,3	2,9 %
0,5	4,7 %
1	9,0 %

Tableau 3.8 : Différences de transfert de chaleur
[29, Maes, 2005]

Effets croisés
Augmentation de l'emploi de produits chimiques pour traiter l'eau d'alimentation afin d'éviter les dépôts de tartre.

Données opérationnelles
L'élimination du dépôt nécessite la mise hors service de la chaudière.

Il existe plusieurs manières d'éliminer et de prévenir la formation des dépôts :

- si la pression est réduite, la température est également réduite, ce qui restreint les dépôts de tartre. C'est l'une des raisons pour lesquelles la pression de la vapeur doit être maintenue aussi faible que possible (voir Section 3.2.1)
- le dépôt peut être éliminé pendant la maintenance, à la fois mécaniquement et par un nettoyage à l'acide
- si le dépôt de tartre se reforme trop rapidement, le traitement de l'eau d'alimentation doit être revu. Il sera peut-être nécessaire de procéder à une meilleure purification ou de recourir à des additifs supplémentaires.

La température des gaz de combustion est un indicateur indirect de formation d'un dépôt ou de tartre. Si la température des gaz de combustion augmente (alors que la charge de la chaudière et l'excès d'air sont constants), cet effet est vraisemblablement dû à la présence de tartre.

Applicabilité
Une simple inspection visuelle pendant la maintenance doit permettre de vérifier si les dépôts de tartre doivent être éliminés. En règle générale, pour les appareils haute pression (50 bars) des interventions de maintenance plusieurs fois par an peuvent s'avérer efficace. Pour les appareils à basse pression (2 bars) il est recommandé de procéder à une maintenance annuelle.

Il est possible d'éviter les dépôts en améliorant la qualité de l'eau (par exemple en passant à une eau adoucie ou déminéralisée). Un traitement à l'acide pour l'élimination des dépôts doit faire l'objet d'une évaluation attentive, en particulier pour les chaudières à vapeur haute pression.

Aspects économiques
Ils dépendent de la méthode utilisée ainsi que d'autres facteurs tels que la chimie de l'eau d'alimentation brute, le type de chaudière etc. Il est possible d'obtenir un retour sur investissement sous forme d'économies de combustible, une augmentation de la fiabilité du système vapeur et une augmentation de la durée de vie du système de chaudière (qui procure des économies sur les pertes de temps de production et les coûts en capital).

Voir exemples, à l'Annexe 10.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Augmentation de la fiabilité du système vapeur et augmentation de la durée de vie du système chaudière.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[16, CIPEC, 2002, 29, Maes, 2005, 123, US_DOE]

3.2.7 Minimisation des purges de la chaudière

Description
La minimisation de la fréquence des purges peut substantiellement réduire les pertes d'énergie car la température de la purge est directement liée à celle de la vapeur générée dans la chaudière.

Comme l'eau se vaporise dans la chaudière au cours de la génération de vapeur, des matières solides dissoutes demeurent dans l'eau, ce qui contribue à l'élévation de la concentration des matières solides dans la chaudière. Les matières solides en suspension peuvent former des sédiments, qui dégradent le transfert de chaleur (voir section 3.2.6). Les matières solides dissoutes favorisent la formation de mousse et le transport d'eau de la chaudière dans la vapeur.

Afin de ramener les niveaux de matière solides en suspension et de matières solides dissoutes totales (TDS) à des limites acceptables, deux procédures sont utilisées, en automatique ou en manuel dans l'un ou l'autre cas :

- la purge du fond est réalisée pour permettre un bon échange thermique dans la chaudière. Il s'agit habituellement d'une procédure manuelle de quelques secondes réalisée à plusieurs heures d'intervalles ;
- la purge de surface ou « purge d'écrémage » est conçue pour éliminer des matières solides dissoutes qui se concentrent à proximité de la surface des liquides et il s'agit souvent d'un procédé continu.

La purge des résidus de sels minéraux provoque d'autres pertes qui représentent de un à trois pourcents de la vapeur employée. De plus, le refroidissement du résidu de purge à la température prescrite par les autorités administratives peut également induire d'autres coûts.

Afin de réduire la quantité de purge requise, il existe plusieurs possibilités :

- la récupération du condensat (voir sections 3.2.13 et 3.2.15). Ce condensat est déjà purifié et ne contient donc pas d'impuretés, qui iront se concentrer à l'intérieur de la chaudière. S'il est possible de récupérer la moitié du condensat, la purge peut être réduite de 50 % ;
- en fonction de la qualité de l'eau d'alimentation, des adoucisseurs, une décarbonation et une déminéralisation peuvent s'avérer nécessaires. En outre, la désaération de l'eau et l'ajout de produit de conditionnement sont nécessaires. Le niveau de purge est lié au niveau du composant ayant la concentration la plus forte présent ou ajouté à l'eau

d'alimentation. En cas d'alimentation directe de la chaudière, des taux de purge de 7 à 8 % peuvent être obtenus ; ils peuvent être réduits à 3 % voire moins lorsque l'eau est prétraitée ;

- l'installation de systèmes de contrôle de purge automatisés peut également être envisagée, habituellement par une surveillance de la conductivité. Cela peut conduire à une optimisation entre fiabilité et perte d'énergie. Le taux de purge est imposé par le composant ayant la plus forte concentration en ayant à l'esprit que la concentration maximum possible dans la chaudière (TAC max (concentration totale permise) de la chaudière 38 ºC; silice 130 mg/l ; chlore <600 mg/l). Pour obtenir plus de détail, voir EN 12953 – 10
- la revaporisation de la purge à moyenne ou basse pression constitue une autre manière de valoriser l'énergie qui est disponible dans la purge. Cette technique s'applique lorsque le site comporte un réseau vapeur avec des pressions inférieures à la pression de génération de la vapeur. Cette solution peut être plus favorable au plan énergétique qu'un simple échange de chaleur lors de la purge par le biais d'un échangeur de chaleur (voir sections 3.2.14 et 3.2.15).

Le dégazage sous pression provoqué par une vaporisation se traduit également par d'autres pertes comprises entre un et trois pour-cent. Le CO_2 et l'oxygène sont éliminés de l'eau douce dans le procédé (en appliquant un léger excès de pression à une température de 103 °C). Ceci peut être minimisé en optimisant le taux d'aération du désaérateur (voir section 3.2.8).

Avantages obtenus pour l'environnement

La quantité d'énergie dépend de la pression à l'intérieur de la chaudière. Le Tableau 3.9 ci-dessous présente le contenu énergétique d'une purge. Le taux de purge est exprimé en pourcentage d'eau alimentation totale requise. Ainsi, un taux de purge de 5 % correspond à une perte de 5 % d'eau d'alimentation de la chaudière dans le cadre de la purge tandis que les 95 % restants sont convertis en vapeur. On voit ainsi immédiatement qu'il est possible de réaliser des économies en réduisant la fréquence des purges.

Contenu en énergie d'une purge en kJ/kg de vapeur produite					
Taux de purge (% de la sortie chaudière)	**Pression de service de la chaudière**				
	2 bar g	**5 bar g**	**10 bar g**	**20 bar g**	**50 bar g**
1	4,8	5,9	7,0	8,4	10,8
2	9,6	11,7	14,0	16,7	21,5
4	19,1	23,5	27,9	33,5	43,1
6	28,7	35,2	41,9	50,2	64,6
8	38,3	47,0	55,8	66,9	86,1
10	47,8	58,7	69,8	83,6	107,7

Tableau 3.9 : Contenu en énergie d'une purge
[29, Maes, 2005]

La quantité d'eau perdue peut également être réduite si la fréquence des purges est réduite. L'énergie ou l'eau de refroidissement utilisée pour tout refroidissement de cette eau perdue sont également économisées.

Effets croisés

Rejets des produits chimiques du traitement et de ceux utilisés dans la régénération du déioniseur, etc.

Données opérationnelles
Le taux de purge optimum est déterminé par divers facteurs, notamment la qualité de l'eau d'alimentation et le traitement de l'eau associée, la proportion des condensats réutilisée, le type de chaudière et les conditions de fonctionnement (débit, pression de service, type de combustible, etc.). Les taux de purge représentent généralement entre 4 et 8 % de la quantité d'eau douce, mais peuvent également atteindre 10 % si l'eau d'appoint a une forte teneur en matières solides. Pour des chaufferies optimisées, ils doivent être inférieurs à 4 %. Les taux de purge doivent être décidés en fonction des produits antimousses et des agents éliminateurs d'oxygène ajoutés dans l'eau traitée plutôt que par les sels dissous.

Applicabilité
Si la purge est réduite en dessous d'un niveau critique, des problèmes de formation de mousse et de formation de tartre peuvent réapparaître. Les autres mesures de la description (récupération du condensat, prétraitement de l'eau) peuvent également être utilisées pour abaisser cette valeur critique.

Une purge insuffisante risque de conduire à une dégradation de l'installation. Une purge excessive entraîne un gaspillage d'énergie.

Un retour de condensat est habituellement une pratique standard sauf en cas d'injection de vapeur dans le procédé : dans ce cas, il est impossible d'opérer une réduction des purges par retour de condensat.

Aspects économiques
Économies importantes d'énergie, de produits chimiques, d'eau d'alimentation et de refroidissement pouvant être réalisées et rendant ce procédé viable dans tous les cas, voir exemples détaillés à l'annexe 7.10.1.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Aspects économiques.
- Fiabilité de l'installation.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [16, CIPEC, 2002] [123, US_DOE, , 133, AENOR, 2004]

3.2.8 Optimisation du taux de mise à l'air libre du désaérateur

Description
Les désaérateurs sont des dispositifs mécaniques qui éliminent les gaz dissous contenus dans l'eau d'alimentation de la chaudière. La désaération protège le système vapeur des effets des gaz corrosifs. À cet effet, il réduit la concentration d'oxygène dissous et de dioxyde de carbone à un niveau où la corrosion est minimisée. Un niveau d'oxygène dissous égal ou inférieur à 5 parties par milliard (ppb) est nécessaire pour éviter un phénomène de corrosion dans la plupart des chaudières haute pression (> 1379 bar g). Alors que dans les chaudières basse pression, les concentrations d'oxygène tolérées peuvent atteindre 43 ppb, la durée de vie

des équipements est prolongée moyennant un coût infime ou nul, en limitant la concentration en oxygène à 5 ppb. Le dioxyde de carbone dissous est totalement éliminé grâce au désaérateur.

La conception d'un système de désaération efficace dépend de la quantité de gaz à éliminer et de la concentration finale en gaz (O_2). Celle-ci dépend à son tour du rapport entre l'eau d'alimentation de la chaudière fournie en appoint et le condensat retourné et de la pression de service du désaérateur.

Les désaérateurs utilisent de la vapeur pour chauffer l'eau jusqu'à la température de pleine saturation correspondant à la pression vapeur du désaérateur et pour éliminer et transporter les gaz dissous. Le flux de vapeur peut être parallèle, croisé ou à contre courant par rapport au flux d'eau. Le désaérateur comprend une section de désaération, un réservoir de stockage et un évent. Dans la section de désaération, la vapeur barbote à travers l'eau, à la fois en la chauffant et en l'agitant. La vapeur est refroidie par l'eau entrante et condensée au niveau du condenseur d'évent. Les gaz qui ne sont pas condensables et une partie de la vapeur s'échappent par l'orifice de mise à l'air libre. Toutefois, ceci doit être optimisé pour permettre une revaporisation satisfaisante, avec une perte de vapeur minime (Voir la rubrique Données opérationnelles, ci-dessous).

Des augmentations brutales de la vapeur libre ou de la vapeur « de détente » peuvent entraîner un pic de pression dans la chambre du désaérateur, ce qui se traduit par une réoxygénation de l'eau d'alimentation. Une soupape de régulation dédiée doit être mise en place pour maintenir constante la pression du désaérateur.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies des pertes d'énergie inutiles lors des lâchers de vapeur.

Effets croisés
Aucun effet croisé rapporté.

Données opérationnelles
La vapeur acheminée jusqu'au désaérateur a un effet d'extraction physique et chauffe le mélange de condensat renvoyé et de complément d'eau d'alimentation de la chaudière jusqu'à la température de saturation. La majeure partie de la vapeur se condense, mais une petite fraction (environ 5 à 14 %) doit être évacuée dans le cadre de son action de revaporisation (extraction des gaz dissous). En théorie, il convient normalement de calculer la vapeur nécessaire pour le chauffage puis de s'assurer que le débit est également suffisant pour la revaporisation. Si le taux de retour du condensat est élevé (>80 %) et si la pression du condensat est élevée par rapport à la pression du désaérateur, très peu de vapeur est alors nécessaire pour le chauffage, et des dispositions peuvent être prises afin de condenser le surplus de vapeur de détente.

L'énergie contenue dans la vapeur utilisée pour la revaporisation peut être récupérée par condensation de cette vapeur et en l'injectant, par le biais d'un échangeur de chaleur, dans le flux d'eau d'alimentation qui pénètre dans le désaérateur (voir section 3.2.5).

La demande en vapeur du désaérateur doit être réétudiée suite à la modernisation de tout système de distribution de vapeur, système de retour de condensat ou de toute mesure de conservation d'énergie par récupération de chaleur.

Des dispositifs de surveillance continue de l'oxygène dissous peuvent être installés pour faciliter l'identification des modes opératoires qui se traduisent par une élimination insuffisante de l'oxygène.

Le désaérateur est conçu pour éliminer l'oxygène qui est dissous dans l'eau en entrée, et non pas dans l'air entraîné. Les sources « d'air libre » comprennent les mauvais raccordements de tuyauterie du côté aspiration des pompes et les garnitures de pompe défectueuses.

Applicabilité
Applicable à tous les sites comportant des désaérateurs sur les systèmes vapeur. L'optimisation est une mesure de maintenance continue.

Aspects économiques
Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coût sur l'évacuation de vapeur inutile.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[123, US_DOE]

3.2.9 Minimisation des pertes dues aux cycles courts des chaudières

Description
Les pertes pendant les cycles courts se produisent chaque fois qu'une chaudière est coupée pendant une courte période de temps. Le cycle d'une chaudière comporte une période de purge, une période post-purge, une période d'inactivité, une période pré-purge et une période de retour à la combustion. Une partie des pertes au cours des périodes de purge et de la période d'inactivité peut être réduite dans les chaudières modernes, bien isolées, mais peut augmenter rapidement dans les chaudières plus anciennes avec une isolation médiocre.

Les pertes en régime cyclique à cycles courts peuvent être amplifiées si les chaudières génèrent la capacité requise dans une très courte période de temps, ce qui se produit notamment si la capacité installée de la chaudière est nettement supérieure aux besoins en règle générale. La demande en vapeur pour le procédé fluctue au fil du temps et doit être réévaluée périodiquement (voir section 2.2.2). La demande totale en vapeur peut avoir été réduite par la mise en place de mesures d'économies d'énergie. En variante, des chaudières peuvent avoir été installées dans l'optique d'un agrandissement ultérieur, qui n'a jamais été réalisé.

Un premier point requérant une attention particulière, dans la phase conception de l'installation, est le type de chaudière. Les chaudières à tubes de fumées ont une inertie thermique nettement plus importante et un grand contenu en eau. Elles sont équipées pour répondre à une demande de vapeur continue et pour faire face à des grosses pointes de charge.

Les générateurs de vapeur ou les chaudières à tubes d'eau, en revanche, peuvent aussi fournir de la vapeur en grande quantité. Leur contenu en eau relativement moins important les rend mieux adaptés aux installations à forte fluctuation de charges.

L'installation de plusieurs chaudières dotées d'une plus petite capacité au lieu d'une seule chaudière à grande capacité permet d'éviter un fonctionnement en régime à cycles courts et d'accroître ainsi la flexibilité et la fiabilité. Un contrôle automatisé du rendement de la production ainsi que des coûts marginaux pour la génération de vapeur de chaque chaudière peut commander un système de gestion des chaudières. Ainsi, une demande supplémentaire en vapeur est satisfaite par la chaudière ayant le coût marginal le plus faible.

Il existe une autre option possible avec la présence d'une chaudière en veille. Dans ce cas, la chaudière peut être maintenue à température par l'eau circulant depuis l'autre chaudière directement dans la chaudière en veille. Les pertes de gaz de combustion pour la chaudière en veille sont minimisées. La chaudière en veille doit être bien isolée et équipée d'une soupape d'air correcte pour le brûleur.

Des économies d'énergie peuvent être obtenues par une isolation ou un remplacement de chaudière.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune donnée communiquée.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
Le maintien d'une chaudière en veille à la température correcte nécessite un apport continu d'énergie tout au long de l'année, qui correspond à approximativement 8 % de la capacité totale de la chaudière. Les avantages en termes de mesures d'économie d'énergie et de fiabilité doivent être déterminés.

Applicabilité
L'impact négatif d'un régime à cycles courts devient évident en cas de faible utilisation de la capacité de la chaudière disponible, par exemple moins de 25 %. Dans de tels cas, il y a lieu d'étudier s'il est opportun de remplacer le système de chaudière.

Aspects économiques
Voir exemple de l'annexe 7.10.1.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Économies de coûts.
- Amélioration des performances du système.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [123, US_DOE]

3.2.10 Optimisation des systèmes de distribution de vapeur

Description
Le système de distribution transporte la vapeur de la chaudière aux différents utilisateurs finaux. Bien que les systèmes de distribution semblent être passifs, ils régulent en réalité la fourniture de vapeur et répondent aux fluctuations de température et aux exigences de pression. En conséquence, une performance correcte du système de distribution nécessite une conception soignée et une maintenance efficace. Les canalisations doivent être correctement dimensionnées, fixées, isolées et configurées avec la souplesse adéquate. Les dispositifs de régulation de la pression tels que des vannes de détente et des turbines à contre-pression doivent être configurés pour fournir un équilibre vapeur correct entre les différents collecteurs de vapeur. En outre, le système de distribution doit être configuré pour permettre une purge adéquate des condensats, ce qui nécessite que le collecteur de condensats ait une capacité adéquate et un choix de purgeur de vapeur approprié.

La maintenance du système est importante, il convient en particulier :

- de vérifier que les purgeurs fonctionnent correctement (voir section 3.2.12) ;
- que l'isolation soit installée et maintenue en place (voir section 3.2.11) ;
- que les fuites soient détectées et traitées systématiquement par la maintenance préventive. La tâche est d'autant plus facile lorsque les fuites sont signalées par les exploitants et colmatées rapidement. Les fuites incluent les fuites d'air du côté aspiration des pompes ;
- de rechercher et d'éliminer les canalisations vapeur inutilisées.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie sur les pertes inutiles.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Le réseau de canalisation vapeur transporte la vapeur de la chaudière aux utilisateurs finaux. Les canalisations d'un système vapeur bien conçues ont pour caractéristiques d'être dimensionnées, configurées et fixées de manière adéquate. L'installation de tuyaux ayant un diamètre plus grand est certes plus onéreuse mais réduit les pertes de charge pour un débit donné. En outre, les grands diamètres de tuyau contribuent à réduire le bruit associé au débit vapeur. À ce titre, il y a lieu de prendre en compte le type d'environnement dans lequel la canalisation vapeur est située lors du choix du diamètre du tuyau. Les points importants relatifs à la configuration sont la souplesse et le drainage . En ce qui concerne la souplesse, la canalisation (en particulier au niveau des raccords des équipements) doit pouvoir accepter des réactions thermiques au cours des démarrages et des arrêts du système. De plus, la canalisation doit être équipée d'un nombre suffisant de collecteurs de condensats, dimensionnés correctement afin de favoriser un drainage efficace des condensats. Elle doit, en outre, être en déclivité suffisante pour favoriser le drainage des condensats vers les canalisations de collecte. En règle générale, ces points de drainage ont deux conditions de fonctionnement différentes, un fonctionnement normal et un fonctionnement au démarrage ; ces deux conditions de charge doivent être prises en compte au stade de la conception initiale.

Applicabilité
À tous les systèmes vapeur. Le dimensionnement correct des canalisations, en minimisant le nombre de coudes, en particulier les changements brutaux de direction, etc. peut être mieux pris en compte aux stades de la conception et de l'installation (incluant les grosses réparations, les travaux de modification et de modernisation de grande ampleur).

Aspects économiques
- Le dimensionnement correct au stade de la conception permet d'avoir un bon retour sur investissement pendant la durée de vie du système.
- Les mesures de maintenance (par exemple la réduction des fuites) donnent également un retour sur investissement rapide.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Économies de coût
- Santé et sécurité.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[123, US_DOE]

3.2.11 Calorifugeage des canalisations vapeur et des canalisations de retour du condensat

Description
Les canalisations vapeur et les canalisations de retour de condensat qui ne sont pas isolés sont une source constante de déperdition thermique à laquelle il est facile de remédier. Le calorifugeage de toutes les surfaces thermiques est dans la plupart des cas, une mesure facile à mettre en œuvre. En outre, une détérioration localisée du revêtement calorifuge est facile à réparer. Le revêtement calorifuge est parfois retiré lors des interventions de maintenance ou des réparations sans être ensuite remis en place. Les coquilles isolantes amovibles pour vannes ou d'autres installations sont parfois absentes.

Un isolant humide ou durci doit être remplacé. L'humidité provient d'une fuite au niveau des tuyaux ou des tubes. Les fuites doivent être réparées avant le remplacement de l'isolant.

Avantages obtenus pour l'environnement
Le tableau 3.10 présente les déperditions thermiques provenant de conduites vapeur non isolées à différentes pressions vapeur.

Diamètre de la canalisation de distribution (mm)	Déperdition thermique approximative par 30 m de canalisation vapeur non isolée (GJ/an)			
	Pression vapeur (bar)			
	1	**10**	**20**	**40**
25	41000	83470	109800	145000
50	68830	140600	184500	246000
100	121500	248900	328000	439300

200	216700	451000	594500	798100
300	309000	644300	852300	1148000

Tableau 3.10 : Déperdition thermique par 30 mètres de canalisation vapeur non isolée
Adaptation de [123, US_DOE]

Une réduction des pertes d'énergie grâce à une meilleure isolation peut également entraîner une réduction de la consommation d'eau et des économies connexes concernant le traitement de l'eau.

Effets croisés
Augmentation de l'utilisation des matériaux d'isolation.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
À titre de référence, toutes les canalisations soumises à des températures supérieures à 200 °C et dont les diamètres sont supérieurs à 200 mm doivent être calorifugées. Le bon état de l'isolation doit être vérifié de manière périodique (par exemple avant interventions, via des balayages IR du réseau de canalisation). En outre, toutes les surfaces susceptibles d'atteindre des températures de plus de 50 ºC, pour lesquelles il existe un risque de contact humain doivent être isolées afin de protéger le personnel.

Aspects économiques
Cette technique peut donner un retour sur investissement rapide, mais la durée dépend du prix de l'énergie, des pertes d'énergie et des coûts de l'isolation.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Facile à atteindre par rapport à d'autres techniques. Santé et sécurité.

Exemples
Application très répandue

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [16, CIPEC, 2002]

3.2.11.1 Installation de plaques d'isolation amovibles sur les vannes et les raccords

Description
Au cours des interventions de maintenance, le calorifugeage qui recouvre les tuyaux, les vannes et les raccords est souvent détérioré ou retiré sans être ensuite remis en place.

L'isolation des différents composants d'une installation varie souvent. Dans une chaudière moderne, la chaudière proprement dite est généralement bien isolée, à la différence des raccords, vannes et autres raccordements qui, en règle générale, le sont moins. Il existe pour les surfaces qui émettent de la chaleur, des plaques de calorifugeage réutilisables et amovibles.

Avantages obtenus pour l'environnement
L'efficacité de cette technique dépend de l'application spécifique, mais la déperdition thermique par suite de ruptures fréquentes d'isolation est souvent sous-estimée.

Le tableau 3.11 présente les économies d'énergie réalisées grâce à l'utilisation de coquilles isolantes pour vannes, pour une plage de dimension de vanne et de températures de service. Ces valeurs ont été calculées avec un programme informatique conforme aux exigences de la norme ASTM C 1680 – Calculs des déperditions thermiques et des températures de surface. Les économies d'énergie sont définies comme la perte d'énergie entre la vanne non isolée et la vanne isolée fonctionnant à la même température.

Économies* d'énergie approximatives en watt grâce à l'installation de coquille isolante amovible pour vanne (W)						
Température de service ºC	**Dimension de la vanne (mm)**					
	75	**100**	**150**	**200**	**255**	**305**
95	230	315	450	640	840	955
150	495	670	970	1405	1815	2110
205	840	985	1700	2430	3165	3660
260	1305	1800	2635	3805	4950	5770
315	1945	2640	3895	5625	7380	8580
* repose sur un calorifugeage avec une plaque d'isolation de 25 mm d'épaisseur sur une vanne à bride de classe ANSI 150-livre, à une température ambiante de 20 °C						

Tableau 3.11 : Économies d'énergie approximative en watt grâce à l'installation de coquille isolante amovible pour vanne (W)
[123, US_DOE]

Une installation correcte des coquilles isolantes contribue également à la réduction du bruit.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
Les plaques d'isolation réutilisables sont couramment employées dans les installations industrielles afin d'isoler les brides, les vannes, les joints d'expansion, les échangeurs de chaleurs, les pompes, les turbines, les réservoirs et autres surfaces irrégulières. Les plaques sont souples, résistent aux vibrations et peuvent être utilisées avec des équipements montés à l'horizontale ou à la verticale ou avec des équipements difficiles d'accès.

Applicabilité
Applicable à toute tuyauterie ou équipement à température élevée devant être isolé afin de réduire les déperditions thermiques, les émissions et d'améliorer la sécurité. En règle générale, toute surface qui atteint des températures de plus de 50 °C, pour laquelle il existe un risque de contact humain doit être isolé afin de protéger le personnel (voir Isolation, section 3.2.11). Les plaques d'isolation peuvent être facilement déposées pour l'inspection périodique ou les interventions de maintenance et remises en place comme il se doit. Elles peuvent également contenir des matériaux qui agissent comme barrières acoustiques afin de contribuer au contrôle du bruit.

Il faut observer la plus grande prudence lors de l'isolation des purgeurs de vapeur. Certains types en effet ne fonctionnent correctement que si des quantités limitées de vapeur peuvent se condenser ou si une quantité de chaleur définie peut être émise (par exemple, certains purgeurs de vapeur thermostatiques et thermodynamique).

Une isolation excessive de ces purgeurs de vapeur risque d'entraver leur fonctionnement. C'est pourquoi il est nécessaire de consulter le fabricant ou un expert en la matière avant de procéder à leur isolation.

Aspects économiques
Cette technique donne un retour sur investissement rapide, dont la durée dépend néanmoins du prix de l'énergie et de la zone à isoler.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Économies de coûts.
- Santé et sécurité.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [16, CIPEC, 2002, 123, US_DOE]

3.2.12 Mise en place d'un programme de contrôle et de réparation pour les purgeurs de vapeur

Description
Les purgeurs de vapeur présentant une fuite perdent des quantités importantes de vapeur, ce qui se traduit par de grosses pertes d'énergie. Une maintenance correcte permet de réduire efficacement ces dernières. Dans les systèmes à vapeur, dans lesquels les purgeurs de vapeur n'ont pas été inspectés au cours des trois à cinq dernières années, jusqu'à environ 30 % d'entre eux peuvent être défectueux et laisser s'échapper de la vapeur. Dans les systèmes pour lesquels il existe un programme de maintenance régulière, moins de 5 % du nombre total de purgeurs doit présenter une fuite.

Il existe de nombreux types de purgeurs de vapeur différents et chaque type a ses propres caractéristiques et préconditions. Les vérifications permettant de rechercher une fuite de vapeur reposent sur des vérifications acoustiques, visuelles, de conductivité électrique ou thermique.

En cas de remplacement des purgeurs de vapeur, il est possible d'envisager de mettre en place des purgeurs de vapeur à orifice venturi. Certaines études laissent supposer que dans des conditions spécifiques, ces purgeurs entraînent une diminution des pertes de vapeur et une augmentation de la durée de vie. Toutefois, les experts ont des avis partagés sur l'utilisation des purgeurs de vapeur à orifice venturi. Dans certains cas, ce type de purgeur constitue une fuite permanente et ne devrait par conséquent être utilisé que pour des services très spécifiques (par exemple sur les surchauffeurs, qui fonctionnent toujours à un minimum de 50 à 70 % de leur capacité théorique nominale).

Avantages obtenus pour l'environnement

Le tableau 3.12 présente les pertes de vapeur approximatives provoquées par des fuites de plusieurs diamètres.

Diamètre approximatif de l'orifice du purgeur (mm)	Perte approximative de vapeur (kg/h)			
	Pression approximative de vapeur (barg)			
	1	**7**	**10**	**20**
1	0,38	1,5	2,1	-
2	1,5	6,0	8,6	16,4
3	6,2	24	34,4	65,8
4	13,9	54	77	148
6	24,8	96	137	263
8	55,8	215	309	591

Tableau 3.12 : Pertes de vapeur occasionnées par des fuites sur des purgeurs de vapeur

[123, US_DOE]

Données opérationnelles

Une étude annuelle procède à la vérification de tous les purgeurs de vapeur. Les différentes catégories de fonction sont présentées dans le tableau 3.13.

Abréviation	Description	Définition
OK	OK	Fonctionne comme il devrait
BT	Soufflage	La vapeur s'échappe du purgeur de vapeur, avec des pertes maximales. Doit être remplacé
LK	Fuites	La vapeur s'échappe de ce purgeur : il doit être réparé ou remplacé
RC	Cycle rapide	Le cycle de ce purgeur thermodynamique est trop rapide. Il doit être réparé ou remplacé
PL	Colmaté	Ce purgeur est fermé. Ne laisse passer aucun condensat. Doit être remplacé.
FL	Inondé	Ce purgeur de vapeur ne peut plus traiter le flux de condensats. À remplacer avec un purgeur de dimension correcte.
OS	Hors service of service	Cette canalisation est hors service
NT	Non testé	Le purgeur de vapeur ne peut pas être atteint et n'a donc pas été testé

Tableau 3.13 : Diverses phases de fonctionnement des purgeurs de vapeur

[29, Maes, 2005]

La quantité de vapeur perdue pour un purgeur de vapeur peut être estimée comme suit :

$$L_{t,y} = \frac{1}{150} \times FT_{t,y} \times FS_{t,y} \times CV_{t,y} \times h_{t,y} \times \sqrt{P_{in,t}^2 - P_{out,t}^2}$$ **Équation 3.5**

Où :

- $L_{t,y}$ = est la quantité (en tonnes) de perte de vapeur du purgeur de vapeur t sur une période donnée (y = an)

- $FT_{t,y}$ = est le facteur d'exploitation du purgeur de vapeur t pendant une période y (an)
- $FS_{t,y}$ = est le facteur de charge du purgeur de vapeur t pendant une période y (an)
- $CV_{t,y}$ = est le coefficient de débit du purgeur de vapeur t pendant une période y (an)
- $h_{t,y}$ = est le nombre d'heures de fonctionnement du purgeur de vapeur t pendant une période y (an)
- $P_{in,t}$ = est la pression d'entrée du purgeur de vapeur t (atm)
- $P_{out,t}$ = est la pression de sortie du purgeur de vapeur t (atm).

Le Tableau 3.14. présente le facteur d'exploitation $FT_{t,y}$.

	Type	FT
BT	Soufflage	1
LK	Fuite	0,25
RC	Cycle rapide	0,20

Tableau 3.14 : Facteurs d'exploitation concernant les pertes de vapeur des purgeurs de vapeur
[29, Maes, 2005]

Le facteur de charge prend en compte l'interaction entre la vapeur et le condensat. Plus il y a de condensat circulant à travers le purgeur de vapeur, moins il y a d'espace pour laisser passer la vapeur. La quantité de condensat est fonction de l'application comme représenté dans le Tableau 3.15 ci-dessous :

Application	Facteur de charge
Application procédé standard	0,9
Purgeurs de vapeur pour la purge de ligne et de traçage	1,4
Flux de vapeur (sans condensat)	2,1

Tableau 3.15 : Facteur de charge des pertes de vapeur
[29, Maes, 2005]

Enfin, la dimension de la canalisation détermine aussi le coefficient de débit :

$CV = 3,43\ D^2$
Où D = rayon de l'ouverture (cm).

Exemple de calcul :

- $FT_{t,y} = 0,25$
- $FS_{t,y} = 0,9$ parce que la quantité de vapeur ayant traversé le purgeur est condensée, mais correcte par rapport à la capacité du purgeur de vapeur
- $CV_{t,y} = 7,72$
- D = 1,5 cm
- $h_{t,y}$ = 6000 heures par an
- $P_{in,t}$ = 16 atm

- $P_{out,t}$ = 1 atm.

Le purgeur de vapeur perd ainsi jusqu'à 1110 tonnes de vapeur par an.

Lorsque cela se produit dans une société où les coûts de vapeur sont de 15 EUR/tonne, la perte finale s'élève alors à : 16 650 EUR par an.

Si la vapeur s'échappe totalement au lieu de simplement fuir, les coûts peuvent s'élever à 66 570 EUR par an.

Ces pertes justifient rapidement la mise en place d'un système de contrôle et de gestion efficace pour tous les purgeurs de vapeur d'une société.

Applicabilité
Un programme permettant de rechercher des fuites sur les purgeurs de vapeur et de déterminer si les purgeurs de vapeur doivent être remplacés est nécessaire pour chaque système vapeur. Les purgeurs de vapeur ont souvent une durée de vie relativement courte.

La fréquence de vérification des purgeurs de vapeur dépend de la taille du site, du débit vapeur, des pressions de service, du nombre et de la taille des purgeurs, ainsi que de l'âge et de l'état du système et des purgeurs, mais aussi de l'existence d'une maintenance planifiée. Les coûts-avantages de la mise en place d'inspections majeures et de programmes de remplacement doivent être évalués en fonction de ces facteurs. (Certains sites ne comportent que 50 purgeurs ou moins, tous faciles d'accès, tandis que d'autres sites en comptent 10 000).

Selon certaines sources, les équipements dotés de gros purgeurs de vapeur (par exemple avec un débit vapeur d'environ une tonne à l'heure ou supérieur), notamment ceux fonctionnant à haute pression, sont vérifiés annuellement, tandis que la vérification des purgeurs moins critiques est effectuée d'après un programme de rotation à raison de 25 % de purgeurs chaque année (c'est-à-dire chaque purgeur est vérifié au moins une fois tous les quatre ans). Ceci est comparable aux programmes LDAR (détection et réparation des fuites) que de nombreux gouvernements ont rendu obligatoires dans de telles installations). Dans un exemple, dans lequel la maintenance des purgeurs était sporadique, jusqu'à 20 % des purgeurs étaient défectueux. Avec un suivi annuel, les fuites peuvent être réduites à 4 à 5 % des purgeurs. Si tous les purgeurs étaient vérifiés annuellement, il y aurait une lente diminution à environ 3 % au bout de 5 ans (les anciens purgeurs étant remplacés par des modèles plus récents).

Dans tous les cas, lors de la vérification des purgeurs de vapeur, une bonne pratique consiste à vérifier également les vannes de dérivation. Ces dernières sont parfois ouvertes pour éviter une surpression dans les canalisations et une détérioration (notamment dans les canalisations traceurs), si le purgeur de vapeur n'est pas à même d'évacuer la totalité du condensat, ainsi que pour des raisons opérationnelles. Il est généralement plus efficace de rectifier le problème d'origine, d'effectuer des réparations correctes, etc. (ce qui peut entraîner une dépense de capital) que de fonctionner avec un rendement énergétique médiocre dans le système.

Un mécanisme de contrôle automatisé peut être installé sur chaque type de purgeur de vapeur. Les contrôles automatiques des purgeurs de vapeur s'appliquent plus particulièrement aux :

- purgeurs ayant des pressions de service élevées, car toute fuite se traduit rapidement par des pertes d'énergie élevées ;

- purgeurs dont le fonctionnement est critique pour les opérations et dont le blocage se traduit par des dégâts ou par une perte de production.

Aspects économiques
Les coûts d'un remplacement sont, en règle générale, bien inférieurs aux pertes résultant d'un fonctionnement défectueux. Retour sur investissement rapide, en fonction de la taille de la fuite. Voir l'exemple ci-dessus.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Coût
- Amélioration de l'efficacité du système vapeur.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [16, CIPEC, 2002]

3.2.13 Collecte et retour du condensat à la chaudière pour réemploi

Description
Lorsque de la chaleur est appliquée à un procédé par le biais d'un échangeur de chaleur, la vapeur restitue de l'énergie sous forme de chaleur latente comme elle se condense en eau chaude. Cette eau est perdue, ou (habituellement) recueillie et renvoyée à la chaudière. Le réemploi du condensat a quatre objectifs :

- réemployer l'énergie contenue dans le condensat chaud ;
- réaliser des économies sur le coût de l'eau d'appoint (à l'état brut)
- réaliser des économies sur le coût du traitement de l'eau de la chaudière (le condensat est en principe traité)
- économie sur les coûts du rejet des eaux résiduaires (si applicable).

Le condensat est recueilli à la pression atmosphérique et à des pressions négatives. Il peut provenir d'utilisations de la vapeur dans des appareils fonctionnant à une pression beaucoup plus élevée.

Avantages obtenus pour l'environnement
Lorsque ce condensat est renvoyé à la pression atmosphérique, il y a création spontanée d'une vapeur de détente, qui peut également être récupérée (voir section 3.2.14).

Le réemploi du condensat se traduit également par une réduction de la consommation de produits chimiques pour le traitement de l'eau. La quantité d'eau utilisée et rejetée est également réduite.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Une désaération est nécessaire dans le cas de systèmes à pression négative.

Applicabilité
Cette technique n'est pas applicable dans les cas où le condensat récupéré est pollué ou si le condensat n'est pas récupérable parce que la vapeur a été injectée dans un procédé.

Eu égard aux nouvelles conceptions, une bonne pratique consiste à séparer les condensats en flux potentiellement pollué et en flux propre. Les condensats propres sont ceux provenant de sources qui, en principe, ne seront jamais polluées (par exemple provenant de surchauffeurs lorsque la pression vapeur est supérieure à la pression du procédé, de sorte que dans le cas de fuites de tube, la vapeur passe dans le procédé alors que les composants du procédé ne passent pas du côté vapeur). Les condensats potentiellement pollués sont des condensats susceptibles d'être pollués en cas d'incident (par exemple rupture d'un tube sur les surchauffeurs où la pression côté procédé est supérieure à la pression côté vapeur). Les condensats propres peuvent être récupérés sans aucune autre précaution. Les condensats potentiellement pollués peuvent être récupérés sauf en cas de pollution effective (par exemple fuite provenant d'un surchauffeur) qui est détectée par une surveillance en ligne, par exemple par un analyseur de carbone organique total.

Aspects économiques
La récupération du condensat offre des avantages importants et doit être envisagée dans tous les cas applicables (voir Applicabilité, ci-dessus), sauf si la quantité de condensat est faible (par exemple si la vapeur est ajoutée au procédé).

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
Appliquée en règle générale.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [16, CIPEC, 2002]

3.2.14 Réemploi de la vapeur de détente

Description
La vapeur de détente est formée lorsque le condensat à pression élevée est détendu. Lorsque le condensat est à une pression plus faible, une partie du condensat se vaporise de nouveau et forme la vapeur de détente. La vapeur de détente contient à la fois l'eau purifiée et une grande partie d'énergie disponible, qui est toujours présente dans le condensat.

La récupération de l'énergie peut être obtenue par un échange de chaleur avec l'eau d'appoint. Si l'eau de purge est préalablement ramenée à une pression plus faible dans un réservoir de détente, alors la vapeur se forme à une pression plus faible. Cette vapeur de détente peut être acheminée directement au dégazeur et peut donc être mélangée avec l'eau douce d'appoint. La vapeur de détente ne contient aucun sel dissous et la vapeur représente une grande partie de l'énergie dans l'extraction.

La vapeur de détente, occupe, toutefois, un volume beaucoup plus important que le condensat. Les canalisations de retour doivent être à même de faire face à cette situation sans

augmentation de pression. Sinon, la contre-pression obtenue risque d'entraver le bon fonctionnement des purgeurs de vapeur et des autres composants en amont.

Dans la chaufferie, la vapeur de détente à l'instar du condensat peut être utilisée pour chauffer l'eau douce d'alimentation dans le dégazeur. Il existe d'autres possibilités, notamment l'utilisation de la vapeur de détente pour chauffer l'air.

À l'extérieur de la chaufferie, la vapeur de détente peut-être utilisée pour chauffer des composants jusqu'à une température inférieure à 100 °C. En pratique, il existe des utilisations de la vapeur à la pression de 1 bar g. La vapeur de détente peut donc être injectée dans les canalisations correspondantes. Elle peut également être utilisée pour préchauffer l'air, etc.

Les demandes en vapeur des procédés basse pression sont habituellement satisfaites grâce à une réduction de pression de la vapeur haute pression, mais une partie des demandes du procédé peut être satisfaite à faible coût par détente du condensat haute pression. La détente est un moyen particulièrement séduisant lorsque le retour du condensat haute pression à la chaudière n'est pas économiquement viable.

Avantages obtenus pour l'environnement
Les avantages sont fonctions de chaque cas.

À une pression de 1 bar, le condensat a une température de 100 °C et une enthalpie de 419 kJ/kg. Si la vapeur de détente ou la vapeur post évaporation est récupérée, alors le contenu énergétique total dépend de la charge de travail de l'installation. Le Tableau 3.16 présente la composante énergétique qui s'échappe des systèmes vapeur par le condensat ainsi que les fractions d'énergie relatives dans le condensat et dans la vapeur de détente. À haute pression, la vapeur de détente contient la plus grande partie de l'énergie.

Pression absolue (bar)	**Dans le condensat à pression atmosphérique (%)**	**Dans le condensat + vapeur post-évaporation à la pression de la chaudière (%)**	**Fraction d'énergie pouvant être récupérée dans la vapeur de détente (%)**
1	13,6	13,6	0,0
2	13,4	16,7	19,9
3	13,3	18,7	28,9
5	13,2	21,5	38,6
8	13,1	24,3	46,2
10	13,0	25,8	49,4
15	13,0	28,7	54,7
20	12,9	30,9	58,2
25	12,9	32,8	60,6
40	12,9	37,4	65,4
Remarque : L'eau d'alimentation de l'installation a souvent une température moyenne annuelle d'approximativement 15 °C. Ces chiffres ont été calculés à partir d'une situation dans laquelle l'alimentation en eau de l'installation se fait à 15 °C, ou avec une enthalpie de 63 kJ/kg			

Tableau 3.16 : Pourcentage d'énergie totale présente dans le condensat à pression atmosphérique et vapeur de détente
[29, Maes, 2005]

Effets croisés
Si la vapeur de détente est produite à partir d'un condensat pressurisé, la température (et le contenu en énergie) du condensat renvoyé à la chaudière est abaissée. L'installation d'un économiseur présente l'avantage potentiel de permettre à ce dernier de récupérer ensuite davantage d'énergie à partir de la cheminée d'échappement, au bénéfice du flux d'eau d'alimentation/retour, et le rendement de la chaudière s'en trouve amélioré. Il s'agit là de la combinaison la plus rentable au plan de l'énergie. Toutefois, il doit exister un usage pour la vapeur basse pression (BP) provenant de la détente, en tenant compte du fait que la vapeur basse pression (toutes sources confondues) ne peut être transportée que sur de faibles distances. Dans de nombreux cas (comme dans les raffineries et dans les usines chimiques) il existe un surplus de vapeur basse pression, et il n'y a souvent aucun emploi pour la vapeur issu de la détente. Dans de tels cas, la meilleure option consiste à renvoyer le condensat au désaérateur, car la vapeur de détente renvoyée à l'atmosphère est un gaspillage d'énergie. Pour éviter des problèmes de condensat, le condensat doit être collecté localement, dans une unité ou une activité spécifique et renvoyé par pompage au désaérateur.

L'installation de l'une ou l'autre de ces options dépend des coûts-avantages liés à l'installation des canalisations et autres équipements nécessaires (voir Section 1.1.6).

Données opérationnelles
Le réemploi de la vapeur de détente est possible dans de nombreux cas, souvent pour un chauffage jusqu'à une température inférieure à 100 °C. Il existe un certain nombre de possibilités.

Collecte de la vapeur de détente dans les tuyauteries de condensat. Au cours de la vie d'une installation, divers composants peuvent être ajoutés dans les mêmes canalisations et la canalisation de retour du condensat peut devenir trop petite pour la quantité de condensats à récupérer. Dans la plupart des cas, ce condensat est récupéré à pression atmosphérique, c'est pourquoi la majeure partie de la canalisation est remplie avec de la vapeur de détente. S'il y a une augmentation de l'évacuation du condensat, la pression dans ces canalisations peut s'élever au-delà de 1 bar g. Il peut en résulter des problèmes en amont, qui risquent d'entraver le fonctionnement correct des purgeurs de vapeur, etc.

La vapeur de détente peut être évacuée vers un réservoir de détente installé en un point approprié sur la canalisation de retour. La vapeur de détente peut ensuite être utilisée pour un préchauffage ou un chauffage local à une température inférieure à 100 °C. Simultanément, la pression dans la canalisation de retour du condensat est ramenée à la normale, ce qui évite une modernisation du réseau de canalisation retour du condensat.

Lors de la révision d'un réseau existant, il y a lieu d'envisager l'option consistant à renvoyer le condensat à une pression inférieure. Ceci a pour effet de générer davantage de vapeur de détente et d'abaisser la température en dessous de 100 °C.

En cas d'utilisation de la vapeur, par exemple pour un chauffage à une température inférieure à 100 °C, il est possible que la pression réelle dans le serpentin de chauffage, après ajustement, passe en dessous de 1 bar. Le condensat risque alors d'être aspiré dans le serpentin et de l'inonder. Ce risque peut être évité en récupérant le condensat à basse pression. La basse pression génère davantage de vapeur de détente et on récupère davantage d'énergie à partir du condensat. Les composants fonctionnant à ces températures inférieures peuvent être commutés sur un réseau séparé. Toutefois, il est nécessaire d'installer des pompes

supplémentaires pour maintenir cette basse pression et pour éliminer tout appel d'air dans les canalisations à partir de l'extérieur.

Applicabilité
Cette technique s'applique lorsque le site comporte un réseau vapeur avec des pressions inférieures à la pression de production de la vapeur. Ensuite, le réemploi de la vapeur de détente peut être plus favorable au plan exergétique qu'un simple échange de chaleur au niveau de la purge par le biais d'un échangeur de chaleur.

En théorie, tout emploi d'énergie à une température inférieure peut constituer une possibilité d'utilisation de la vapeur de détente à la place de vapeur « nouvellement produite » et il existe un éventail d'opportunités qui font l'objet de recherches, bien que leur mise en œuvre ne soit pas toujours facile. Cette technique est largement applicable à l'industrie pétrochimique.

Aspects économiques
La récupération de la vapeur de détente permet d'économiser l'eau douce d'appoint et son traitement, bien que les principales économies de coûts se situent au plan énergétique. La récupération de la vapeur de détente conduit à des économies d'énergie beaucoup plus importantes que la seule collecte de condensat liquide.

Voir la rubrique Exemples de l'annexe 7.10.1.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Économies de coûts
- Utilisation de vapeur basse pression.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005, 123, US_DOE]

3.2.15 Récupération de l'énergie à partir des purges de la chaudière

Description
Il est possible de récupérer de l'énergie à partir des purges des chaudières en utilisant un échangeur de chaleur pour préchauffer l'eau d'appoint de la chaudière. Toute chaudière dont le soutirage de purge est systématiquement supérieur à 4 % du débit vapeur est une bonne candidate à la mise en place d'une récupération de la chaleur perdue lors de la purge. Des économies d'énergie plus importantes sont obtenues avec des chaudières haute pression.

En variante, la détente de la purge à moyenne ou basse pression est une autre manière de valoriser l'énergie disponible (voir section 3.2.14).

Avantages obtenus pour l'environnement
Le Tableau 3.17 présente les gains potentiels en énergie issus de la valorisation de la chaleur émanant des purges :

Énergie récupérée à partir des purges, en MJ/h [5]					
Taux de purge en % de la sortie chaudière	Pression de service de la chaudière				
	2 bar g	5 bar g	10 bar g	20 bar g	50 bar g
1 %	42	52	61	74	95
2 %	84	103	123	147	190
4 %	168	207	246	294	379
6 %	252	310	368	442	569
8 %	337	413	491	589	758
10 %	421	516	614	736	948

Tableau 3.17 : Énergie récupérée dans les pertes dues aux purges [29, Maes, 2005]

Une réduction de la température des purges permet de se conformer plus facilement aux règlementations environnementales qui exigent que les eaux résiduaires soient rejetées en dessous d'une certaine température.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
Voir les exemples de l'Annexe 7.10.1.

Applicabilité
Voir la rubrique Aspects économiques, ci-dessous.

Aspects économiques
Cette technique se traduit habituellement par une récupération des coûts en l'espace de quelques années.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coût.

Exemples
Voir les exemples de l'Annexe 7.10.1.

Références bibliographiques
[29, Maes, 2005], [16, CIPEC, 2002] [123, US_DOE] CEN EN 12952-15:2003 and CEN EN 12953-11:2003

3.3 Récupération de chaleur et refroidissement

[16, CIPEC, 2002, 26, Neisecke, 2003, 34, ADENE, 2005, 97, Kreith, 1997]

La chaleur s'écoule naturellement de la température la plus élevée (source de chaleur) vers une température inférieure (puits de chaleur) (voir Section 1.2.2.2, deuxième loi de la thermodynamique). Les flux de chaleur provenant d'une activité, d'un procédé ou d'un

[5] Ces quantités ont été déterminées pour une sortie chaudière de 10 t/h, une température moyenne de l'eau d'alimentation de la chaudière de 20 °C, et un rendement de 88 % pour la récupération de la chaleur à partir des purges.

système peuvent être classés, par analogie à d'autres émissions dans l'environnement, en deux types :

1 Sources fugitives, par exemple rayonnement par les ouvertures des fours, zones chaudes avec une isolation médiocre ou sans isolation, dissipation de la chaleur émanant des paliers.
2. Flux spécifiques, par exemple :
   - gaz de combustion chauds,
   - échappement d'air,
   - fluides de refroidissement provenant des systèmes de refroidissement (par exemple gaz, eau de refroidissement, fluide thermique),
   - produit chaud ou froid ou produit de résidus,
   - eau chaude ou froide évacuée vers un égout,
   - chaleur de surchauffe et du condenseur rejetée à partir de la réfrigération.

Ces pertes de chaleur ou pertes thermiques sont souvent dénommées « chaleur perdue » même si en toute rigueur on devrait dire « excès de chaleur » ou « surplus de chaleur », car la chaleur peut être récupérée à partir des flux de chaleur spécifique pour un usage dans un autre procédé ou système. Pour faciliter la tâche du lecteur, les termes « chaleur perdue/surplus de chaleur » sont utilisés dans la présente section.

Il existe deux niveaux d'exergie de flux de chaleur (« qualité » de chaleur ; voir Section 1.2.2.2) :

1. La chaleur provenant des flux chauds sous forme de gaz de combustion chauds.
2. La chaleur provenant de flux relativement froids (par exemple <80 °C). Ces derniers sont plus difficiles à valoriser et l'exergie de la chaleur doit être augmentée.

Dans les cas simples, la récupération de chaleur peut être traitée directement, à l'aide des techniques décrites dans la présente section. Dans les installations plus complexes, avec plusieurs sources de chaleur et/ou puits de chaleur, il vaut mieux étudier la récupération de chaleur au niveau du site ou du procédé, par exemple en utilisant des outils tels que la méthodologie du pincement, et en appliquant un échange de chaleur de procédé à procédé ou une intégration du procédé, (voir Sections 2.3, 2.4 et 2.12).

Technologies de récupération de la chaleur
Les techniques de récupération de chaleur les plus couramment utilisées sont les suivantes :

- usage direct : des échangeurs de chaleur utilisent la chaleur telle qu'elle est dans le flux de surplus de chaleur (par exemple gaz de combustion chauds, voir Section 3.2.5)
- des pompes à chaleur améliorent la qualité de la chaleur dans des flux relativement froids de manière à lui permettre de fournir un travail plus utile que celui pouvant être obtenu à sa température actuelle (c'est-à-dire une entrée d'énergie de qualité élevée élève la qualité énergétique de la chaleur perdue/du surplus de chaleur)
- des opérations multi-étages comme une évaporation multi-effet, une détente de vapeur et des combinaisons des approches déjà mentionnées (voir Section 3.11.3.6).

Avant de rechercher les possibilités de récupération de chaleur, il est important d'optimiser les procédés concernés. Une optimisation après avoir introduit la récupération de chaleur peut

avoir une incidence négative sur la récupération de chaleur, le système de récupération peut s'avérer surdimensionné et le rapport coût-avantage en sera affecté négativement.

En conséquence, il est capital d'évaluer la qualité et la quantité de la chaleur perdue/du surplus de chaleur, puis d'identifier les usages possibles. La récupération de chaleur est souvent limitée par la qualité de la chaleur perdue et les possibilités d'utilisation de celle-ci.

Il est capital d'avoir des informations pertinentes, quantifiées et une bonne connaissance des procédés d'où émane la chaleur et dans lesquels il faudra incorporer la récupération de chaleur. La raison première des difficultés et des échecs de la récupération de chaleur est un défaut de compréhension. Des erreurs et des omissions sont susceptibles d'avoir un effet plus grave que, par exemple, un mauvais choix du type d'échangeur de chaleur. En dehors des erreurs thermodynamiques, les propriétés physiques d'une source de chaleur perdue peuvent conduire à des problèmes, quel que soit l'échangeur choisi au départ, si l'étude n'a pas été menée à fond.

Une compréhension approfondie du fonctionnement du procédé, liée à une bonne connaissance des possibilités de modification des paramètres de fonctionnement, est indispensable à l'intégration réussie de la récupération de chaleur dans un procédé. Des mesures détaillées et un enregistrement des données d'exploitation fournissent un excellent point de départ en vue de sa planification. Ceci aide aussi l'ingénieur procédé à identifier les économies réalisables grâce à des mesures de faible coût.

Les options sont les suivantes :

- utilisation de la chaleur du procédé à partir de son origine (c'est-à-dire recirculation, souvent au moyen d'échangeurs de chaleur, par exemple d'économiseurs, voir Section 3.2.5) ;
- utilisation de la chaleur à l'intérieur d'un autre système ou d'une autre unité (cette option peut s'imposer car la chaleur perdue n'est pas à une température suffisamment élevée). Elle est de deux types :
  - à l'intérieur de l'installation, dans une autre unité ou dans un autre procédé
  - dans une autre installation (comme dans des complexes chimiques intégrés), ou dans une communauté plus large, comme pour le chauffage urbain ; voir Cogénération, Section 3.4.

Si la chaleur perdue n'a pas une exergie suffisamment élevée, cette dernière peut être augmentée grâce à des pompes à chaleur, ou encore il est possible de trouver un usage pour une faible énergie, par exemple pour fournir de l'eau chaude ou un chauffage de locaux dans le cadre d'un CVC.

La présente section, en conséquence, étudie le refroidissement (comme une opportunité intéressante de récupération de chaleur) et les deux principales techniques mentionnées : les échangeurs de chaleur et pompes à chaleur.

3.3.1 Échangeurs de chaleur

Description
La récupération de chaleur directe est réalisée par des échangeurs de chaleur. Un échangeur de chaleur est un dispositif dans lequel l'énergie est transférée d'un fluide ou d'un gaz dans un autre à travers une surface solide. Les échangeurs de chaleur s'utilisent pour réchauffer ou refroidir des procédés ou des systèmes. Le transfert de chaleur se produit à la fois par convection et par conduction.

La chaleur est rejetée à des températures relativement basses, de l'ordre de 70 ºC, mais pouvant atteindre 500 ºC, dans de nombreux secteurs industriels comme :

- l'industrie chimique incluant les polymères,
- l'industrie alimentaire et des boissons,
- l'industrie du papier et du carton,
- l'industrie des textiles et des tissus.

Dans cette plage de températures, il est possible d'utiliser les équipements de récupération de chaleur ci-après (les échangeurs de chaleur), en fonction du type de fluides impliqués (c'est-à-dire gaz-gaz, gaz-liquide, liquide-liquide) et de l'application spécifique :

- régénérateur rotatif (roue adiabatique),
- bobine,
- échangeur de chaleur à caloduc /thermosiphon,
- récupérateur tubulaire,
- économiseur,
- économiseur à condensation,
- condenseur à pulvérisation (échangeur de chaleur à fluide),
- échangeur thermique à calandre et à tube,
- échangeur de chaleur à plaques,
- échangeur de chaleur à plaque et calandre.

À des températures plus élevées (supérieures à 400 ºC), dans les industries de traitement telles que l'industrie du fer, la sidérurgie, l'industrie du cuivre, de l'aluminium, du verre et des céramiques, les méthodes ci-après sont disponibles afin de récupérer la chaleur perdue émanant des gaz :

- échangeurs à plaques,
- échangeurs thermiques à calandre et à tube,
- tubes radiants avec récupérateurs,
- tubes à convection avec récupérateurs,
- systèmes équipés de brûleur à récupération et brûleurs auto-récupérateurs,
- régénérateurs statiques,
- régénérateurs rotatifs,
- régénérateurs céramiques compacts,
- brûleurs régénératifs à impulsion de flamme,
- brûleurs récupérateurs à plaques radiales,

- brûleurs régénératifs à lit intégral. Les lits fluidisés sont utilisés dans des conditions de fonctionnement extrême, d'encrassement, par ex. dans les usines de papier et pâte à papier.
- four à optimisation d'énergie.

Les échangeurs de chaleur dynamique ou à surface raclée sont utilisés principalement pour le chauffage et le refroidissement des produits à viscosité élevée, des procédés de cristallisation, pour l'évaporation et les applications à fort encrassement.

L'une des utilisations les plus répandues des échangeurs de chaleur est la climatisation, voir Section 3.9. Ces systèmes utilisent des bobines (en référence à leur faisceau de tube interne en forme de serpentin).

Rendement
Les échangeurs de chaleur sont conçus pour des applications spécifiques optimisées au plan de l'énergie. Leur fonctionnement dans des conditions d'exploitation différentes ou variables n'est possible que dans certaines limites. Il va se traduire par des modifications de l'énergie transférée, du coefficient de transfert de chaleur (valeur U) et de la perte de charge du milieu.

Le coefficient de transfert de chaleur et par conséquent la puissance transférée sont influencés par la conductivité thermique ainsi que par la condition de la surface et l'épaisseur du matériau de transfert de chaleur. Une conception mécanique appropriée et un choix de matériaux adéquat peuvent accroître le rendement de l'échangeur de chaleur. Les coûts et les contraintes mécaniques jouent également un rôle majeur dans le choix du matériau et de la conception.

La puissance transférée par le biais d'un échangeur de chaleur dépend fortement de la surface de l'échangeur de chaleur. La zone constituant la surface de l'échangeur de chaleur peut être agrandie à l'aide de nervures (par exemple échangeurs de chaleur à tube nervuré, échangeurs de chaleur à lamelles). Ceci s'avère particulièrement utile lorsque les coefficients de transfert de chaleur sont faibles (par exemple échangeurs de chaleur à gaz).

L'accumulation de salissures à la surface de l'échangeur de chaleur va diminuer le transfert de chaleur. Les niveaux de salissures peuvent être réduits en utilisant des matériaux appropriés (des surfaces très lisses), des formes structurées (par exemple échangeurs de chaleur en spirale) ou en modifiant les conditions de service (par exemple vitesses élevées des fluides). En outre, les échangeurs de chaleur peuvent être nettoyés ou équipés de systèmes de nettoyage automatique (surface raclée ou dynamique).

Des débits élevés augmentent le coefficient de transfert de chaleur. Toutefois, des débits élevés se traduisent également par des pertes de charge plus élevées. Des niveaux élevés de turbulence des flux améliorent le transfert de chaleur mais se traduisent par une augmentation des pertes de charge. Une turbulence peut être générée en utilisant des plaques estampées sur les échangeurs de chaleur ou en les équipant de déflecteurs.

La puissance transférée dépend également de l'état physique du fluide (par exemple de la température et de la pression). Si l'air est le fluide premier, il peut être humidifié avant de pénétrer dans l'échangeur de chaleur, afin d'améliorer le transfert de chaleur.

Avantages obtenus pour l'environnement

Des économies d'énergies sont réalisées en utilisant des flux d'énergie secondaire.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
Les systèmes de récupération de chaleur sont d'un usage très répandu et offrent de bons résultats dans de nombreux secteurs et systèmes industriels, voir Description, ci-dessus. Voir aussi Section 3.2.

La récupération de chaleur est appliquée à un nombre croissant de cas, et bon nombre d'entre eux se trouvent à l'extérieur de l'installation, voir Cogénération, Section 3.4, et Annexes 7.10.3 et 7.10.4. La récupération de chaleur ne trouve pas d'application s'il n'existe aucune demande correspondant à la courbe de production.

Aspects économiques
La durée de retour sur investissement peut être courte, de l'ordre de six mois ou longue, de l'ordre de 50 ans ou plus. Dans l'industrie papetière autrichienne, la période de retour sur investissement de systèmes complexes et différents était de une à environ trois années.

Les coûts-avantages et les périodes de retour sur investissement (amortissement) peuvent être calculés, par exemple comme indiqué dans le REF ECM (document de référence sur les aspects économiques et effets croisés).

Dans certains cas, notamment lorsque la chaleur est utilisée à l'extérieur de l'installation, il peut être possible de faire appel à un financement prévu par des initiatives d'ordre politique, voir Annexe 7.13.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Réduction des coûts d'énergie, réduction des émissions et retours rapides sur investissements fréquents
- Amélioration du fonctionnement du procédé, par exemple réduction de la contamination des surfaces (dans les systèmes à surface raclée), amélioration des équipements/flux existants, réduction des pertes de charge du système (qui augmente le rendement potentiel maximum de l'usine)
- Économies en matière de charges d'effluent.

Exemples
- Industries citées dans la Description, ci-dessus : industrie chimique, industrie alimentaire et des boissons, industrie du papier et du carton, industrie des textiles et des tissus
- Industrie papetière autrichienne
- Tait Paper à Inverure, Aberdeenshire, Royaume-Uni.

Références bibliographiques
[16, CIPEC, 2002], [26, Neisecke, 2003], [34, ADENE, 2005] [97, Kreith, 1997] [127, TWG]

3.3.1.1 Surveillance et maintenance des échangeurs de chaleur

Description
La surveillance de l'état des tubes des échangeurs de chaleur peut être réalisée par une inspection avec les courants de Foucault. Elle est souvent simulée avec la CFD (Mécanique des Fluides Numérique). Il est également possible d'utiliser la photographie infrarouge (voir Section 2.10.1) sur l'extérieur des échangeurs de chaleur, pour révéler des fluctuations significatives de la température ou des points chauds.

L'encrassement peut constituer un problème grave. Les eaux de refroidissement que l'on utilise proviennent souvent des rivières, des estuaires ou d'un lac, et des débris biologiques peuvent pénétrer et s'amalgamer. Les dépôts de tartre, à savoir des couches de dépôts chimiques, tels que le carbonate de calcium ou le carbonate de magnésium (voir Section 3.2.6) constituent un autre problème. Le refroidissement du procédé peut également entraîner la formation d'un dépôt, notamment d'un dépôt de silice dans les raffineries d'alumine. Voir Exemples, ci-dessous).

Avantages obtenus pour l'environnement
Amélioration de l'échange de chaleur pour la récupération de chaleur.

Effets croisés
Utilisation de produits chimiques pour éliminer les dépôts de tartre.

Données opérationnelles
- Les échangeurs de chaleur à plaques doivent être nettoyés périodiquement, en étant désassemblés, nettoyés puis ré-assemblés.
- Les échangeurs de chaleur à faisceau tubulaire peuvent être nettoyés par un nettoyage à l'acide, un nettoyage à balles ou hydroforage (ces deux dernières techniques étant des techniques propriétaires).
- Le fonctionnement et la technique mise en œuvre dans les systèmes de refroidissement sont traités dans le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels).

Applicabilité
- Applicable à tous les échanges de chaleur.
- Des techniques spécifiques sont retenues au cas par cas.

Aspects économiques
L'entretien des échangeurs de chaleur pour qu'ils conservent leurs spécifications de conception optimise le retour sur investissement.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Maintien de la capacité de production.

Exemples
Nettoyage à l'acide : Eurallumina, Portovecompany, Italie. Voir Annexe 7.10.2

Références bibliographiques
Infrarouge : [162, SEI, 2006]

3.3.2 Pompes à chaleur (y compris recompression mécanique de la vapeur (MVR)

Description

L'objectif principal des pompes à chaleur est de transformer l'énergie à partir d'un niveau de température inférieure (faible exergie) vers un niveau supérieur. Les pompes à chaleur peuvent transférer de la chaleur (et non pas générer de la chaleur) à partir de sources de chaleur fabriquées par l'homme telles que les procédés industriels, ou à partir de sources de chaleur naturelles ou artificielles se trouvant dans l'environnement, comme l'air, le sol ou l'eau, à des fins d'applications domestiques, commerciales ou industrielles. Toutefois, l'utilisation la plus courante des pompes à chaleur se rencontre dans les systèmes de refroidissement, les réfrigérateurs, etc. La chaleur est ensuite transférée dans le sens opposé, à partir de l'application qui est refroidie, vers l'environnement. Quelques fois, la chaleur excédentaire émanant du refroidissement sert à répondre à une demande de chaleur simultanée ailleurs. Les pompes à chaleur s'utilisent en cogénération et en trigénération; il s'agit de systèmes qui fournissent simultanément un refroidissement et un chauffage, et ce en fonction de la fluctuation saisonnière de la demande (voir Sections 3.4 et 3.4.2).
Afin de transporter la chaleur depuis une source de chaleur jusqu'à un emplacement où elle est requise, il est nécessaire d'avoir un apport d'énergie externe pour entraîner la pompe à chaleur. L'entraînement peut être d'un type quelconque, comme un moteur électrique, un moteur à combustion, une turbine ou une source de chaleur pour les pompes à chaleur à adsorption.

Pompes à chaleur à compression (cycle fermé)

La pompe à chaleur la plus couramment utilisée est probablement la pompe entraînée par un compresseur. Elle est, par exemple, installée dans les réfrigérateurs, les climatiseurs, les refroidisseurs, les déshumidificateurs, les pompes à chaleur pour le chauffage à l'énergie issue des roches, du sol, de l'eau et de l'air. Elle est normalement entraînée par un moteur électrique mais pour les grandes installations, il est possible d'utiliser des compresseurs entraînés par turbine à vapeur.

Les pompes à chaleur à compression utilisent un processus de Carnot dans le sens contraire au sens des aiguilles d'une montre (processus vapeur froide) ; il est constitué des phases d'évaporation, de compression, de condensation et de détente selon un cycle fermé.

La Figure 3.8 illustre le principe d'une pompe à chaleur à compression. Dans l'évaporateur, le fluide de travail en circulation s'évapore dans des conditions de basse pression et de faible température, par exemple en raison de chaleur perdue. Par la suite, le compresseur augmente la pression et la température. Le fluide de travail est liquéfié dans un condenseur et libère la chaleur utilisable dans ce processus. Le fluide est ensuite forcé à se détendre jusqu'à une basse pression et au fur et à mesure qu'il s'évapore, il absorbe la chaleur provenant de la source de chaleur. Ainsi l'énergie à basse température dans la source de chaleur (par exemple eau résiduaire, gaz de combustion) a été transformée pour avoir un niveau de température plus élevée et pouvoir être utilisée dans un autre procédé ou système.

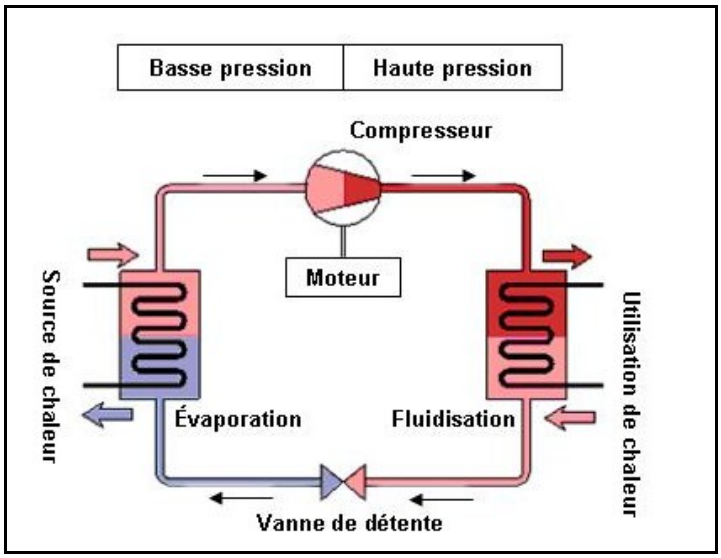


Figure 3.8 : Diagramme d'une pompe à chaleur à compression
[28, Berger, 2005]

Dans une pompe à chaleur à compression, le degré de rendement est indiqué sous forme de coefficient de performance (COP), qui indique le rapport entre la chaleur en sortie et l'énergie en entrée, comme par exemple l'électricité dans le moteur du compresseur. L'énergie nécessaire en entrée est sous la forme d'énergie électrique d'entrée alimentant le moteur du compresseur.

Le COP de la pompe à chaleur à compression peut être exprimé comme suit :

$$COPr = \frac{Qc}{Q_h - Q_c}$$ **Équation 3.6**

$$COPhp = \frac{Qh}{Q_h - Q_c}$$ **Équation 3.7**

où
COP_r et COP_{hp} sont les coefficients de performance pour les systèmes de refroidissement et les pompes à chaleurs et Q_c et Q_h sont les chaleurs échangées avec la source froide et la source chaude.

Le rendement de Carnot peut être considéré comme étant une constante pour des fluctuations modérées de températures.

Les pompes à chaleur à compression peuvent atteindre un COP de 6, ce qui signifie qu'une chaleur en sortie de 6 kWh peut être générée à partir d'une entrée de 1 kWh d'énergie électrique dans le compresseur. Dans les installations d'incinération (W-t-E), le rapport entre la chaleur en sortie et la puissance du compresseur (rapport chaleur/puissance) peut être d'environ 5.
Toutefois, le COP est valide uniquement pour un seul état stable. C'est pourquoi, ce coefficient n'est pas toujours adéquat pour évaluer le rendement d'une pompe à chaleur, étant donné qu'un état stable ne peut pas être représentatif de longues périodes de temps. En

pratique, seul le rendement global saisonnier (SOE) peut décrire correctement le rendement d'une pompe à chaleur. En outre, l'énergie auxiliaire appliquée pour récupérer de l'énergie à partir de la source de chaleur doit être prise en compte lorsque l'on décrit le rendement énergétique des pompes à chaleur.

Pour un bon rendement global saisonnier, les conditions ci-après doivent être respectées :

- bonne qualité de la pompe à chaleur proprement dite,
- température élevée et constante de la source de chaleur (un surplus de chaleur est meilleur que l'air environnant),
- faible température du puits de chaleur (sortie),
- intégration de tous les composants (c'est-à-dire pompe à chaleur, source de chaleur, puits de chaleur, contrôle, distribution de chaleur) dans un seul système optimisé.

Pompes à chaleur à absorption
La pompe à chaleur à absorption n'est pas aussi couramment utilisée, notamment dans les applications industrielles. À l'instar du type à compression, elle a été initialement mise au point pour le refroidissement. Les pompes à chaleur commerciales fonctionnent avec de l'eau en circuit fermé circulant à travers un générateur, un condenseur, un évaporateur et un absorbeur. À la place de la compression, la circulation est maintenue par absorption d'eau dans une solution saline, en principe du bromure de lithium ou de l'ammoniaque, contenue dans l'absorbeur.

La Figure 3.9 illustre le principe d'une pompe à chaleur à absorption : dans une pompe à chaleur à absorption, le fluide de travail gazeux (agent de refroidissement) provenant de l'évaporateur est absorbé par un solvant liquide et de la chaleur est générée dans ce processus. Cette solution enrichie est acheminée jusqu'à l'éjecteur par le biais d'une pompe grâce à une augmentation de la pression, après quoi le fluide de travail (agent de refroidissement) est extrait du mélange de deux substances en utilisant un apport de chaleur externe (par exemple brûleur à gaz naturel, GPL ou chaleur perdue). La combinaison absorbeur / éjecteur a pour effet une augmentation de la pression (compresseur thermique). La substance de travail gazeuse sort de l'éjecteur à une pression plus élevée et pénètre dans le condenseur, ou elle est liquéfiée et restitue de la chaleur utilisable au procédé.

L'énergie en entrée nécessaire pour le fonctionnement d'une pompe à solvant est faible comparée à celle nécessaire au fonctionnement du compresseur d'une pompe à chaleur à compression (l'énergie nécessaire pour pomper un liquide est plus faible que celle nécessaire pour comprimer et transporter un gaz).

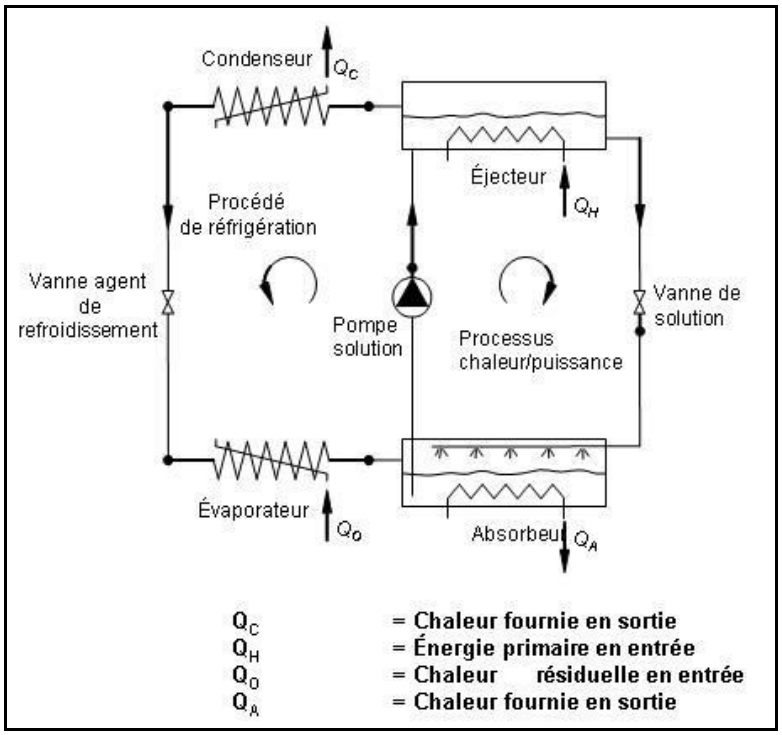


Figure 3.9 : Diagramme d'une pompe à chaleur à absorption
[28, Berger, 2005]

Dans les pompes à absorption, le degré de rendement est indiqué sous forme de coefficient de rendement thermique. Il est défini comme le rapport entre la chaleur en sortie et l'énergie du combustible en entrée. Si l'on utilise de la chaleur perdue comme source de chaleur dans l'éjecteur, le coefficient thermique est utilisé au lieu du rendement thermique. Les pompes à chaleur à absorption moderne peuvent atteindre des coefficients de rendement thermiques allant jusqu'à 1,5. Le rapport entre la chaleur en sortie et la puissance de l'absorbeur est normalement d'environ 1,6. Les systèmes actuels avec une solution d'eau/bromure de lithium comme mélange de substances de travail atteignent une température de sortie de 100 ºC et une élévation de température de 65 ºC. La nouvelle génération de systèmes devrait avoir des températures de sortie plus élevées (pouvant atteindre 260 ºC) et des élévations de températures plus élevées.

Recompression mécanique de la vapeur (MVR)
La MVR est une pompe à chaleur ouverte ou semi-ouverte (si l'on se réfère au système de pompe à chaleur). L'échappement de vapeur basse pression émanant de procédés industriels, comme les chaudières, les évaporateurs ou les systèmes de chauffage, est comprimé puis par la suite condensé pour restituer de la chaleur à une température plus élevée, et remplacer ainsi la vapeur vive ou une autre énergie primaire. L'énergie nécessaire à l'entraînement du compresseur ne représente habituellement que 5 à 10 % de la chaleur restituée. La Figure 3.10 représente un schéma de procédé simplifié d'une installation MVR.

Si la vapeur est propre, elle peut être utilisée directement, mais dans le cas de vapeurs contaminées, un échangeur de chaleur intermédiaire (surchauffeur) est nécessaire. Il s'agit d'un système semi-ouvert.

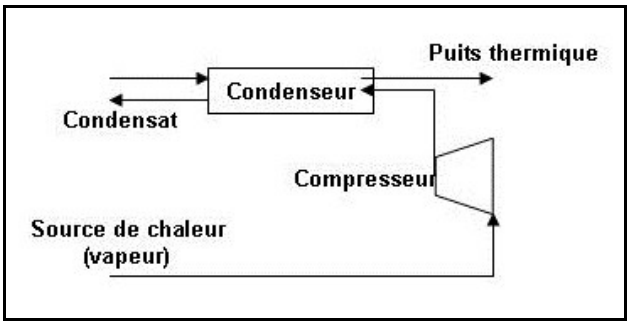


Figure 3.10: Installation MVR simple
[18, Åsbland, 2005]

Dans la recompression mécanique de vapeur, comme un ou deux échangeurs de chaleur sont éliminés (l'évaporateur et/ou le condenseur dans d'autres pompes à chaleur) le rendement est généralement élevé. Le rendement est là encore exprimé sous forme de « coefficient de performance » (COP). Il est défini comme le rapport entre la chaleur fournie et le travail sur l'arbre du compresseur. La Figure 3.11, représente un tracé des valeurs COP types pour les installations MVR en fonction de l'élévation de température. Les valeurs COP normales pour les installations MVR se situent dans la plage de 10 à 30.

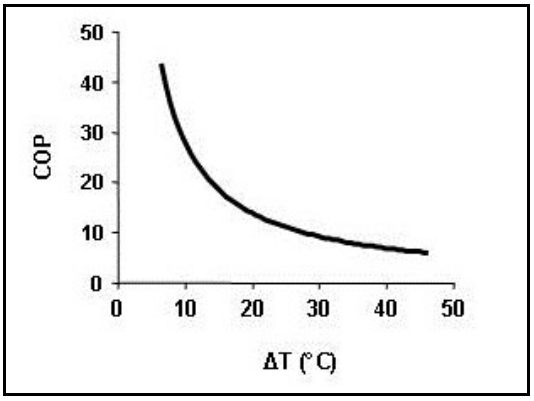


Figure 3.11: COP en fonction de l'élévation de température pour un système MVR type
[18, Åsbland, 2005]

Le COP pour une installation MVR est donné par l'équation 3.8.

$$COP > \frac{\eta_{boiler}}{\eta_{power\ plant}\ \eta_{distribution}}$$ **Équation 3.8**

$$COP > \frac{\eta_{chaudière}}{\eta_{centrale\ électrique}\ \eta_{distribution}}$$ **Équation 3.8**

Dans l'équation 3.8 :

- $\eta_{chaudière}$ est le rendement de la chaudière dans l'usine/industrie

- $\eta_{centrale\ électrique}$ est le rendement de la centrale électrique générant de l'électricité pour le réseau national
- $\eta_{distribution}$ correspond aux pertes de distribution dans le réseau électrique.

Ainsi, le COP doit être plus grand que disons 3 pour être rentable au plan énergie si l'électricité est produite dans une centrale électrique à condensation. En pratique, toutes les installations MVR ont des valeurs COP bien supérieures.

Avantages obtenus pour l'environnement
Les pompes à chaleur permettent de récupérer de la chaleur de faible qualité, avec une consommation d'énergie primaire inférieure à l'énergie en sortie (en fonction du COP, et si les conditions requises pour un bon rendement global saisonnier sont remplies). Il est ainsi possible d'utiliser de la chaleur de faible qualité dans des applications utiles, telles que le chauffage à l'intérieur de l'installation ou dans une communauté voisine. Il s'en suit une réduction de la consommation d'énergie primaire et des émissions de gaz y afférents, comme le dioxyde carbone (CO_2), le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x) dans les applications spécifiques.

Le rendement de tout système de pompe à chaleur dépend fortement de l'élévation de température requise entre celle de la source et du puits.

Effets croisés
Utilisation de réfrigérant avec des impacts sur l'environnement (notamment gaz à effet de serre) qui sont dus à des fuites ou lors de la mise à l'arrêt définitive des pompes à chaleur à compression ou absorption.

Données opérationnelles
Voir descriptions des pompes à chaleur ci-dessus.

Applicabilité
Systèmes à compression : le mélange des fluides de travail qui sont généralement utilisés limitent la température de sortie à 120 °C.

Systèmes à absorption : le mélange des fluides de travail à savoir eau/bromure de lithium, permet d'atteindre une sortie de 100 °C et une élévation de température de 65 °C. Les systèmes de nouvelle génération ont des températures de sortie plus élevées (pouvant atteindre 260 °C) et des élévations de température plus élevées.

Les systèmes MVR actuels fonctionnent avec des températures de sources de chaleur comprises entre 70 et 80 °C et une chaleur restituée de 110 à 150 °C, et dans certains cas pouvant atteindre 200 °C. La vapeur comprimée la plus courante est la vapeur d'eau bien que d'autres vapeurs process soient également utilisées notamment dans l'industrie pétrochimique.

La situation dans une industrie ayant une production combinée de chaleur et d'électricité est plus complexe. Par exemple, avec des turbines à contre-pression, il faut également tenir compte de la perte de travail des turbines.

Applicabilité
Les pompes à chaleur sont utilisées dans les équipements et les systèmes de refroidissement (où la chaleur éliminée est souvent dispersée, voir Section 3.9). Toutefois, ceci démontre que les technologies sont robustes et bien au point. La technologie est capable de faire face à un champ d'application beaucoup plus étendu pour la récupération de chaleur.

- chauffage des locaux,
- chauffage et refroidissement des flux des procédés,
- chauffage de l'eau pour lavage, désinfections et nettoyage,
- production de vapeur,
- séchage/déshumidification,
- évaporation,
- distillation,
- concentration (déshydratation).

Elles sont également utilisées dans les systèmes de cogénération et de trigénération.

Les flux de chaleur perdue les plus courants dans l'industrie sont les fluides de refroidissement, les effluents, les condensats, l'humidité et la chaleur des condenseurs provenant des usines de réfrigération. En raison des fluctuations de l'apport en chaleur perdue, il peut être nécessaire d'utiliser de grands réservoirs de stockage (isolés) pour garantir un fonctionnement stable de la pompe à chaleur.

Les pompes à chaleur à adsorption peuvent être appliquées aux systèmes de refroidissement sur les sites où il existe une grande quantité de chaleur perdue.

La plupart des installations MVR correspondent à des opérations unitaires telles que la distillation, l'évaporation et le séchage, mais la production de vapeur à destination d'un réseau de distribution de vapeur est également courante.

Dans l'industrie, il existe relativement peu de pompes à chaleur installées pour la récupération de chaleur ; elles sont habituellement réalisées lors de la planification de nouvelles installations et usines ou lors de rénovation importantes (voir Section 2.3).

Les pompes à chaleur ont un meilleur rapport coût-efficacité lorsque les coûts des combustibles sont élevés. Les systèmes tendent à être plus complexes que les systèmes alimentés en combustible fossile, bien que la technologie soit robuste.

Aspects économiques
Les aspects économiques dépendent fortement de la situation locale. La période d'amortissement dans l'industrie est de 2 ans au mieux. Ceci s'explique d'une part par les faibles coûts de l'énergie, qui relativisent les économies grâce à l'utilisation des pompes à chaleur et d'autre part par les coûts d'investissement élevés mis en jeu.

Les profits réalisables pour une installation MVR, en dehors des prix des combustibles et de l'électricité, sont fonction des coûts de l'installation. Le coût d'installation dans une usine à Nymölla en Suède (voir exemples ci-dessous), s'est élevé à environ 4,5 millions d'euros. L'agence suédoise pour l'énergie a accordé une subvention de presque 1,0 million d'euros. À l'époque de l'installation, les économies annuelles s'élevaient à environ 1,0 millions d'euros par an.

Agents moteurs pour la mise en œuvre

- Économies sur les coûts énergétiques opérationnels
- Une installation pourrait se donner les moyens d'augmenter sa production sans investir dans une nouvelle capacité de chauffe si la capacité de la chaudière existante est un facteur limitatif.

Exemples

- Dåvamyren, Umeå, Suède : pompe à chaleur à compresseur dans une usine d'incinération.
- Renova Göteborg, Suède : pompe à chaleur à absorption.
- Borlänge, Halmstad and Tekniska Verken, Linköping, Suède, usines d'incinération (W-t-E) et brûleurs à biocombustible, Suède : pompes à chaleur MVR.
- Dans l'usine de fabrication de pâte chimique au bisulfite de StoraEnso à Nymölla, Suède, un système de recompression mécanique a été installé en 1999. La source de chaleur est la vapeur issue de la pré-évaporation de la liqueur noire. Cette vapeur contaminée, à 84 ºC, est tout d'abord condensée dans un échangeur de chaleur vapeur/vapeur (surchauffeur) pour produire de la vapeur propre à une température plus faible d'approximativement 5 ºC et à une pression de 0,45 bar g. Le compresseur à deux étages élève la pression jusqu'à environ 1,7 bar g et le flux de vapeur sortant du compresseur, après désurchauffe par une injection d'eau, s'élève à 21 t/h. La vapeur est distribuée dans un système de vapeur basse pression et utilisée pour la pré-évaporation, le chauffage de l'eau d'alimentation, et le chauffage urbain. Le compresseur mécanique est entraîné par une turbine à contre-pression. La puissance à l'arbre est d'environ 2 MW. L'exploitation, après quelques difficultés initiales, s'est avérée être une très bonne expérience. La MVR réduit la consommation de fioul des chaudières d'environ 7000 à 7500 tonnes par an.
- La MVR a été adaptée aux installations à petite échelle, dans lesquelles le compresseur peut fonctionner grâce à un simple moteur électrique.

Références bibliographiques

[21, RVF, 2002], [26, Neisecke, 2003], [28, Berger, 2005] [18, Åsblad, 2005], [114, Caddet Analysis Series No. 28, 2001], [115, Caddet Analysis Series No. 23], [116, IEA Heat Pump Centre]

3.3.3 Refroidisseurs et systèmes de refroidissement

Les refroidisseurs ou systèmes de refroidissement sont largement décrits dans le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels). Ces termes sont réservés aux systèmes servant à extraire de la chaleur perdue d'un fluide, grâce à un échange de chaleur avec de l'eau et/ou de l'air pour ramener la température de ce fluide approximativement à la température ambiante. Certains refroidisseurs utilisent de la glace ou de la neige comme réfrigérants.

Le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels) ne traite qu'une partie des systèmes de réfrigération, et exclut les questions relatives aux réfrigérants tels que l'ammoniac, le CO_2, les gaz F, les CFC et les HCFC[6], etc. En outre, le refroidissement par contact direct et les condenseurs barométriques ne sont pas évalués car on estime qu'ils sont trop spécifiquement liés à un procédé.

[6] Les hydrochlorofluorocarbures sont des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, en plus des chlorofluorocarbures (CFC). Ces deux types de substances sont progressivement bannies et remplacées par d'autres produits, notamment : l'ammoniac, le CO2, les gaz F, etc.

Le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels) couvre les systèmes ou les configurations de refroidissement industriel suivants :

- systèmes de refroidissement à passage unique (avec ou sans tour de refroidissement),
- systèmes de refroidissement à recirculation en circuit ouvert (tours de refroidissement par voie humide),
- systèmes de refroidissement en circuit fermé,
  - systèmes de refroidissement à refroidissement par air,
  - systèmes de refroidissement par voie humide en circuit fermé,
- systèmes de refroidissement combiné (hybride) par voie humide/sèche,
  - tours de refroidissement à circuit ouvert hybride,
  - tours de refroidissement à circuit fermé hybride.

L'éventail des applications pour les systèmes de refroidissement, les techniques et les pratiques opérationnelles est extrêmement large, de même que celui des différentes caractéristiques thermodynamiques de chaque procédé. Toutefois, il ressort en conclusion du BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels) que :

« Tout d'abord, il faut considérer le procédé à refroidir selon une approche MTD primaire. Le refroidissement des procédés industriels peut être considéré comme une gestion thermique et fait partie de la gestion globale de l'énergie dans une installation. Une approche préventive devrait démarrer par le processus industriel nécessitant la dissipation thermique et viser tout d'abord à réduire les besoins en décharge de chaleur. En réalité, la décharge thermique gaspille de l'énergie et n'est pas vraiment la meilleure technique disponible. La réutilisation de la chaleur dans le procédé devrait toujours être la première étape de l'évaluation des besoins en refroidissement.
Deuxièmement, la conception et la construction du système de refroidissement constituent une seconde étape essentielle, notamment pour les nouvelles installations. Ainsi, une fois que le niveau et la quantité de chaleur perdue générée par le procédé sont établis et qu'aucune réduction supplémentaire de la chaleur perdue ne peut être obtenue, une sélection initiale d'un système de refroidissement peut être effectuée à la lumière des exigences du procédé ».

Le Tableau 3.18 extrait du BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels) présente certains exemples de caractéristiques de procédés et leur approche MTD primaire.

Caractéristiques du procédé	**Critères**	**Approche MTD primaire**	**Remarque**	**Référence dans le BREF ICS**
Niveau élevé de chaleur évacuée (> 60°C)	Réduction de la consommation d'eau et de produits chimiques et amélioration de l'efficacité énergétique globale	(Pré-) refroidissement à l'air sec	L'efficacité énergétique et la taille du système de refroidissement sont des facteurs de limitation	Section 1.1/1.3
Niveau moyen de chaleur évacuée (25-60°C)	Amélioration de l'efficacité énergétique globale	Pas évident	Propre au site	Section 1.1/1.3

Niveau de chaleur évacuée faible (< 25°C)	Amélioration de l'efficacité énergétique globale	Refroidissement à l'eau	Sélection du site	Section 1.1/1.3
Niveau et capacité thermique faible et moyenne	Efficacité énergétique globale optimale avec économies d'eau et réduction visible du panache	Système de refroidissement hybride et par voie humide	Le refroidissement sec convient moins en raison de l'espace requis et de la perte d'efficacité énergétique globale	Section 1.4
Refroidissement des substances dangereuses impliquant un risque élevé pour l'environnement	Réduction du risque de fuite	Système de refroidissement indirect	Accepter une hausse dans l'approche	Section 1.4 et Annexe VI

Tableau 3.18 : Exemples de conditions requises pour les procédés et de MTD

Outre les caractéristiques du procédé, le site lui-même peut imposer quelques limites dans ce qui est applicable, notamment à des nouvelles installations, comme présenté dans le Tableau 3.19.

Caractéristiques du site	**Critères**	**Approche MTD primaire**	**Remarque**	**Référence dans le BREF ICS**
Climat	Température de conception requise	Évaluer la variation dans les températures de réservoir sec et de réservoir humide	Avec des températures de réservoir sec élevées, le refroidissement par air sec a généralement une efficacité énergétique plus faible	Section 1.4.3
Espace	Surface sur site réduite	Constructions de type à toiture (Pré-assemblées)	Limites de taille et de poids du système de refroidissement	Section 1.4.2
Disponibilité de l'eau de surface	Disponibilité restreinte	Systèmes à recirculation	Faisable par voie humide, sèche ou hybride	Section 2.3 et 3.3
Sensibilité de la masse d'eau réceptrice aux charges thermiques	Satisfaire la capacité pour traiter la charge thermique	• Optimiser le niveau de réutilisation de la chaleur • Utiliser des systèmes à recirculation • Sélection du site (nouveau système de refroidissement)		Section 1.1 :
Disponibilité restreinte des eaux souterraines	Réduction de l'utilisation des eaux souterraines	Refroidissement à air si aucune autre source d'eau alternative n'est disponible	Accepter la pénalité énergétique	Section 3.3

Zone côtière	Capacité importante > 10 MWth	Systèmes à passage unique	Éviter le mélange de panache thermique local à côté du point d'arrivée, ex. par extraction profonde de l'eau au dessous de la zone de mélange en utilisant la stratification de la température	Section 1.2.1 / Section 3.2 /Annexe XI.3
Besoins propres au site	En cas d'obligation de réduction du panache et de hauteur de tour réduite	Appliquer un système de refroidissement hybride[7]	Accepter la pénalité énergétique	Chapitre 2

Tableau 3.19 : Exemples de caractéristiques de sites et de MTD

L'optimisation d'un système de refroidissement en vue de réduire son impact sur l'environnement est, toutefois, un exercice complexe et non une comparaison mathématique exacte. En d'autres termes, il ne suffit pas de combiner entre elles des techniques choisies dans les tableaux de MTD pour obtenir un système de refroidissement MTD. **La solution MTD finale est une solution propre à chaque site**. Il est toutefois admis, par référence à l'expérience dans l'industrie, que des conclusions puissent être tirées sur les MTD, en termes quantifiés si possible.

Références bibliographiques
[237, Fernández-Ramos, 2007]

3.4 Cogénération

[65, Nuutila, 2005], [97, Kreith, 1997].

La directive 2004/8/CE concernant la promotion de la cogénération, définit la cogénération comme « la production simultanée, dans un seul processus, d'énergie thermique et électrique et/ou mécanique ». La cogénération est également connue sous l'appellation de « production combinée de chaleur et d'électricité » (CHP). Il existe un intérêt considérable pour la cogénération, qui au niveau européen bénéficie du soutien de la Communauté européenne avec l'adoption de la Directive 2003/96/CE sur la taxation de l'énergie, qui instaure un contexte favorable pour la cogénération (CHP). Le Livre vert sur l'efficacité énergétique met en exergue les pertes dues à la production et au transport de l'électricité et propose des moyens pour y remédier comme la récupération de chaleur et la cogénération localisée.

La présente section décrit différentes applications de cogénération ainsi que leur adéquation à des situations différentes. Il en existe maintenant des applications possibles à petite échelle et qui sont de bon rapport coût-efficacité.

[7] Les systèmes de refroidissement hybrides sont des conceptions particulières de tours mécaniques permettant un fonctionnement par voie humide et sèche pour limiter la formation de panaches visibles. Lorsqu'on choisit d'utiliser les systèmes (en particulier dans de petites unités de type cellulaire) en tant que systèmes par voie sèche pendant les périodes où la température ambiante est faible, il est possible d'obtenir une réduction de la consommation d'eau annuelle et de la formation de pananches visibles.

3.4.1 Différents types de cogénération

Description
Les centrales de cogénération sont des centrales de production combinée d'électricité et de chaleur. Le Tableau 3.20 présente différentes technologies de cogénération et leur rapport électricité /chaleur par défaut.

Technologie de cogénération	Rapport puissance par défaut/chaleur par défaut, ºC
Turbines à gaz à cycle combiné avec récupération de chaleur, (turbines à gaz combinées avec des chaudières de récupération de chaleur et l'un des types de turbines à gaz mentionnés ci-dessous)	0,95
Centrales à turbine à vapeur (turbine à vapeur à contrepression)	0,45
Turbine d'extraction à condensation de vapeur (à contrepression, turbines d'extraction à condensation de vapeur non contrôlée et d'extraction à condensation de vapeur)	0,45
Turbine à gaz avec chaudières de récupération de chaleur	0,55
Moteurs à combustion interne (moteurs (à pistons) à quatre temps ou diesel avec utilisation de chaleur)	0,75
Microturbines	
Moteurs stirling	
Piles à combustible (avec utilisation de chaleur)	
Moteurs à vapeur	
Cycles de Rankine Organique	
Autres types	

Tableau 3.20 : Liste des technologies de cogénération et des rapports puissance par défaut/chaleur par défaut
[146, EC, 2004]

La quantité d'électricité produite est comparée à la quantité de chaleur produite et habituellement exprimé sous forme de rapport électricité/chaleur. Ce rapport est inférieur à 1 si la quantité produite est inférieure à la quantité de chaleur produite. Le rapport électricité/chaleur doit être fondé sur des données réelles.

La courbe annuelle de charge par rapport au temps peut être utilisée pour déterminer le choix et le type d'une centrale CHP.

Usines d'incinération (W-t-E)
Pour les usines d'incinération, à la fois le BREF WI (Incinération des déchets) et la directive-cadre WFD[8] contiennent des facteurs et des valeurs d'équivalence pouvant être utilisées :

- Pour le calcul, des coefficients d'efficacité (utilisation) de la récupération d'énergie et/ou des facteurs d'efficacité des centrales
- Si différentes qualités d'énergie doivent être appréhendées sous forme synthétisées, par exemple pour une analyse comparative.

[8] Directive cadre sur les déchets

De cette manière, il est possible d'évaluer et d'appréhender de manière synthétisée divers types d'énergie sous forme de mélange d'énergie en sortie, par exemple de chaleur, vapeur et électricité. C'est pourquoi, ces facteurs de conversion permettent d'effectuer une comparaison entre l'énergie autoproduite et l'énergie générée à l'extérieur des usines d'incinération (W-t-E). Il est supposé que la moyenne européenne globale estimée est de 38 % de rendement de conversion (voir aussi l'Annexe 7.10.3) pour la production d'énergie électrique en externe dans des centrales électriques et de 91 % dans des unités de chauffage externes. Pour l'utilisation de l'énergie, par exemple dans un combustible ou sous forme de vapeur, le taux d'utilisation possible est de 100 %. La comparaison des différentes unités de mesure de l'énergie, c'est-à-dire MWh, MWhe, MWhh peut être pris en compte.

Contre-pression

La centrale électrique de cogénération la plus simple est la centrale électrique dite « à contre-pression », où l'électricité et la chaleur CHP sont générées dans une turbine à vapeur (voir Figure3.12). La capacité électrique des centrales à turbine à vapeur fonctionnant selon un procédé à contre-pression est habituellement de quelques douzaines de mégawatts. Le rapport électricité/chaleur est normalement d'environ 0,3 à 0,5. La capacité électrique des centrales à turbines à gaz est habituellement légèrement plus faible que celle des centrales à turbine à vapeur, mais le rapport électricité/chaleur est souvent proche de 0,5.

La quantité de puissance de contre-pression industrielle dépendra de la consommation de chaleur du procédé et des propriétés de la vapeur haute pression, moyenne pression et de contre-pression. Le facteur déterminant majeur de la production de vapeur à contre-pression est le rapport électricité/chaleur.

Dans une centrale électrique de chauffage urbain, la vapeur est condensée dans les échangeurs de chaleur au dessous de la turbine à vapeur et acheminée aux consommateurs sous forme d'eau chaude. Dans les unités industrielles, la vapeur provenant d'une centrale électrique à contre-pression alimente de nouveau l'usine lorsqu'elle restitue sa chaleur. La contre pression est plus faible dans une centrale électrique de chauffage urbain que dans des unités à contre-pression industrielles. Ceci explique pourquoi le rapport électricité/chaleur dans les centrales électriques à contre-pression industrielles est plus faible que celui des centrales électriques de chauffage urbain.

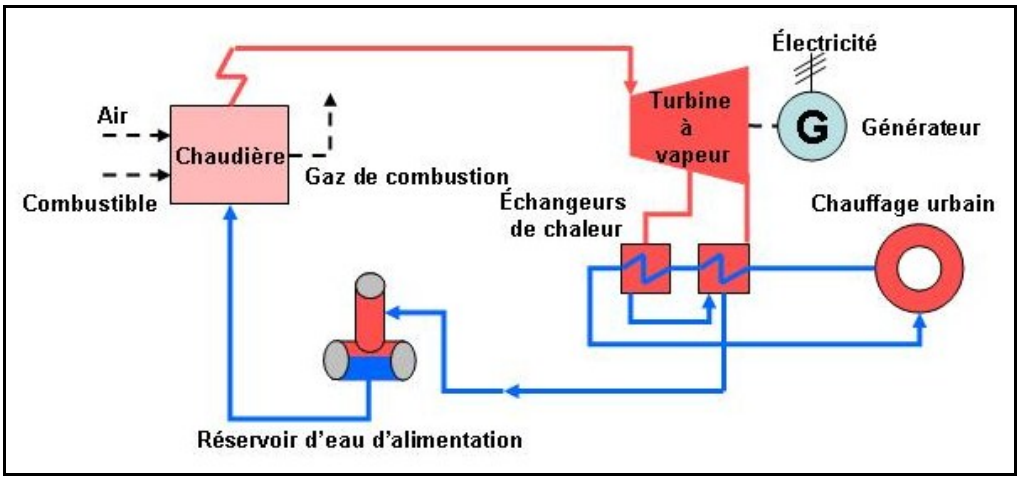


Figure 3.12 : Centrale à contre-pression
[65, Nuutila, 2005]

Extraction à condensation

Une centrale électrique à condensation génère uniquement de l'électricité tandis qu'une centrale électrique d'extraction à condensation permet de soutirer une partie de la vapeur de la turbine afin de générer de la chaleur (voir Figure 3.13). L'apport de vapeur est expliqué dans la section 3.2.

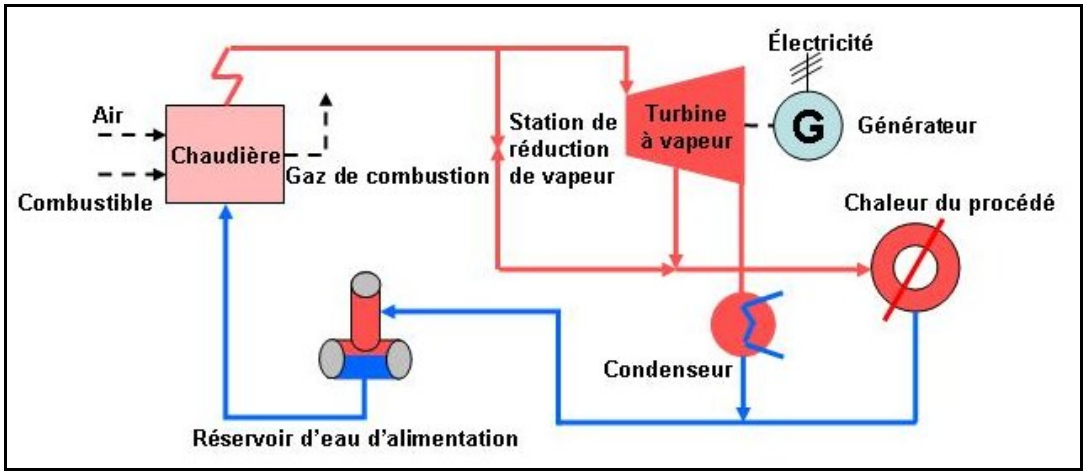


Figure 3.13 : Centrale à condensation avec extraction
[65, Nuutila, 2005]

Turbine à gaz avec chaudière de récupération de chaleur

Dans les centrales électriques à turbine à gaz avec chaudière de récupération de chaleur, la chaleur est produite avec les gaz de combustion chauds de la turbine (voir Figure 3.14). Le combustible utilisé dans la plupart des cas est le gaz naturel, le fioul ou une combinaison de ces derniers. Les turbines à gaz peuvent également être alimentées avec des combustibles solides gazéifiés ou liquides.

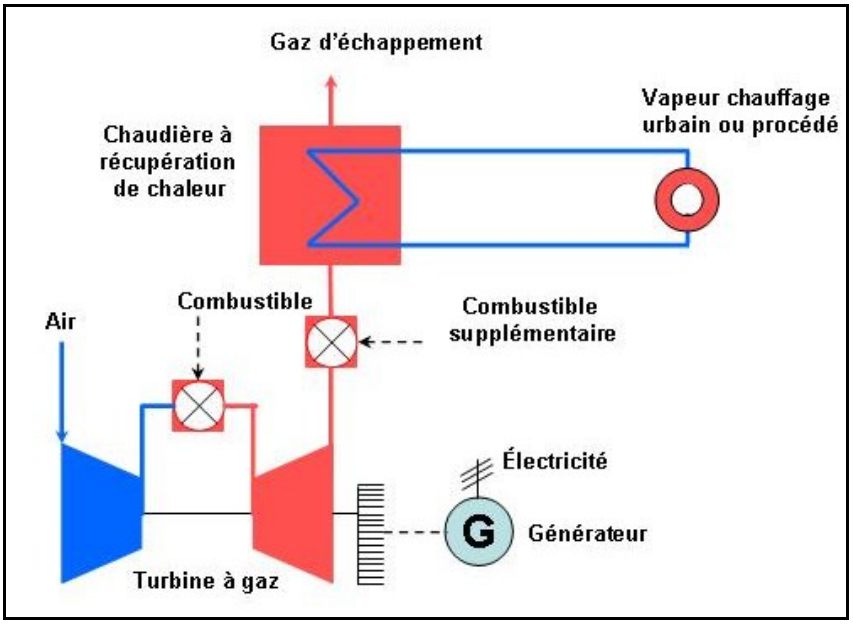


Figure 3.14 : Turbine à gaz avec chaudière de récupération de chaleur
[65, Nuutila, 2005]

Centrale électrique à cycle combiné

Une centrale électrique à cycle combiné comporte une ou plusieurs turbines à gaz reliées à une ou plusieurs turbines à vapeur (voir Figure 3.15). Une centrale électrique à cycle combiné est souvent utilisée pour la production combinée de chaleur et d'électricité. La chaleur provenant des gaz d'échappement de la turbine à gaz est récupérée pour la turbine à vapeur. La chaleur récupérée est, dans de nombreux cas, convertie ensuite en supplément d'électricité, au lieu d'être utilisé à des fins de chauffage. L'avantage du système réside dans un rapport électricité/chaleur plus élevée et un rendement élevé. La dernière avancée dans la technologie de combustion, la gazéification des combustibles solides, a également été reliée aux centrales à cycle combiné et à la cogénération. La technique de gazéification réduit les émissions de soufre et d'oxyde d'azote à un niveau considérablement inférieur à celui des techniques de combustion classique, grâce à des opérations de traitement des gaz en aval de la gazéification et en amont du cycle combiné de la turbine à gaz.

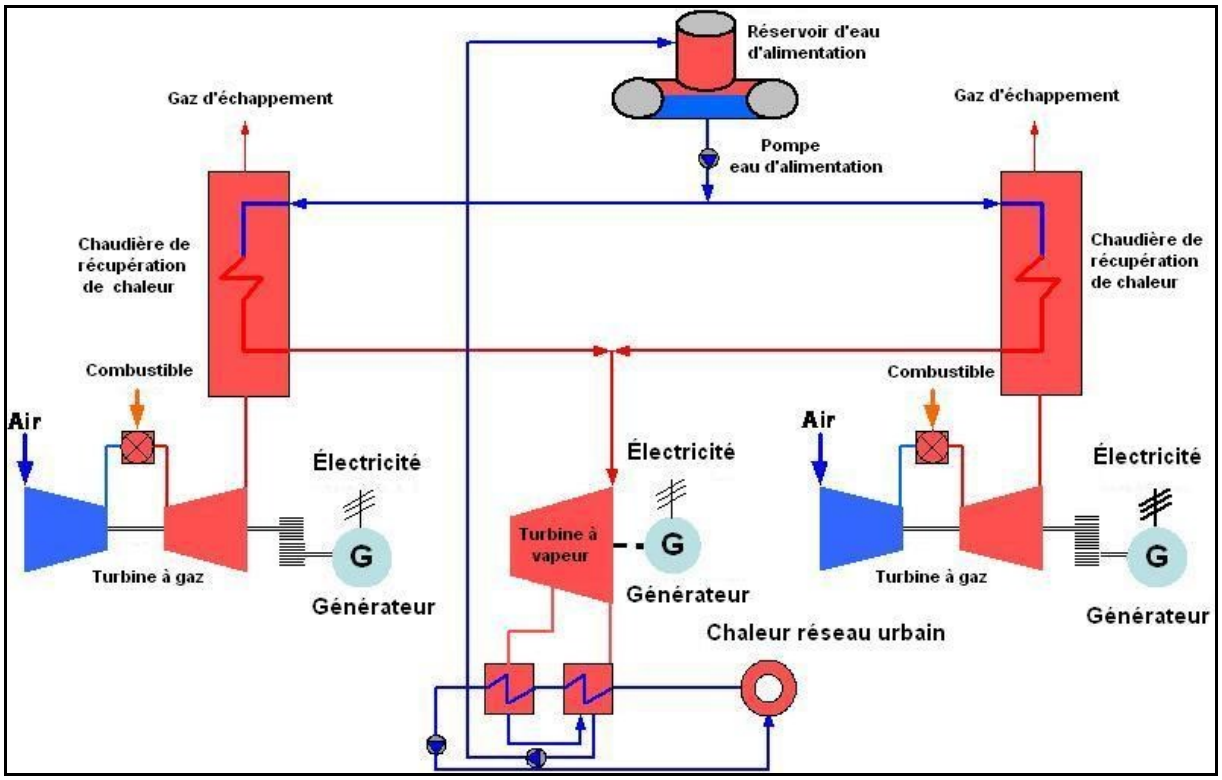


Figure 3.15 : Centrale électrique à cycle combiné
[65, Nuutila, 2005]

Moteurs à combustion interne (moteurs à piston)

Dans un moteur à combustion interne ou moteur à piston, il est possible de récupérer la chaleur émanant de l'huile de lubrification et de l'eau de refroidissement du moteur ainsi que des gaz d'échappement comme représenté sur la Figure 3.16.

Les moteurs à combustion interne convertissent l'énergie de liaison chimique contenue dans le combustible en énergie thermique, par la combustion. L'expansion thermique des gaz de combustion se déroule dans un cylindre, forçant le mouvement d'un piston. L'énergie mécanique issue du mouvement du piston est transférée à un volant par le vilebrequin et par la suite transformée en électricité par un alternateur connecté au volant d'inertie. La conversion

directe de l'expansion thermique à température élevée en énergie mécanique puis en énergie électrique confère aux moteurs à combustion interne le rendement thermique le plus élevé (énergie électrique produite par unité de combustible consommée) des moteurs d'entraînement à cycle unique, c'est-à-dire également les émissions de CO_2 spécifiques les plus faibles.

Les moteurs à deux temps à faible vitesse (<300 tr/min) sont disponibles jusqu'à des tailles unitaires de 80 MW_e. Les moteurs à quatre temps à moyenne vitesse (300 <n <1500 tr/min) sont disponibles jusqu'à des tailles unitaires de 20 MW_e. Les moteurs à vitesse moyenne sont habituellement sélectionnés pour les applications de production électrique en continu. Les moteurs à quatre temps à vitesse élevée (>1500 tr/min) disponibles jusqu'à environ 3 MW_e sont principalement utilisés dans les applications avec des pointes de charge.

Les types de moteur les plus utilisés peuvent, en outre, être classés en moteur à diesel, moteur à allumage par étincelle/micropilote et moteur à deux combustibles. Couvre un large éventail de combustibles alternatifs à savoir gaz naturel, gaz associés, gaz de décharge, gaz de mine (lit de charbon), biogaz, et même gaz de pyrolyse et des biocombustibles liquides, gazole, pétrole brut, fioul lourd, émulsions de combustible et même résidus de raffinerie.

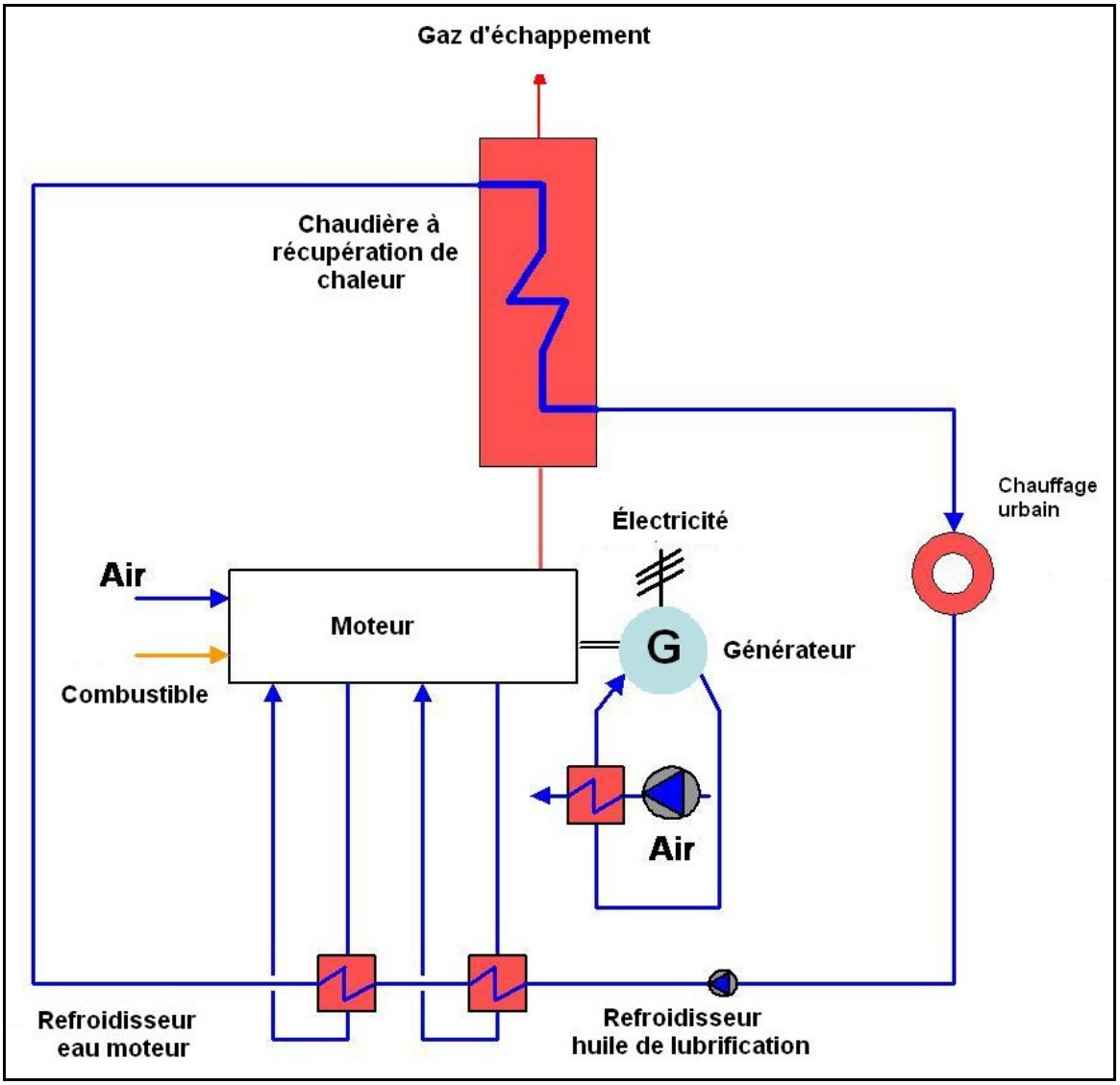


Figure 3.16 : Moteur à combustion interne ou à pistons

[65, Nuutila, 2005]

Les centrales à moteurs stationnaires (c'est-à-dire à générateurs non mobiles) ont couramment plusieurs ensembles de générateurs entraînés par moteur fonctionnant en parallèle. Les installations à plusieurs moteurs associées à la capacité qu'ont les moteurs de maintenir un rendement élevé lorsqu'ils fonctionnent à charge partielle, confèrent une souplesse d'exploitation avec une réponse optimale aux différentes demandes en charge ainsi qu'une disponibilité excellente. Le temps de démarrage à froid est court par rapport à celui des centrales à turbine à vapeur avec chaudière alimentée au gaz, au fioul ou au charbon ou à celui des centrales à turbine à gaz à cycle combiné. Un moteur en fonctionnement possède une capacité de réponse rapide au réseau électrique et peut donc être utilisé afin de stabiliser rapidement le réseau électrique.

Les systèmes de refroidissement à radiateur fermé sont adaptés à cette technologie, et contribuent à maintenir la consommation d'eau des centrales à moteurs stationnaires à un niveau très faible.

Grâce à leur conception compacte, les centrales à moteur sont adaptées à la production combinée et distribuée de chaleur et d'électricité (CHP), à proximité des consommateurs d'électricité et de chaleur dans les zones urbaines et industrielles. Ainsi, les pertes d'énergie associées dans les transformateurs et les lignes de transmission ainsi que dans les canalisations de transfert de chaleur sont réduites. Les pertes de transmission types associées à la production d'électricité centralisée s'élève, en moyenne à 5 à 8 % de l'électricité produite, avec en parallèle, des pertes d'énergie thermique dans les réseaux de chauffage urbain municipaux qui peuvent être inférieures à 10 %. Il convient de garder à l'esprit que les pertes de transmission les plus élevées se produisent généralement dans les réseaux basse tension et dans les connexions de desserte, domestiques. D'autre part, la production d'électricité dans les centrales plus importantes s'avère habituellement plus efficace.

Le rendement élevé d'un cycle unique des moteurs à combustion interne conjointement aux températures relativement élevées des gaz d'échappement et de l'eau de refroidissement en font des solutions idéales pour la production combinée de chaleur et d'électricité. En règle générale, environ 30 % de l'énergie libérée dans la combustion du combustible se retrouve dans les gaz d'échappement et environ 20 % dans les flux d'eau de refroidissement. Il est possible de récupérer l'énergie des gaz d'échappement en connectant en aval du moteur une chaudière, qui produit de la vapeur, de l'eau chaude ou de l'huile chaude. Les gaz d'échappement chauds peuvent également être utilisés directement ou indirectement via des échangeurs de chaleur, par exemple dans les procédés de séchage. Les flux d'eau de refroidissement peuvent être divisés en circuits à température élevée et à température basse et le degré de potentiel de récupération est lié à la plus faible température pouvant être utilisée par le consommateur de chaleur. L'ensemble du potentiel d'énergie contenu dans l'eau de refroidissement peut être récupéré dans les réseaux de chauffage urbain avec faibles températures de retour. Les sources thermiques du refroidissement des moteurs en association avec une chaudière à gaz d'échappement et un économiseur peuvent ensuite se traduire par une utilisation des combustibles (électricité + récupération de chaleur) pouvant atteindre 85 % avec les liquides et pouvant atteindre 90 % avec les applications de combustible gazeux.

L'énergie thermique peut être fournie aux utilisateurs finaux sous forme de vapeur (généralement surchauffée jusqu'à 20 bars) d'eau chaude ou d'huile chaude en fonction des

besoins de l'utilisateur final. La chaleur peut également être utilisée par un procédé à refroidisseur à absorption afin de produire de l'eau réfrigérée.

Il est également possible d'utiliser des pompes à chaleur à absorption pour transférer l'énergie du circuit de refroidissement basse température du moteur vers une température plus élevée pouvant être utilisée dans des réseaux de chauffage urbain avec des températures de retour élevées. Voir Section 3.4.3.

Les accumulateurs d'eau chaude et d'eau réfrigérée peuvent être utilisés afin de stabiliser un déséquilibre entre les demandes en électricité et en chauffage/refroidissement sur des courtes périodes.

Les moteurs à combustion interne ou à pistons ont généralement des rendements de combustion de l'ordre de 40 à 48 % lorsqu'ils produisent de l'électricité et les rendements de la combustion peuvent atteindre 85 à 90 % dans les cycles combinés de chaleur et d'électricité lorsque la chaleur peut effectivement être utilisée. La souplesse offerte par la trigénération peut être améliorée en utilisant un stockage d'eau chaude et d'eau réfrigérée et en utilisant les capacités d'appoint offertes par les refroidisseurs avec compresseur ou les chaudières auxiliaires à combustion directe.

Avantages obtenus pour l'environnement

La production combinée de chaleur et d'électricité offre des avantages économiques et environnementaux significatifs. Les centrales à cycle combiné tirent le meilleur parti de l'énergie contenu dans les combustibles en produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur avec un gaspillage minimum d'énergie. Ces centrales ont un rendement énergétique du combustible de 80 à 90 %, tandis que, pour les centrales à condensation de vapeur classique, les rendements restent à 35 à 45 % et même inférieur à 58 % pour les centrales à cycle combiné.

Le rendement élevé des procédés de production combinée de chaleur et d'électricité conduit à des économies importantes en termes d'énergie et d'émissions. La Figure 3.17 montre les valeurs types d'une centrale CHP alimentée au charbon, comparées à celles d'une chaudière thermique et d'une centrale électrique alimentée au charbon, considérées séparément ; des résultats similaires sont également obtenus avec d'autres combustibles. Les chiffres de la Figure 3.17 sont exprimés dans des unités d'énergie sans dimension. Dans cet exemple, des unités séparées et l'unité CHP produisent la même valeur de sortie utile. Toutefois, une production séparée implique une perte globale de 98 unités d'énergie pour seulement 33 dans les CHP. Le rendement énergétique du combustible pour la production séparée est de 55 %, tandis que dans le cas d'une production combinée de chaleur et d'électricité on obtient un rendement énergétique du combustible de 78 %. La production combinée de chaleur et d'électricité (CHP) nécessite donc environ 30 % de combustible en entrée en moins pour produire la même quantité d'énergie utile. La production combinée de chaleur et d'électricité peut donc réduire les émissions atmosphériques d'une quantité équivalente. Toutefois, ceci dépend du mélange d'énergie locale pour l'électricité et/ou la chaleur (production de vapeur).

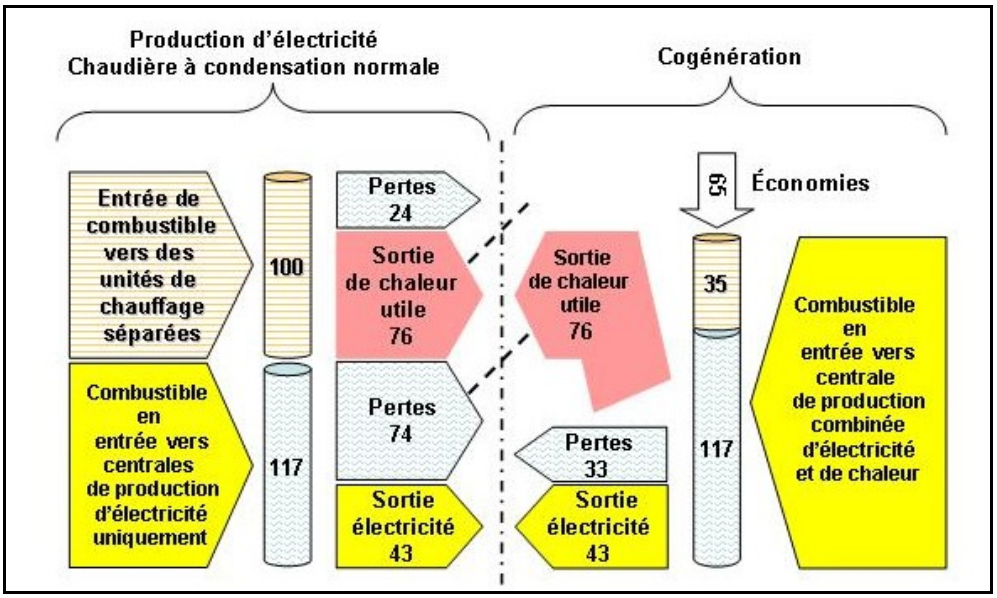


Figure 3.17 : Comparaison entre le rendement d'une centrale électrique à condensation et d'une centrale électrique de production combinée de chaleur et d'électricité
[65, Nuutila, 2005]

Comme pour la production d'électricité, il existe un large éventail de combustibles pouvant être utilisés pour la cogénération, par exemple déchets, sources d'énergie renouvelable comme la biomasse et combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz.

Effets croisés
La production d'électricité peut diminuer si une centrale est optimisée pour la récupération de chaleur (par exemple dans les usines d'incinération de déchets, voir le BREF WI (Incinération des déchets)). Par exemple, (en utilisant des facteurs équivalents conformément aux BREF WI (Incinération des déchets) et à la directive cadre sur les déchets (WFD)), il peut être démontré qu'une installation d'incinération des déchets avec, par exemple, une production d'électricité de 18 % (équivalent WFD 0.468) est similaire à une installation d'incinération des déchets avec, par exemple une utilisation de 42,5 % de chaleur urbaine (équivalent WFD 0,468) ou une installation avec une utilisation commerciale de 42,5 % (équivalent WFD 0,468) de vapeur.

Données opérationnelles
Voir les descriptions des différentes techniques de cogénération ci-dessus.

Applicabilité
Le choix du concept de production combinée de chaleur et d'électricité (CHP) repose sur un certain nombre de facteurs et même avec des exigences similaires en énergie, il n'y a pas de sites identiques. Le choix initial d'une centrale CHP est souvent dicté par les facteurs suivants :

- le facteur critique est qu'il existe une demande suffisante de chaleur, en termes de quantité, température, etc. qui eut être satisfaite au moyen de la chaleur provenant de la centrale CHP ;
- la demande électrique correspondant à la charge de base du site, c'est-à-dire le niveau en dessous duquel la demande électrique du site tombe rarement ;

- les demandes de chaleur et d'électricité sont concomitantes ;
- un prix de combustible intéressant par rapport au prix de l'électricité
- un temps de fonctionnement annuel élevé (de préférence supérieur à 4 000 – 5 000 heures à pleine charge).

En règle générale, les unités CHP trouvent leur application dans des centrales ayant des demandes importantes en chaleur à des températures se situant dans la plage de vapeur à moyenne ou basse pression. L'évaluation du potentiel de cogénération au niveau d'un site doit s'assurer qu'aucune réduction importante de la demande en chaleur n'est prévisible. Sinon, la configuration de cogénération serait conçue pour une demande en chaleur trop importante et l'unité de cogénération fonctionnerait de manière inefficace.
En 2007, une CHP à relativement petite échelle peut être réalisable au plan économique (voir hôpital Atrium, Annexe 7.7, Exemple 2). Les paragraphes ci-après expliquent quels types de CHP sont habituellement adaptés aux différents cas. Toutefois, les chiffres limitatifs sont cités à titre d'exemple uniquement et sont fonction des conditions locales. Habituellement, il est possible de vendre l'électricité au réseau national lorsque la demande du site varie. La modélisation des utilités, voir Section 2.15.2, facilite l'optimisation des systèmes de génération et de récupération de la chaleur, ainsi que la gestion de la vente et de l'achat du surplus d'énergie.

Choix d'un type de CHP
Les turbines à vapeur constituent un choix approprié pour les sites dans lesquels :

- la charge électrique de base est supérieure à 3 – 5 MW_e ;
- il existe un besoin en vapeur de procédé de faible valeur ; et le rapport de la demande d'électricité/chaleur est supérieur à 1:4 ;
- un combustible bon marché, de faible grade est disponible ;
- un espace adéquat est disponible ;
- il existe de la chaleur perdue de haute qualité (par exemple pour les fours ou les incinérateurs) ;
- la chaudière existante doit être remplacée ;
- le rapport électricité/chaleur doit être minimisé. Dans les centrales CHP, le niveau de contre-pression doit être minimisé et le niveau de pression élevée doit être maximalisé afin de maximaliser le rapport électricité/chaleur, en particulier lorsque des combustibles renouvelables sont utilisés.

Les turbines à gaz peuvent être appropriées si :

- il est prévu de maximaliser le rapport électricité/chaleur ;
- la demande en électricité est continue, et est supérieure à 3 MW_e (des turbines à gaz plus petites arrivent sur le marché au moment de la rédaction du présent document) ;
- du gaz naturel est disponible (bien que ceci ne soit pas un facteur limitatif) ;
- il existe une demande élevée de vapeur moyenne/haute pression ou d'eau chaude, en particulier à des températures supérieures à 500 °C ;
- il existe une demande en gaz chaud à des températures supérieures ou égales à 450 °C : les gaz d'échappement peuvent être dilués avec l'air ambiant pour les refroidir ou être acheminés à travers un échangeur de chaleur à air. (Il y a lieu également d'envisager l'utilisation d'un cycle combiné avec une turbine à vapeur).

Les moteurs à combustion interne ou à pistons peuvent être adaptés pour des sites dans lesquels :

- l'électricité ou les procédés sont cycliques ou discontinus ;
- il est nécessaire d'avoir une vapeur basse pression ou une température moyenne ou basse d'eau chaude ;
- il existe un rapport élevé de la demande électricité/chaleur ;
- si du gaz naturel est disponible : des moteurs à combustion interne alimentés au gaz sont préférables ;
- si du gaz naturel n'est pas disponible : des moteurs diesel alimentés au GPL ou au fioul peuvent être appropriés ;
- la charge électrique est inférieure à 1 MW_e : allumage par étincelle (unités disponibles de 0,003 à 10 MW_e) ;
- la charge électrique est supérieure à 1 MW_e : allumage par compression (unités de 3 à 20 MW_e).

Aspects économiques

- Les aspects économiques sont fonction du rapport entre le prix du fioul et le prix de l'électricité, le prix de la chaleur, le facteur de charge et le rendement.
- Les aspects économiques dépendent fortement de la fourniture à long terme de chaleur et d'électricité.
- Les mécanismes du marché ainsi que la politique en faveur de l'efficacité énergétique ont un impact significatif, notamment un régime de taxation de l'énergie favorable et la libéralisation des marchés de l'énergie.

Agents moteurs pour la mise en œuvre

Mécanisme de marché et politique en faveur de l'efficacité énergétique (voir Aspects économiques, ci-dessus).

Exemples

- Centrale électrique CHP d'Änekoski, Finlande.
- Centrale électrique CHP Rauhalahti, Finlande.
- utilisation dans les usines de carbonate de sodium, vois le BREF LVIC-S (Chimie organique produits solides et autres).
- Bindewald Kupfermühle, DE :
  - minoterie : 100000 t de blé et de seigle/an
  - malterie : 35000 t de malt /an
- Usine d'incinération des déchets CHP Dava KVV, Umea, Suède.
- Usine d'incinération des déchets CHP Sysav, Malmö, Suède.

Références bibliographiques

[65, Nuutila, 2005], [97, Kreith, 1997] [127, TWG, , 128, EIPPCB, , 140, EC, 2005, 146, EC, 2004]

3.4.2 Trigénération

Description
La trigénération s'entend généralement comme étant la transformation simultanée d'un combustible en trois produits énergétiques utiles : électricité, eau chaude ou vapeur et eau réfrigérée. Un système de trigénération est en réalité un système de cogénération (Section 3.4) avec un refroidisseur à absorption qui utilise une partie de la chaleur pour produire l'eau réfrigéré (voir Figure 3.18).

La Figure 3.18 compare deux concepts de production d'eau réfrigérée : les refroidisseurs avec compresseur utilisant de l'électricité et la trigénération utilisant la chaleur récupérée dans un refroidisseur à absorption au bromure de lithium. Comme représenté, la chaleur est récupérée à la fois à partir des gaz d'échappement et du circuit de refroidissement de la température élevée du moteur. Il est possible d'améliorer la souplesse de la trigénération en utilisant la capacité de contrôle des appoints offerte par les refroidisseurs avec compresseur ou par les chaudières auxiliaires à combustion directe.

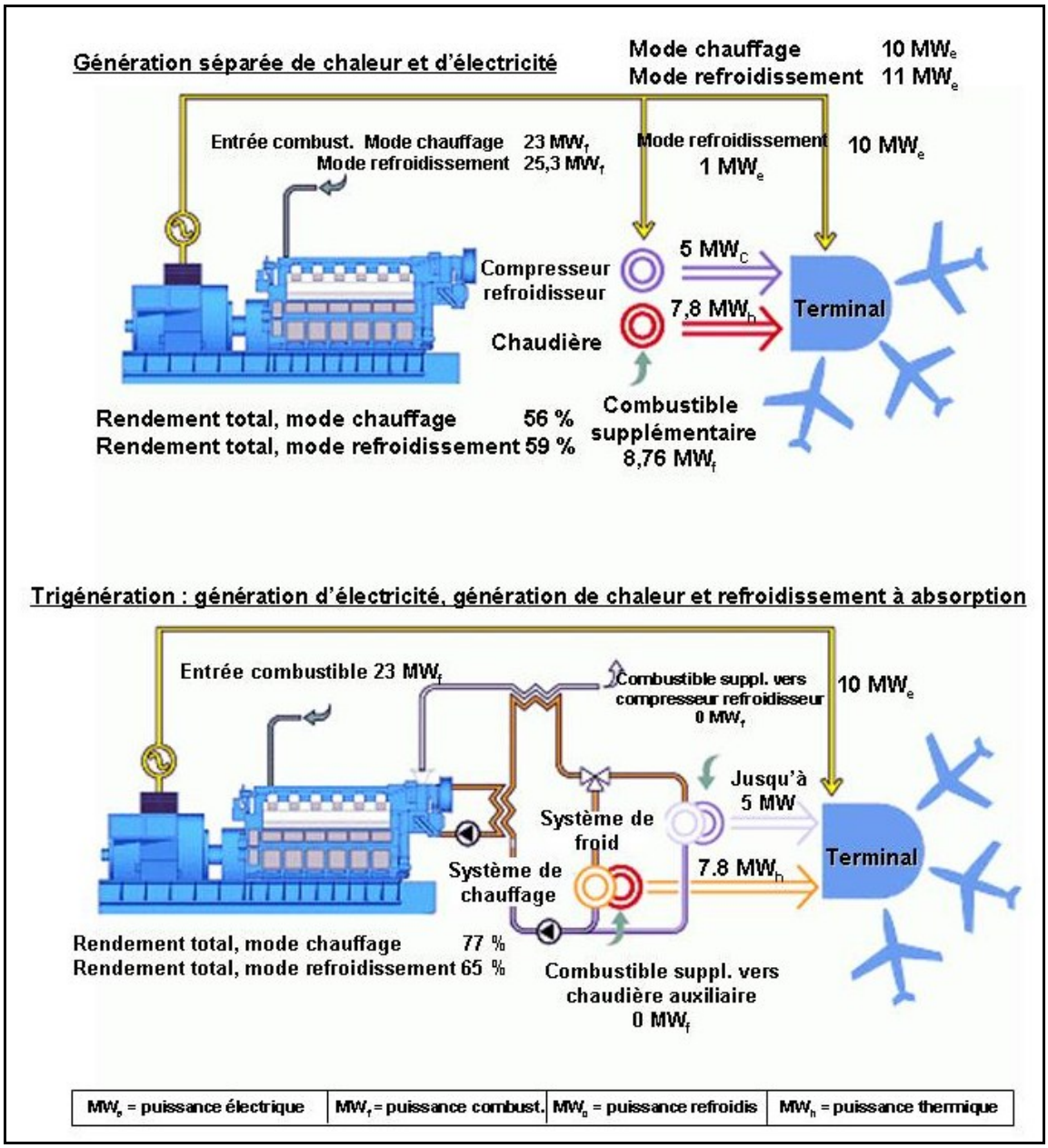


Figure 3.18 : Comparaison de la trigénération à une production d'énergie séparée pour un grand aéroport [64, Linde, 2005]

Les refroidisseurs à absorption au bromure de lithium à un seul étage sont à même d'utiliser de l'eau chaude ayant des températures aussi faible que 90 °C comme source d'énergie tandis que les refroidisseurs à absorption au bromure de lithium à deux étages nécessitent une température d'environ 170 °C, ce qui signifie qu'ils sont en principe alimentés en vapeur. Un refroidisseur à absorption au bromure de lithium à un seul étage produisant de l'eau à 6 à 8 °C a un coefficient de performance (COP) d'environ 0,7 tandis que le COP d'un refroidisseur à deux étages est d'environ 1,2. En d'autres termes ils peuvent produire une capacité de refroidissement correspondant à 0,7 ou 1,2 fois la capacité de la source thermique.

Pour une centrale CHP à moteur à explosion, des systèmes à un ou deux étages peuvent être utilisés. Toutefois, comme la chaleur résiduaire du moteur se partage entre gaz

d'échappement et refroidissement du moteur, le mono-égage est plus indiqué parce que davantage de chaleur est récupérée et transférée vers le refroidisseur à absorption.

Avantages obtenus pour l'environnement
Le principal avantage de la trigénération réside dans l'obtention de la même sortie avec une réduction considérable de l'apport de combustible en entrée par rapport à une production d'électricité et de chaleur séparée.

La souplesse apportée par l'emploi de la chaleur récupérée pour le chauffage pendant une saison (hiver) et pour le refroidissement pendant une autre saison (été) est une manière efficace de maximaliser les heures de fonctionnement à plein rendement pour toute l'usine, qui bénéficie à son propriétaire et à l'environnement – voir Figure 3.19.

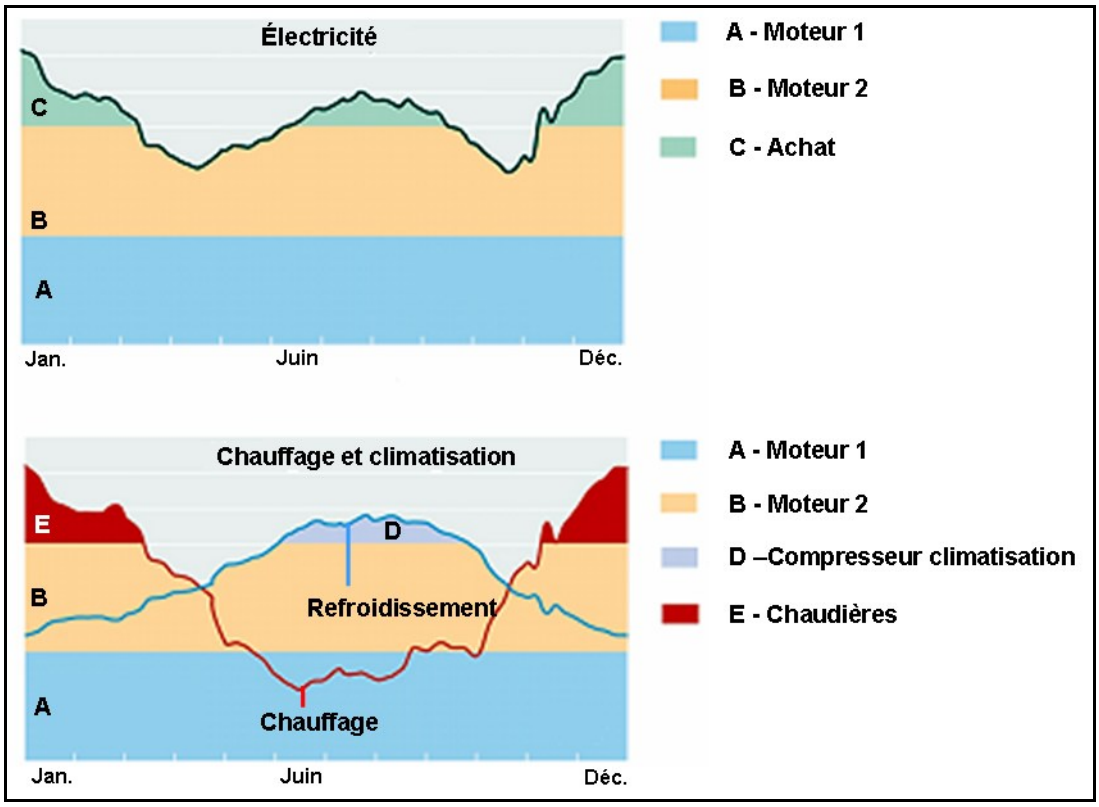


Figure 3.19 : La trigénération permet d'optimiser l'exploitation de l'usine pendant toute l'année [64, Linde, 2005]

La philosophie d'exploitation ainsi que la stratégie de contrôle revêt une importance capitale et doivent être évaluées correctement. La solution optimale repose rarement sur une solution dans laquelle la capacité totale d'eau refroidie est produite par les refroidisseurs à absorption. Pour la climatisation, par exemple, la plupart des besoins en refroidissement annuels peuvent être satisfait avec 70 % de la capacité de refroidissement de pointe, tandis que les 30 % restant peuvent être apportés par des refroidisseurs à compresseur.

De cette manière, le coût d'investissement total pour les refroidisseurs peut être réduit.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
Trigénération et génération d'électricité distribuée
Étant donné qu'il est plus difficile et plus coûteux de distribuer de l'eau chaude ou de l'eau réfrigérée que de l'électricité, la trigénération conduit automatiquement à la production d'électricité distribuée étant donné que la centrale à trigénération doit être située à proximité des consommateurs d'eau chaude ou réfrigérée.

Afin de maximaliser plus avant le rendement énergétique du combustible de la centrale, le concept repose sur le besoin conjoint d'eau chaude et d'eau réfrigérée. Une centrale électrique située à proximité des consommateurs d'eau chaude et d'eau réfrigérée a également des pertes moindres pour la distribution de l'électricité. La trigénération est une cogénération poussée à une étape ultérieure par l'incorporation d'un refroidisseur. En clair, il n'existe aucun avantage à effectuer l'investissement supplémentaire si la totalité de la chaleur récupérée est effectivement utilisée pendant toutes les heures de fonctionnement de la centrale.

Toutefois, l'investissement supplémentaire commence à avoir des retombés s'il existe des périodes pendant lesquelles la chaleur ne peut pas être totalement utilisée, ou pendant lesquelles il n'existe aucune demande en chaleur, mais qu'en revanche il existe un besoin en eau ou en air réfrigéré. Par exemple, la trigénération s'utilise souvent pour le conditionnement de l'air des bâtiments, à savoir chauffage en période hivernale et climatisation l'été, ou pour le chauffage dans une zone et le refroidissement dans une autre zone.

De nombreuses installations industrielles et de nombreux bâtiments publics ont également des besoins mixtes en chauffage et en refroidissement, les quatre exemples principaux étant les brasseries, les centres commerciaux, les aéroports et les hôpitaux.

Aspects économiques
Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coût.

Exemples
- Aéroport de Barajas de Madrid, (voir Annexe 7.10.4**Error! Reference source not found.**)
- Hôpital Atrium, Pays-Bas (voir Annexe 7.7).

Références bibliographiques
[64, Linde, 2005, 93, Tolonen, 2005]

3.4.3 Refroidissement urbain

Description

Le refroidissement urbain est un autre aspect de la cogénération : lorsque la cogénération fournit une production centralisée de chaleur, qui alimente des refroidisseurs à absorption, et que l'électricité est vendue au réseau. La cogénération peut également offrir un refroidissement urbain (DC) grâce à une production et une distribution centralisées de l'énergie de refroidissement. L'énergie de refroidissement est fournie aux clients par le biais d'eau réfrigérée transférée dans un réseau de distribution séparée.

Le refroidissement urbain peut être produit de manières différentes en fonction de la saison et de la température extérieure. En hiver, du moins dans les pays nordiques, le refroidissement peut être réalisé par de l'eau froide provenant de la mer (Figure 3.20). L'été, le refroidissement urbain peut être produit par la technologie à absorption (voir Figure 3.21 et Section 3.3.2). Le refroidissement urbain sert à la climatisation, pour la climatisation des bureaux et des bâtiments commerciaux et pour les bâtiments résidentiels.

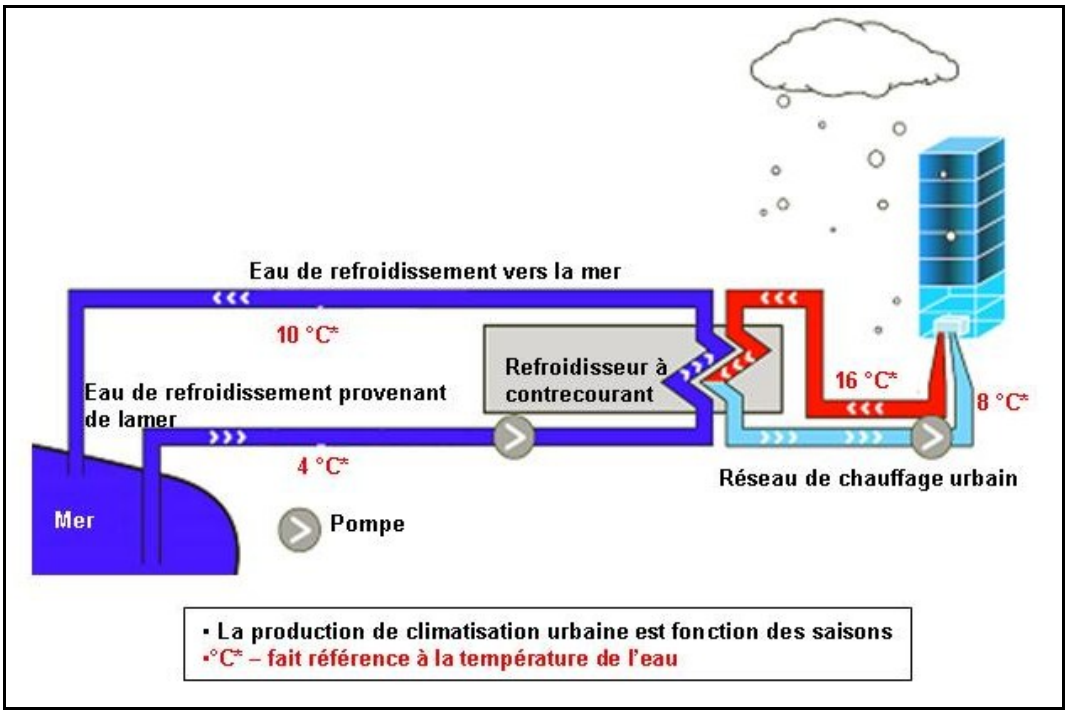


Figure 3.20 : Refroidissement urbain en hiver grâce à la technologie de refroidissement gratuit (free cooling) [93, Tolonen, 2005]

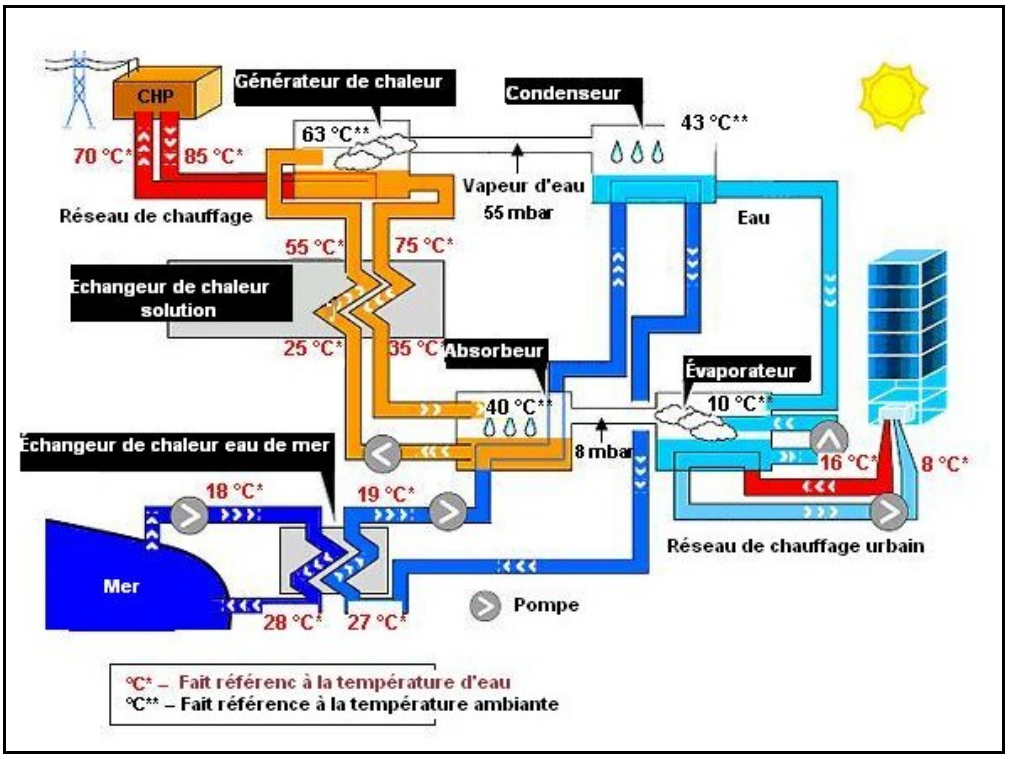


Figure 3.21 : Refroidissement urbain par technologie à absorption pendant l'été [93, Tolonen, 2005]

Avantages obtenus pour l'environnement

L'amélioration de l'éco-efficacité du chauffage urbain (DH) et du refroidissement urbain (DC) à Helsinki, Finlande, a permis d'atteindre plusieurs objectifs de développement durable comme indiqué ci-dessous :

- les émissions de gaz à effet de serre ainsi que d'autres émissions, notamment des émissions d'oxyde d'azote, de dioxyde de soufre et de particules ont été considérablement réduites ;
- la chute de la consommation d'électricité contribue également à réduire les pics de consommation d'électricité spécifique aux unités de refroidissement des bâtiments pendant les journées chaudes ;
- d'octobre à mai toute l'énergie DC est renouvelable, et provient de l'eau de mer froide. Cela représente 30 % de la consommation annuelle du refroidissement urbain (DC) ;
- au cours de la saison chaude, les refroidisseurs à absorption utilisent l'excès de chaleur des centrales CHP, qui serait sinon évacué à la mer. Bien que la consommation de combustible de l'usine CHP puisse augmenter, la consommation totale de combustible par rapport à une situation faisant appel à des systèmes de refroidissement distincts dans les bâtiments, diminue ;
- pour le refroidissement urbain (DC), élimination des volumes sonores nocifs ainsi que des vibrations des équipements de refroidissement ;
- l'espace réservé aux équipements de refroidissement dans les bâtiments est libéré à d'autres fins ;
- le problème de la croissance microbienne dans l'eau rencontré sur les tours de condensation est évité ;

- à l'inverse des agents de refroidissement utilisés dans le refroidissement à compresseur propre aux bâtiments, aucune substance nocive (par exemple composés CFC et HCFC) ne s'évapore dans les procédés de refroidissement urbain (DC) ;
- le refroidissement urbain améliore l'esthétique du paysage urbain, les unités de production et les canalisations ne sont pas visibles. Les gros condenseurs sur les toits des bâtiments ainsi que les nombreux climatiseurs sur les fenêtres ne sont plus nécessaires ;
- la durée de vie des systèmes de chauffage urbain et de refroidissement urbain est beaucoup plus longue que celle des unités propres aux bâtiments, par exemple la durée de vie d'une centrale de refroidissement est le double de celle des unités séparées. La durée de service des principales canalisations des systèmes DH et DC va au-delà d'un siècle.

Effets croisés
Impacts de l'installation d'un système de distribution.

Données opérationnelles
Fiables.

Applicabilité
Cette technique peut avoir un large éventail d'applications, en fonction toutefois des conditions locales.

Aspects économiques
De gros investissements sont requis pour les systèmes de distribution.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
- Helsinki Energy, Finlande
- À Amsterdam, aux Pays-Bas, des lacs profonds à proximité des installations fournissent le refroidissement urbain.

Références bibliographiques
[93, Tolonen, 2005], [120, Helsinki Energy, 2004]

3.5 Alimentation électrique

Introduction
Le réseau électrique public est alimenté par des réseaux haute tension dans lesquels la tension et le courant varient selon des cycles sinusoïdaux à 50 Hz (en Europe) en triphasé à intervalles de 120 °. La tension est élevée afin de minimiser les pertes de courant pendant la transmission. En fonction de l'équipement utilisé, on fait chuter la tension à son entrée sur le site ou à proximité d'équipements spécifiques, habituellement à 440 V pour une utilisation industrielle et à 240 V pour les bureaux, etc.

Divers facteurs affectent la fourniture et l'utilisation de l'énergie, dont notamment la résistance des systèmes de fournitures et les effets que certains équipements et utilisations ont sur la fourniture. Des tensions stables et des formes d'onde non distordues sont fortement souhaitables dans les systèmes électriques.

La consommation d'énergie électrique dans l'EU-25 en 2002, s'élevait à 2641 TWh plus 195 TWh de pertes en réseau. Le secteur de consommation le plus important était l'industrie avec 1168 TWh (44 %), puis les ménages avec 717 TWh (27 %) et les services avec 620 TWh (23 %). Ensemble, ces trois secteurs représentent environ 94 % de la consommation.

3.5.1 Correction du facteur de puissance

Description
De nombreux dispositifs électriques ont des charges inductives, telles que :

- les moteurs à courant alternatif monophasés et triphasés (voir Section 3.6)
- les entraînements à vitesse variable (voir Section 3.6.3)
- les transformateurs (voir Section 3.5.4)
- les lampes à décharge haute intensité (voir Section 3.10).

Tous ces dispositifs nécessitent à la fois une puissance électrique active et une puissance électrique réactive. La puissance électrique active est transformée en puissance mécanique utile, tandis que la puissance électrique réactive sert à conserver les champs magnétiques des appareils. Cette puissance électrique réactive est transférée périodiquement dans les deux directions entre le générateur et la charge (à la même fréquence que l'alimentation). Les batteries de condensateurs et les câbles enterrés utilisent également de l'énergie réactive.

L'addition vectorielle de la puissance électrique réelle (active) et de la puissance électrique réactive donne la puissance apparente. Les opérateurs de réseau et d'utilités de production d'électricité doivent rendre disponible cette puissance apparente et la transporter. En d'autres termes, les générateurs, les transformateurs, les lignes électriques, les appareillages de commutation, etc. doivent être dimensionnés pour des puissances nominales supérieures à celles correspondant uniquement à la puissance active consommée par la charge.

Les utilités d'alimentation électrique (à la fois sur site et hors du site) doivent faire face à des surcoûts pour les équipements et les pertes de puissance supplémentaires. C'est pourquoi, les fournisseurs externes, créent des charges supplémentaires pour la puissance réactive si cette dernière dépasse un certain seuil. Habituellement, un certain facteur de puissance cible, à savoir un cos φ compris entre 1,0 et 0,9 (retard) est spécifié, soit une valeur pour laquelle les besoins en énergie réactive sont considérablement réduits. Une explication simple est présentée à l'Annexe 7.17.

$$\text{Facteur de puissance (électrique)} = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance apparente}}$$

Par exemple, en utilisant le triangle de puissance illustré sur la Figure 3.22 ci-dessous, si :

- puissance réelle = 100 kW et puissance apparente = 142 kVA
- alors le facteur de puissance = 100/142 = 0,70.

Il ressort de ce qui précède que seulement 70 % du courant fourni par l'utilité électrique sont utilisés pour produire un travail utile (pour une explication complémentaire, voir Annexe 7.17)

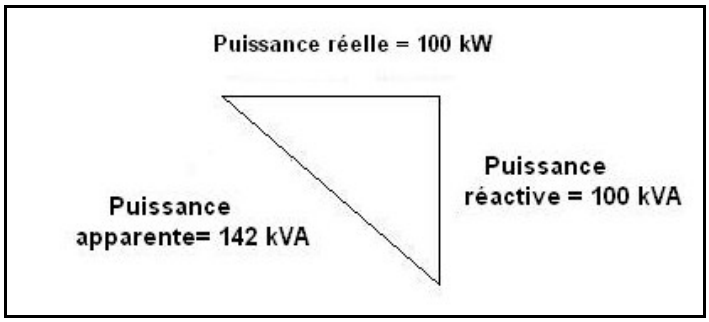


Figure 3.22 : Puissance réactive et apparente

Si le facteur de puissance est corrigé, par exemple en installant un condensateur au niveau de la charge, le prélèvement de puissance réactive au niveau de la société de fourniture d'électricité est totalement ou partiellement éliminé. La correction du facteur de puissance est la plus efficace à proximité physique de la charge et lorsqu'elle utilise une technologie de pointe.

Le facteur de puissance peut changer dans le temps et doit donc faire l'objet de vérifications périodiques (en fonction du site et de l'utilisation, et ces vérifications peuvent être espacées de 3 à 10 ans), étant donné que le type d'équipement et les fournitures énumérées (ci-dessus) changent au fil du temps. Par ailleurs, comme les condensateurs utilisés pour corriger le facteur de puissance se détériorent au fil du temps, il convient également de les tester périodiquement (la manière la plus simple consistant à vérifier si les condensateurs chauffent en fonctionnement).

Les autres mesures à prendre sont les suivantes :

- minimiser le fonctionnement des moteurs au ralenti ou à faible charge (voir Section 3.6) ;
- éviter le fonctionnement des équipements à des tensions supérieures à leur tension nominale ;
- remplacer les moteurs standard lorsqu'ils sont grillés par des moteurs à haut rendement énergétique (voir Section 3.6) ;
- toutefois, même avec des moteurs à bon rendement énergétique, le facteur de puissance est affecté de manière significative par des variations de charge. Un moteur doit fonctionner à une valeur proche de sa capacité nominale pour tirer parti des avantages d'une conception à facteur de puissance élevé (voir Section 3.6).

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergies à la fois du côté fourniture et du côté consommateur.

Le Tableau 3.21 ci-dessous présente les effets d'un facteur de puissance de 0,95 (en retard) obtenu dans l'industrie de l'UE dans sa globalité.

Facteur de puissance Industrie de l'UE-25	**Énergie active TWh**	**Cos φ**	**Énergie réactive TVArh**	**Énergie apparente TVAh**
Facteur de puissance estimé	1168	0,70	1192	1669
Facteur de puissance	1168	0,95	384	1229

ciblé				

Tableau 3.21 : Estimation de la consommation d'électricité de l'industrie dans l'UE 25 en 2002 [131, ZVEI, , 140, EC, 2005]

Si l'on considère l'UE dans son ensemble, on estime que l'application d'une correction du facteur de puissance à l'industrie devrait permettre d'économiser 30 TWh, bien qu'une partie de ce potentiel soit déjà exploitée. Ce calcul repose sur le fait que la consommation d'électricité totale de l'UE des 25 pour les secteurs de l'industrie et des services était en 2002 de 1788 TWh, sur lesquels l'industrie a utilisé 65 %)[9].

Dans une installation, on estime que si un exploitant ayant un facteur de puissance de 0,73 procédait à une correction du facteur pour qu'il soit de 0,95, il pourrait économiser 0,6 % de sa consommation d'électricité (0,73 est le chiffre estimatif pour l'industrie et les services).

Effets croisés
Aucun communiqué.

Données opérationnelles
Une alimentation électrique non corrigée entraîne des pertes de puissance dans le système de distribution de l'installation. Des chutes de tension peuvent se produire lorsque les pertes de puissance augmentent. Des chutes excessives peuvent entraîner une surchauffe et une panne prématurée des moteurs et autres équipements inductifs.

Applicabilité
À tous les sites.

Aspects économiques
Les fournisseurs externes facturent un supplément pour l'excès de puissance réactive si le facteur de correction à l'intérieur de l'installation est inférieur à 0,95 (voir Annexe 7.11).

Le coût d'une correction de puissance est faible. Certains nouveaux équipements (par exemple les moteurs à rendement élevé) satisfont à la correction de puissance.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- des économies de puissance à la fois à l'intérieur de l'installation et dans le réseau électrique externe (lorsqu'il est utilisé) ;
- augmentation de la capacité du système de fourniture d'électricité interne ;
- amélioration de la fiabilité des équipements et réduction des temps d'immobilisation.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
D'autres informations se trouvent à l'Annexe 7.17.
[130, US_DOE_PowerFactor, , 131, ZVEI]

[9] 31 TWh équivalent à plus de 8 millions de foyers, environ 2600 aérogénérateurs, à environ 10 centrales électriques alimentées au gaz et à 2 à 3 centrales électriques nucléaires. Cela correspond également à plus de 12 Mt de CO_2.

3.5.2 Harmoniques

Description
Certains équipements électriques ayant des charges non linéaires créent des harmoniques dans la fourniture (addition de distorsions dans l'onde sinusoïdale). À titre d'exemple de charges non linéaires, on peut citer les redresseurs, certaines formes d'éclairage électrique, les fours électriques à arc, les équipements de soudage, les alimentations électriques à commutation, les ordinateurs, etc.

Il est possible d'appliquer des filtres pour réduire ou éliminer les harmoniques. L'UE a défini des limites pour les harmoniques sous forme de méthodes d'amélioration du facteur de puissance, et il existe des normes, notamment EN 61000-3-2 et EN 61000-3-12, qui imposent la présence de filtres d'harmoniques sur les alimentations à commutation

Avantages obtenus pour l'environnement
Économie d'électricité.

Effets croisés
Aucun communiqué.

Données opérationnelles
Les harmoniques peuvent entraîner :

- un déclenchement intempestif des disjoncteurs,
- un dysfonctionnement des systèmes d'alimentation sans coupure (UPS) et des systèmes générateurs,
- des problèmes de mesure,
- des dysfonctionnements des ordinateurs,
- des problèmes de surtension.

Les harmoniques ne peuvent être détectées par des ampèremètres standard, mais uniquement par un multimètre à valeur RMS réelle.

Applicabilité
Sur tous les sites, il convient de rechercher les équipements engendrant des harmoniques.

Aspects économiques
Pertes dues à des dysfonctionnements d'équipements.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Amélioration de la fiabilité des équipements.
- Réduction des pertes dues aux temps d'immobilisation.
- Avec des harmoniques, réduction des courants de terre.
- Les questions de sécurité relatives aux dépassements des courants de mise à la terre théoriques, en présence d'harmoniques.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[132, Wikipedia_Harmonics, 135, EUROELECTRICS, 136, CDA]

3.5.3 Optimisation de l'approvisionnement

Description
Des pertes résistives se produisent dans le câblage. Les équipements grands consommateurs d'électricité doivent, de ce fait, être alimentés à partir d'une alimentation haute tension aussi proche que possible ; en d'autres termes, le transformateur correspondant doit être aussi proche que possible.

Les câbles reliant les équipements doivent être surdimensionnés pour prévenir toute résistance et pertes inutiles sous forme de chaleur. L'alimentation électrique peut être optimisée en utilisant des équipements à rendement élevé comme les transformateurs.

D'autres équipements à rendement élevé tels que les moteurs, sont traités dans la Section 3.6 ; les compresseurs dans la Section 3.7 et les pompes dans la Section 3.8.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune donnée communiquée.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
- Prévoir de mettre en place tous les équipements grands consommateurs d'électricité à proximité immédiate des transformateurs d'alimentation.
- Vérifier le câblage sur tous les sites et le surdimensionner si nécessaire.

Applicabilité
- Amélioration de la fiabilité de l'équipement.
- Réduction des pertes en temps d'immobilisation.
- Évaluer les coûts sur la durée de vie en service.

Aspects économiques
Économies sur les temps d'immobilisation des équipements et sur la consommation électrique.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Coûts.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[135, EUROELECTRICS]
[230, Association, 2007]

3.5.4 Management de l'efficacité énergétique des transformateurs

Description

Les transformateurs sont des dispositifs pouvant transformer la tension d'une alimentation électrique d'un niveau à un autre. Cette transformation est nécessaire car la tension est normalement distribuée à un niveau supérieur à celui utilisé par les machines dans l'industrie : les tensions supérieures utilisées dans le système de distribution réduisent les pertes d'énergie dans les lignes de distribution.

Les transformateurs sont des machines statiques constituées d'un noyau comprenant un certain nombre de plaques ferromagnétiques, avec les bobines primaire et secondaire enroulées autour des côtés opposés du noyau. Le taux de transformation des tensions est donné par le rapport V_2/V_1 (voir Figure 3.23).

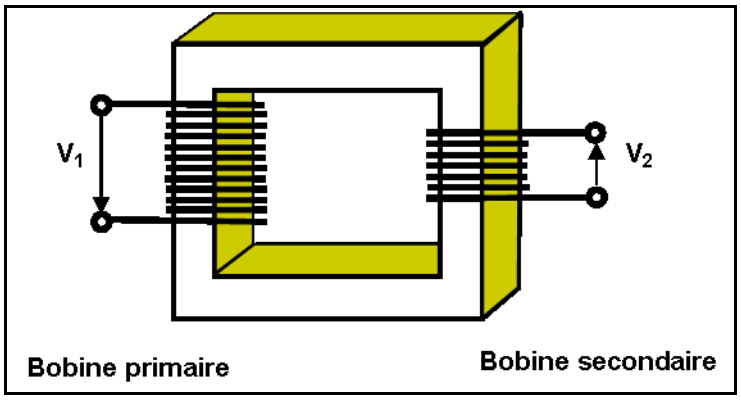


Figure 3.23 : **Diagramme d'un transformateur**
[245, Di Franco, 2008]

Si P_1 est la puissance électrique entrant dans le transformateur, P_2 la puissance sortant du transformateur et P_L les pertes, alors le bilan électrique est :

$$P_1 = P_2 + P_L$$ **Équation 3.9**

Et le rendement du transformateur s'écrit comme suit :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_L}{P_1}$$ **Équation 3.10**

Les pertes sont classées en deux types principaux : les pertes dans les composants de fer et les pertes dans les composants cuivre. Les pertes en fer sont dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault à l'intérieur des plaques du noyau ferromagnétique ; de telles pertes sont proportionnelles à V^2 et sont de l'ordre de 0,2 à 0,5 % de la puissance nominale P_n (= P_2). Les pertes en cuivre sont dues à l'effet Joule dans la bobine de cuivre ; ces pertes sont proportionnelles à I^2, et sont estimées approximativement à 1 à 3 % de la puissance nominale P_n (à 100 % de la charge).

Étant donné qu'un transformateur fonctionne en moyenne avec un facteur de charge *x* inférieur à 100 %, ($P_{effectif} = x\ P_n$), il peut être démontré que la relation entre le rendement de transformation et le facteur de charge suit la courbe de la figure pour un transformateur de 250 kVA. Dans ce cas, le transformateur a un point maximum à une valeur d'environ 40 % du facteur de charge.

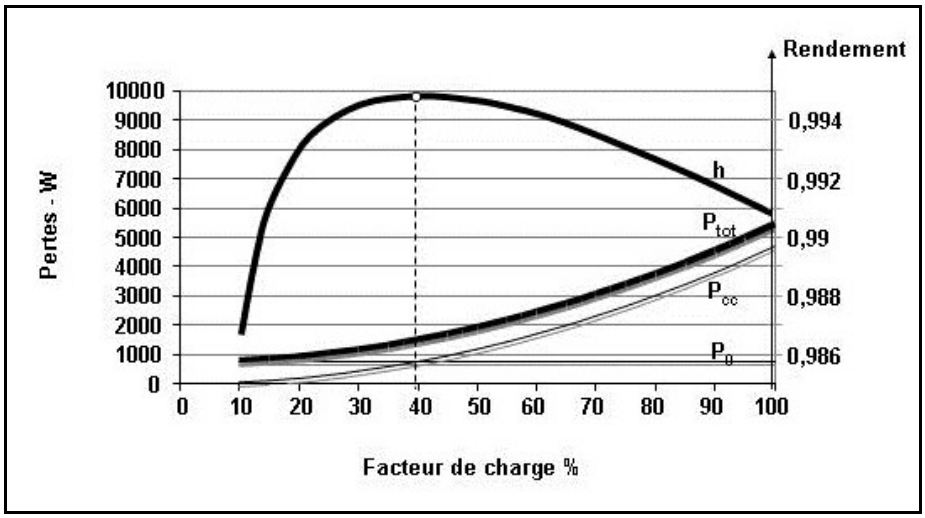


Figure 3.24 : Relation entre les pertes dans les composants en fer, en cuivre, le rendement et le facteur de charge
[245, Di Franco, 2008]

Quelle que soit la puissance du transformateur, la relation entre rendement et facteur de charge montre toujours un maximum, fixé normalement sur une moyenne aux environs de 45 % de la charge nominale.

En raison de ce comportement particulier, il est possible d'évaluer les options ci-après dans une sous-station (transformateur) de puissance électrique :

- si la charge électrique globale est inférieure à 40 à 50 % de P_n, il y a lieu pour réaliser des économies d'énergie de débrancher un ou plusieurs transformateurs afin de porter la charge des autres au voisinage du facteur optimal
- dans la situation inverse (charge électrique globale supérieure à 75 % de P_n), seul l'installation d'une capacité supplémentaire peut être envisagée ;
- lors du repowering ou de l'actualisation de la sous-station de transformateurs, il est préférable d'installer des *transformateurs à faibles pertes*, dont la réduction des pertes est de 20 à 60 %.

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction de la consommation des ressources énergétiques secondaires.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
Normalement dans les sous-stations de transformateurs, il existe un surplus de puissance électrique installée et c'est pourquoi le facteur de charge moyen est généralement faible.

Historiquement, les gestionnaires d'utilités conservent ce surplus pour assurer la continuité de l'alimentation électrique en cas de panne d'un ou de plusieurs transformateurs.

Applicabilité
Les critères d'optimisation sont applicables à tous les locaux de transformateurs. On estime que l'optimisation de la charge est applicable à 25 % des cas.

Le nombre de transformateurs de puissance installés/soumis à une remise en puissance chaque année dans l'industrie est estimé à 5 % et les transformateurs à faibles pertes peuvent être pris en compte pour ces cas nouveaux/remis en puissance.

Aspects économiques
Dans le cas de l'installation de transformateurs à faible perte, par rapport aux transformateurs des « séries normales », ou en cas de remplacement de transformateurs existants à faible rendement, les périodes de retour sur investissement sont normalement courtes, eu égard au nombre élevé d'heures de fonctionnement annuel des transformateurs.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies d'énergie et d'argent.

Exemples
Pour la rénovation d'un local de transformateurs, où il est prévu d'installer quatre nouveaux transformateurs d'une puissance électrique de 200, 315, 500 et 1250 kVA, la période de retour sur investissement estimée est de 1,1 an.

Références bibliographiques
[228, Petrecca, 1992, 229, Di Franco]

3.6 Sous-systèmes[10] entraînés par moteur électrique

Introduction
Le rendement énergétique des systèmes entraînés par moteur peut être évalué en étudiant les demandes du procédé (production) et la manière dont la machine entraînée doit être mise en œuvre. Il s'agit d'une approche au niveau des systèmes et elle donne les gains les plus élevés en termes d'efficacité énergétique (voir Sections 1.3.5 et 1.5.1) et elle est traitée dans les sections concernées du présent chapitre. Les économies réalisées par une approche au niveau des systèmes vont au minimum être celle obtenues lorsqu'on prend en compte les composants à titre individuel, et peuvent être égales ou supérieures à 30 % (voir Section 1.5.1, et, par exemple les systèmes d'air comprimé dans la Section 3.7).

Un sous-système entraîné par moteur électrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Dans la plupart des applications industrielles, le travail mécanique est transféré à la machine entraînée sous forme de puissance mécanique rotative (par le biais d'un arbre rotatif). Les moteurs électriques sont les principaux moteurs d'entraînement derrière la plupart des machines industrielles : pompes, ventilateurs, compresseur, mélangeurs, convoyeurs, tambours écorceurs, broyeurs, scies, extrudeuses, centrifugeuses, presses, laminoir, etc.

[10] Dans le présent document le terme « système » fait référence à un ensemble d'éléments ou de dispositifs connectés qui fonctionnent conjointement dans un but spécifique, par ex. CVC, SAC. Voir la section sur les limites des systèmes. Ces systèmes comportent généralement des sous-systèmes moteurs (ou des systèmes qui les composent).

Les moteurs électriques sont l'une des principales sources de consommation d'énergie en Europe. Selon les estimations, les moteurs représentent :

- environ 68 % de l'électricité consommée dans l'industrie qui s'est élevée à 707 TWh en 1997,
- 1/3 de la consommation électrique du secteur tertiaire.

Sous-système entraîné par moteur électrique
Il s'agit d'un sous-système ou d'un train de composants comprenant :

- une alimentation de l'installation,
- un dispositif de contrôle-commande, par exemple un entraînement CA (courant alternatif) (voir *moteur électrique ci-dessous*),
- un moteur électrique, habituellement un moteur à induction,
- un couplage de transmission mécanique,
- une machine entraînée, par exemple une pompe centrifuge.

La Figure 3.25 représente les schémas de deux systèmes de pompage : classique et à bon rendement énergétique.

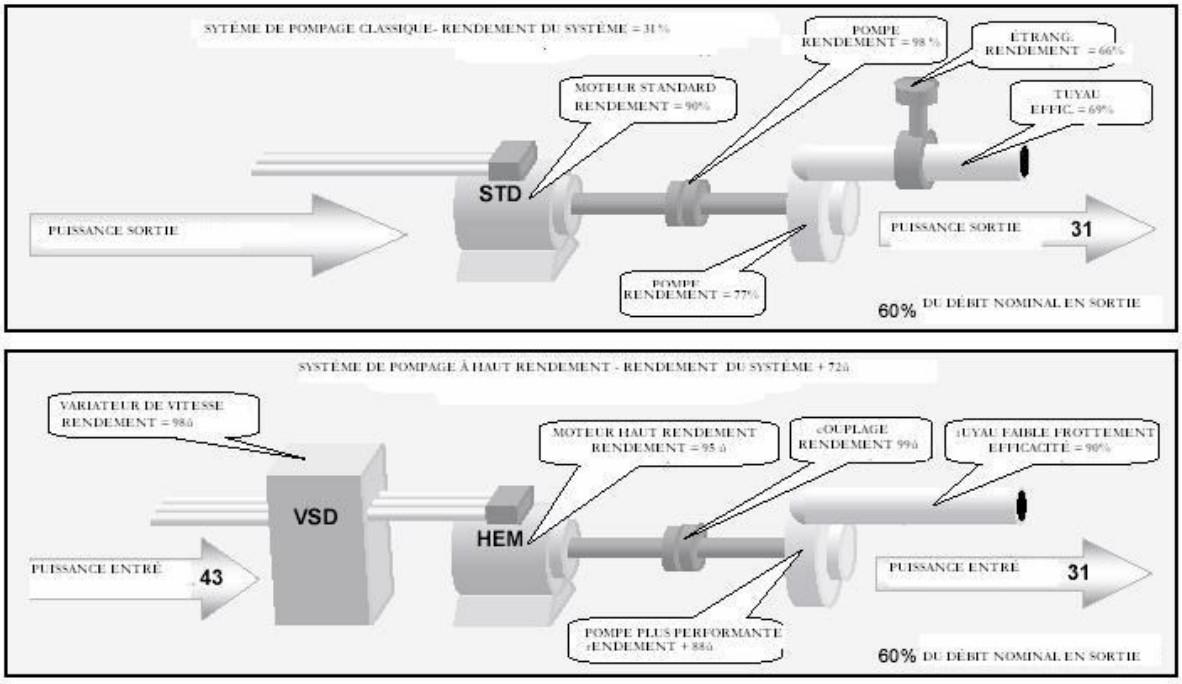


Figure 3.25: Schémas de deux systèmes de pompage : classique et à bon rendement énergétique [246, ISPRA, 2008]

Machine entraînée
Également dénommée machine de charge, il s'agit de la machine qui réalise une tâche à valeur ajoutée liée à la finalité ultime de l'installation industrielle. Les tâches effectuées peuvent être divisées en deux principales catégories car la machine entraînée peut :

- modifier des propriétés de différentes manières : modifier la pression (compression, pompage), modifier la forme physique (broyage, tréfilage, laminage des métaux, etc.). C'est la fonction de modification de la pression qui est utilisée dans les grands systèmes décrits de manière plus détaillée dans le présent document:
  - pompes (20 %), voir Section 3.8
  - ventilateurs (18 %), voir Section 3.9
  - compresseur d'air (17 %), voir Section 3.7
  - compresseurs de refroidissement (11 %), voir Section 3.4.2.

- déplacer ou transporter des matières / des objets (convoyeurs, grues, appareils de levage, treuils, etc.):

convoyeurs (4 %) et autres utilisations (30 %).

où (%) fait référence à l'énergie des moteurs utilisés dans l'UE des 15 par type de système.

De nombreux facteurs ont une influence sur la consommation électrique des systèmes moteurs, notamment :

- rendement du moteur ;
- dimensionnement correct ;
- commandes du moteur : arrêt/marche et régulation de vitesse ;
- qualité de l'alimentation ;
- système de transmission mécanique ;
- pratiques de maintenance ;
- efficacité du dispositif d'utilisation finale.

Afin de bénéficier du potentiel d'économies disponible, les utilisateurs doivent avoir pour objectif d'optimiser le système global dont fait partie le sous-système moteur, avant de prendre en considération la partie moteur (voir Sections 1.4.2 et 1.5.1, et les sections concernant les systèmes individuels du présent chapitre).

Transmission mécanique
La transmission mécanique relie mécaniquement la machine entraînée et le moteur. Il peut s'agir d'un simple accouplement rigide qui relie les bouts d'arbre de la machine et un moteur, d'une boîte d'engrenages, d'une transmission à chaîne ou à courroie, ou d'un accouplement hydraulique. Tous ces types de transmission mécanique induisent des pertes de puissance supplémentaires au niveau du système d'entraînement.

Moteur électrique
Les moteurs électriques se divisent en deux groupes principaux, les moteurs CC (courant continu) et les moteurs CA (courant alternatif). Ces deux types de moteurs existent dans l'industrie, mais les tendances technologiques de ces dernières décennies indiquent une forte évolution en faveur des moteurs CA.

Les points forts de moteurs CA sont les suivants :

- robustesse, conception simple, faibles exigences en maintenance
- niveau de rendement élevé (en particulier pour les moteurs à puissance élevée)
- relativement peu onéreux à l'achat.

Tous les moteurs CA à induction sont fréquemment utilisés en raison de ces points forts. Toutefois, ils ne fonctionnent qu'à une seule vitesse de rotation. Si la charge n'est pas stable, il est nécessaire de modifier la vitesse ce qui peut être réalisé de manière efficace au plan de l'énergie en installant un entraînement en amont du moteur.

Les moteurs électriques à alimentation unique sont le type de moteur électrique industriel le plus courant. Ils comprennent un enroulement multiphase unique qui participe activement au processus de transformation de l'énergie (c'est-à-dire à alimentation unique). Les machines électriques à alimentation unique fonctionnent avec :

- des moteurs à induction (asynchrones) qui offrent un couple de démarrage (bien que de manière inefficace) et peuvent fonctionner comme des machines indépendantes. La technologie des moteurs à induction est bien adaptée aux moteurs ayant une puissance pouvant atteindre plusieurs mégawatts ; ou avec
- des moteurs synchrones qui sont fondamentalement des machines à une seule vitesse. Ils ne produisent pas de couples de démarrage utiles et nécessitent des moyens auxiliaires pour le démarrage et le fonctionnement pratique, comme un variateur électronique. Les moteurs synchrones sont souvent construits pour des applications à puissance élevée comme les compresseurs dans l'industrie pétrochimique.

L'une des technologies à courant continu est celle du moteur synchrone, à « aimant permanent » (PM) ou sans balais ; elle est appropriée pour des applications nécessitant des vitesses de rotation plus faibles que celles généralement obtenues avec un moteur à induction. Dans ces applications à plus faible vitesse (220 à 600 tours/minute), comme les dénommés entraînements sectionnels des machines à papier ou à carton, on peut souvent faire l'économie d'une transmission mécanique (boîte d'engrenages) en utilisant des moteurs PM, ce qui améliore le rendement total du système.

Figure 3.26 : Moteur de compresseur avec une sortie nominale de 24 MW [95, Savolainen, 2005]

Les points forts des moteurs CC (courant continu) sont traditionnellement la facilité avec laquelle ils permettent d'assurer un contrôle électrique de la vitesse. Par ailleurs, le couple de démarrage est élevé, ce qui s'avère avantageux dans certaines applications. Toutefois, le développement rapide des composants de l'électronique de puissance et des algorithmes de contrôle a amélioré la « position » de la technologie CA de sorte qu'il n'existe plus de supériorité de performance réelle de la technologie CC sur la technologie CA. Les moteurs et les entraînements CA modernes surpassent les performances de leurs homologues CC à bien des égards. En d'autres termes, même les applications les plus exigeantes, telles que le contrôle de la vitesse et du couple des bobineuses à papier peuvent être réalisées avec des moteurs et des entraînements CA de nos jours.

Dispositif de commande
Dans sa forme la plus simple, il s'agit d'un commutateur ou d'un contacteur permettant de connecter le moteur au secteur et de l'en déconnecter. Il peut être actionné manuellement ou à distance grâce à une tension de commande. Des fonctions de protection du moteur peuvent avoir été incorporées dans ces dispositifs et un démarreur de moteur est un commutateur doté de fonctions de sécurité intégrées.

Une méthode plus élaborée pour connecter un moteur au réseau est un « démarreur progressif » (aka: démarreur étoile-triangle). Ce dispositif permet un démarrage modéré d'un moteur CA, en réduisant le dénommé « courant d'appel », au cours du démarrage et en protégeant ainsi la mécanique et les fusibles. Sans un dispositif de démarrage progressif, un moteur CA démarre et accélère vigoureusement jusqu'à sa vitesse nominale. Toutefois, un démarreur progressif N'EST PAS un dispositif d'économie d'énergie, contrairement à ce qu'affirment certaines sources, véhiculant des idées fausses.

La seule manière permettant aux dispositifs ci-dessus de contribuer à l'efficacité énergétique réside dans le fait que les moteurs peuvent être arrêtés lorsque leur fonctionnement n'est pas nécessaire.

Des dispositifs de commande moteur « dignes de ce nom » peuvent réguler la sortie (vitesse et couple) des moteurs électriques. Le principe de fonctionnement d'un entraînement CA consiste à transformer la fréquence de l'électricité du réseau (50 Hz en Europe) en une autre fréquence pour le moteur afin de lui permettre de modifier sa vitesse de rotation. Le dispositif de commande pour les moteurs CA est désigné comme suit :

- un « convertisseur de fréquence »,
- un « entraînement à vitesse variable » (EVV),
- un « entraînement à fréquence réglable » (AFD),
- une combinaison des éléments précédents (ASD, VFD) est fréquemment utilisée pour désigner les mêmes dispositifs,
- un « inverseur de moteur » ou simplement « un inverseur » qui est le terme actuellement employé dans l'industrie par les utilisateurs.

Les systèmes entraînés par moteur consomment environ 65 % de l'énergie industrielle dans l'Union Européenne. Le potentiel d'économies d'énergie dans les industries de l'UE-15 grâce

à l'emploi d'entraînements CA est de 43 TWh/an et pour l'amélioration du rendement des moteurs électriques proprement dit, de 15 TWh/an selon les études du programme SAVE de l'UE-15.

Il existe au moins deux manières différentes d'aborder le concept de l'efficacité énergétique dans les systèmes entraînés par moteur. La première consiste à observer les composants individuels et leurs rendements et à vérifier que seuls des équipements à rendement élevé sont employés. La seconde consiste à avoir une approche au niveau des systèmes, comme décrite dans l'introduction de la présente section, dans laquelle les économies réalisées pour des systèmes globaux peuvent être considérablement plus élevées.

3.6.1 Moteurs à haut rendement (EEM)

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux moteurs électriques sont présentées dans la Section 3.6.7).

Les moteurs à haut rendement (EEM), également dénommés moteurs à efficacité élevée (HEM), ont un meilleur rendement énergétique. Le coût d'achat supplémentaire initial est de 20 à 30%, ou plus, pour les moteurs d'une puissance supérieure à 20 kW et de 50 à 100 % pour les moteurs d'une puissance inférieure à 15 kW, selon la catégorie d'économies d'énergie (et donc la quantité d'utilisation supplémentaire d'acier et de cuivre), etc. Toutefois, les économies d'énergie peuvent être de l'ordre de 2 à 8 % pour des moteurs de 1 à 15 kW.

La réduction des pertes se traduit par une élévation moindre de la température dans le moteur, un allongement de la durée de vie de l'isolation du bobinage et des paliers. C'est pourquoi, dans de nombreux cas :

- la fiabilité augmente,
- les coûts de maintenance et d'arrêt sont réduits,
- la tolérance aux contraintes thermiques s'accroît,
- la capacité de résistance aux surcharges s'améliore,
- la résistance aux conditions de fonctionnement anormales – sous-tension et surtension, au déséquilibre de phases, aux variations de la forme de la puissance et du courant (par exemple les harmoniques), etc. – s'améliore,
- le facteur de puissance s'améliore,
- le bruit est réduit.

Un accord européen entre le Comité Européen de Constructeurs de Machines Électriques et d'Électronique de Puissance (CEMEP, European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) et la Commission européenne donne l'assurance que soient clairement affichés les niveaux de rendement de la plupart des moteurs électriques fabriqués en Europe. Ce schéma de classement des moteurs européens est applicable à tous les moteurs d'une puissance <100 kW et établit grosso modo trois classes de rendement, et donne ainsi aux constructeurs une motivation pour présenter des modèles ayant un meilleur rendement :

- EFF1 (moteurs à haut rendement),

- EFF2 (moteurs à rendement standard),
- EFF3 (moteur à faible rendement).

Ces classes de rendement s'appliquent aux moteurs à induction à cage, triphasés, à 2 et 4 pôles, dont le fonctionnement nominal est de 400 V, 50 Hz, de classe S1, avec une puissance de sortie allant de 1,1 à 90 kW, c'est-à-dire aux moteurs qui représentent la plus grande partie des ventes du marché. La Figure 3.27 représente le rendement de trois types de moteurs en fonction de leur puissance de sortie.

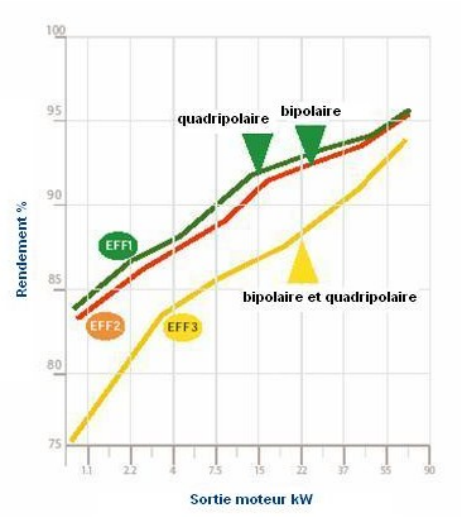


Figure 3.27 : Rendement des moteurs à induction triphasés

La directive Eco-conception (EuP) aboutira vraisemblablement à l'élimination des moteurs de classe EFF 3 et EFF 2 d'ici à 2011. La Commission électrotechnique internationale, au moment de la rédaction du présent document, travaille sur l'introduction d'un nouveau schéma de classification internationale, avec les moteurs de classe EFF2 et EFF# regroupés dans une même classe en fin de liste, et l'ajout d'une nouvelle classe au-dessus de EFF1.

Le choix du bon moteur peut être grandement facilité par l'utilisation d'un logiciel adapté comme Motor Master Plus[11] et EuroDEEM[12] qui sont proposés dans le cadre du projet EU-SAVE PROMOT.
Des solutions appropriées pour les moteurs peuvent être choisies avec l'aide de la base de données EuroDEEM[13], qui répertorie le rendement de plus de 3 500 types de moteurs de 24 constructeurs.

3.6.2 Dimensionnement correct

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que

[11] Sponsorisé par le Ministère de l'énergie des États-Unis

[12] Avec le support de la Commission européenne – DG TREN

[13] Publié par la Commission européenne

les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux moteurs électriques sont présentées dans la Section 3.6.7)

Les moteurs électriques sont souvent surdimensionnés et fonctionnent rarement à pleine charge. Dans l'Union européenne, des études de terrain indiquent que, en moyenne, les moteurs fonctionnent à environ 60% de leur capacité nominale

Pour les moteurs, le rendement maximal est obtenu entre 60 et 100 % de la pleine charge. Le rendement des moteurs à induction est habituellement à son maximum vers 75% de la pleine charge et il reste relativement plat jusqu'à 50% de charge. À moins de 40 % de la pleine charge, un moteur électrique ne fonctionne pas dans des conditions optimisées et le rendement chute très rapidement. Les moteurs de plus grande puissance peuvent fonctionner avec un rendement raisonnablement élevé à des charges de moins de 30% de la puissance nominale.

Un dimensionnement correct :

- améliore le rendement énergétique, en permettant aux moteurs de fonctionner à son rendement maximum ;
- peut réduire les pertes en ligne dues à des facteurs de puissance bas ;
- peut légèrement réduire la vitesse de fonctionnement, et donc la puissance consommée, des ventilateurs et des pompes.

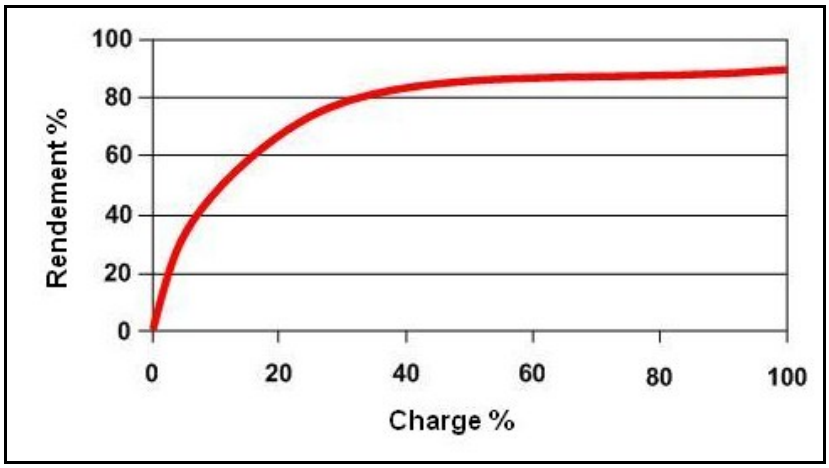


Figure 3.28 : Rendement d'un moteur électrique en fonction de la charge

3.6.3 Variateurs de vitesse

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux moteurs électriques sont présentées dans la Section 3.6.7)

L'ajustement de la vitesse du moteur, par l'utilisation d'entraînements à vitesse variable (EVV) peut conduire à des économies d'énergie significatives associées à un meilleur contrôle des procédés, une réduction de la fatigue des équipements mécaniques, une diminution du bruit. Quand la charge varie, les EVV permettent de réduire la consommation

d'énergie électrique, notamment des pompes centrifuges, des compresseurs et des ventilateurs, en règle générale dans un ordre de grandeur de -4 à 50%. Les applications de transformation des matières, faisant appel à des machines centrifuges, des broyeurs et des machines outils, et les applications de manutention avec des bobinoirs, des convoyeurs et des monte-charges peuvent aussi bénéficier, en termes de performance globale et de consommation énergétique, de l'utilisation des EVV.

L'utilisation des EVV apporte également d'autres avantages, notamment :

- accroître la plage de service utile des équipements entraînés ;
- isoler les moteurs de la ligne de travail, ce qui peut réduire les contraintes et les pertes de rendement ;
- synchroniser avec précision plusieurs moteurs ;
- améliorer la rapidité et la fiabilité de la réponse à des conditions de fonctionnement fluctuantes.

L'utilisation des entraînements à vitesse variable n'est pas adaptée à toutes les applications, notamment pour celles où la charge est constante (par ex. pour les ventilateurs d'introduction d'air des lits fluidisés, les compresseurs d'air à oxydation, etc.), car l'EVV sera à l'origine de pertes de l'ordre de 3 à 4 % de l'énergie en entrée (redressement et ajustement de la phase du courant).

3.6.4 Pertes dans les transmissions

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux moteurs électriques sont présentées dans la Section 3.6.7)

Il est primordial d'installer et d'entretenir correctement les équipements de transmission, notamment les arbres, les courroies, les chaînes et les engrenages. Le système de transmission entre le moteur et la charge est une source de pertes. Ces pertes peuvent varier considérablement, de 0 à 45 %. Chaque fois que cela est possible, préférer des courroies synchrones aux courroies trapézoïdales. Les courroies trapézoïdales dentées sont plus performantes que les courroies trapézoïdales classiques. Les engrenages hélicoïdaux sont nettement plus performants que les engrenages à vis sans fin. Un accouplement direct est toujours la meilleure option possible (lorsque cela est réalisable techniquement), et les courroies trapézoïdales sont toujours à éviter.

3.6.5 Réparation des moteurs

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux moteurs électriques sont présentées dans la Section 3.6.7)

Les moteurs de plus de 5 kW peuvent tomber en panne et il arrive souvent qu'ils soient réparés plusieurs fois pendant leur durée de vie. Les tests réalisés en laboratoire confirment que des réparations de mauvaise qualité réduisent en général le rendement du moteur de 0,5 à 1%, et parfois jusqu'à 4% voire même plus pour de vieux moteurs

Le choix entre réparation et remplacement doit se faire en prenant en compte le coût de l'électricité par kWh, la puissance du moteur, les facteurs de charge moyens et le nombre d'heures de fonctionnement par an. Il convient d'accorder une attention particulière au choix du procédé de réparation et du réparateur qui doit être agréé par le fabricant d'origine (réparateur pour moteur à haut rendement, EEMR).

On considère que le remplacement d'un moteur en panne par l'achat d'un nouveau moteur EEM peut être un bon choix pour des moteurs ayant un grand nombre d'heures de fonctionnement. Par exemple, dans une usine avec un fonctionnement de 4000 h par an, pour un coût d'électricité de 0,06 EUR/kWh, pour des moteurs de puissance comprise entre 20 et 130 kW, le remplacement par un moteur EEM a une période de retour sur investissement inférieure à 3 ans.

3.6.6 Rebobinage

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux moteurs électriques sont présentées dans la Section 3.6.7)

Le rebobinage des moteurs est une pratique courante dans l'industrie. Il est moins onéreux et peut s'avérer plus rapide que l'achat d'un nouveau moteur. Néanmoins, le rebobinage d'un moteur peut entraîner une réduction permanente de son rendement, supérieure à 1 %. Une attention toute particulière doit être apportée au choix du procédé de réparation et du réparateur ce dernier devant être agréé par le fabricant d'origine (réparateur pour moteur à haut rendement, EEMR). Le surcoût que représente l'achat d'un nouveau moteur peut être rapidement compensé par son meilleur rendement, aussi le rebobinage peut-il ne pas être rentable au regard du coût de possession sur la durée de vie.

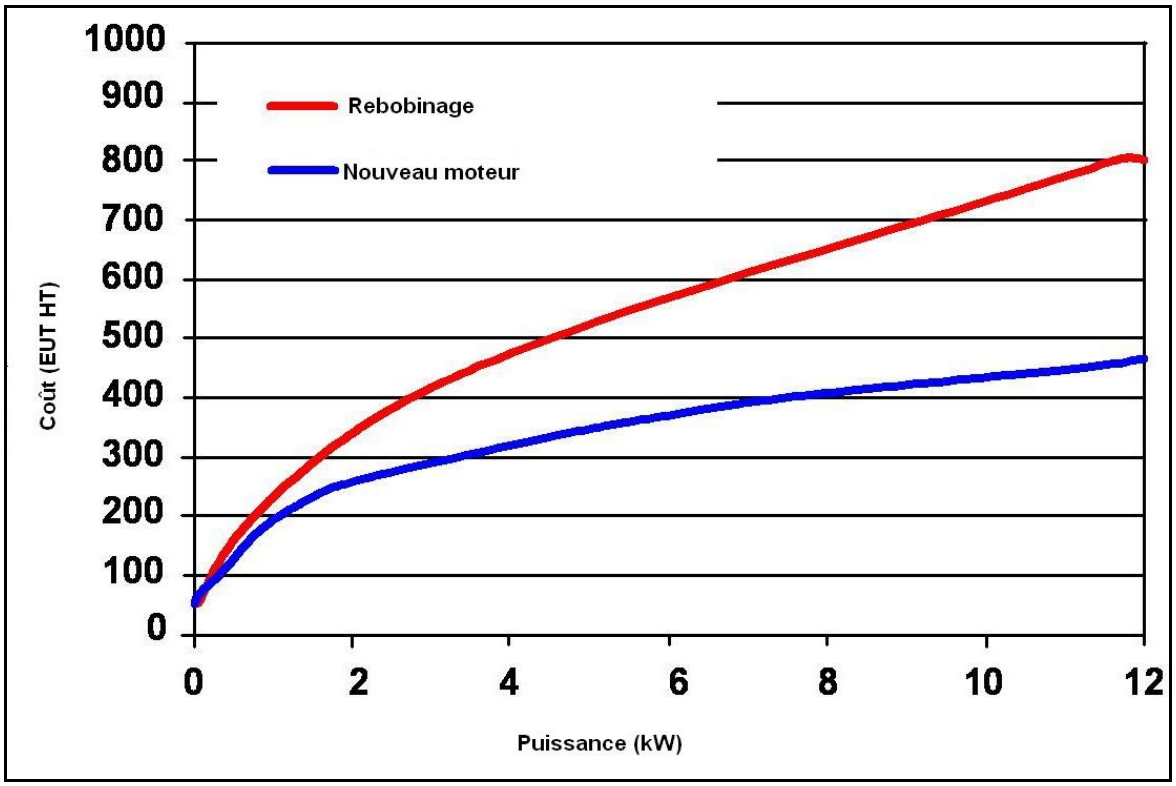


Figure : 3.29 : Coût d'un nouveau moteur comparé à celui d'un rebobinage

3.6.7 Avantages obtenus pour l'environnement, effets croisés, applicabilité et autres considérations concernant les techniques d'efficacité énergétique pour les moteurs électriques

Avantages obtenus pour l'environnement

Le Tableau 3.22 indique les principales mesures d'économie d'énergie pouvant être appliquées à un sous-système entraîné par moteur. Bien que les valeurs dans le tableau soient des moyennes types, leur applicabilité dépendra des caractéristiques précises de chaque installation.

Sous-système entraîné par moteur	**Plages d'économies types**
Installation ou rénovation du système	
Moteurs à haut rendement (EEM)	2 – 8 %
Dimensionnement correct	1 – 3 %
Réparation des moteurs à haut rendement (EEMR)	0,5 – 2 %
Entraînements à vitesse variable (EES)	-4 – 50 %
Transmission/réducteurs à haut rendement	2 – 10 %
Contrôle de la qualité de puissance	0,5 – 3 %
Fonctionnement et maintenance du système	
Lubrication, ajustements, calage	1 – 5 %

Tableau 3.22 : Mesures d'économie d'énergie dans les sous-systèmes d'entraînement

Effets croisés
Les harmoniques provoquées par les régulateurs de vitesse etc., induisent des pertes dans les moteurs et les transformateurs (voir Section 3.5.2). Un EEM consomme davantage de ressources naturelles (cuivre et acier) pour sa production.

Applicabilité
Les entraînements par moteurs électriques existent dans pratiquement toutes les installations industrielles disposant d'électricité.

L'applicabilité de mesures particulières, et leur portée en termes d'économie d'argent, dépendent de la taille et de la nature précise de l'installation. Une évaluation des besoins de l'installation dans son ensemble et du système en son sein permet de déterminer les mesures à la fois faisables et rentables. Cette analyse doit être menée par un prestataire compétent ou par du personnel technique interne qualifié. En particulier, cette évaluation est capitale pour les entraînements à vitesse variable et les moteurs à haut rendement pour lesquels il existe un risque de consommer davantage d'énergie au lieu de réaliser des économies. Il est nécessaire de traiter les nouvelles conceptions de motorisation à partir du remplacement de pièces dans les applications existantes. Les conclusions de l'évaluation doivent identifier les mesures applicables à un système et comporter une estimation des économies, du coût de la mesure ainsi que de la période de retour sur investissement.

Par exemple, les EEM comprennent davantage de matière (cuivre et acier) que les moteurs de moindre efficacité. En conséquence, un EEM possède un rendement plus élevé mais également une fréquence de glissement moindre (qui se traduit par une augmentation du nombre de tours/minute) et par un courant d'appel plus élevé qu'un moteur de rendement standard. Les exemples ci-après montrent des cas où l'utilisation d'un EEM n'est pas la solution optimale :

- lorsqu'un système CVC fonctionne à pleine charge, le remplacement d'un EEM augmente la vitesse des ventilateurs (en raison du moindre glissement) et par conséquent la charge du couple. L'utilisation d'un EEM dans ce cas apporte une élévation de la consommation d'énergie par rapport à l'emploi d'un moteur de rendement standard. La conception doit avoir pour objectif de ne pas augmenter le nombre final de tours/minute ;
- si l'application fonctionne moins de 1000 à 2000 heures par an (entraînements intermittents), l'EEM risque de ne pas avoir d'effet significatif sur les économies d'énergie (voir la rubrique Aspects économiques, ci-dessous)
- si l'application doit démarrer et s'arrêter fréquemment, les économies peuvent être perdues en raison de la présence d'un courant d'appel plus élevé avec un EEM
- si l'application fonctionne principalement à charge partielle (par exemple pompes) mais sur de longues durées, les économies réalisées avec l'emploi d'un EEM sont négligeables et un EVV va augmenter les économies d'énergie.

Aspects économiques
Le prix d'un moteur EEM est d'environ 20 % plus élevé que celui d'un moteur classique. La Figure 3.30 présente les coûts approximatifs associés à l'exploitation d'un moteur sur sa durée de vie :

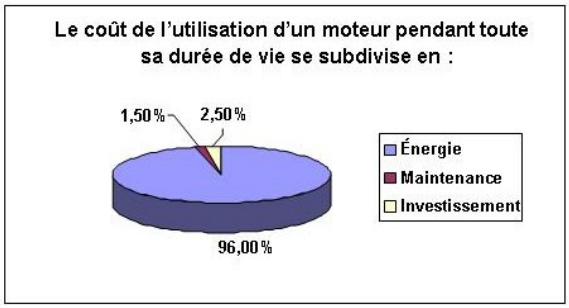


Figure 3.30 : Coûts d'un moteur électrique sur sa durée de vie

Lors de l'achat ou de la réparation d'un moteur, il est vraiment important de tenir compte de la consommation d'énergie et de la minimiser comme suit :

- la période de retour sur investissement peut être égale ou inférieure à une année avec des moteurs CA
- les moteurs à haut rendement ont une durée de retour sur investissement plus longue.

Calcul des retombées de cette technique efficace au plan de l'énergie, par exemple l'achat d'un moteur à haut rendement par rapport au rebobinage d'un moteur standard en panne :

Retour sur investissement (en années) =

$$\frac{Coût_{HEM} - Coût_{ancien}}{kW \times H \times Coût_{électricité} \times \left[\frac{1}{\eta_{rebobiné}} - \frac{1}{\eta_{HEM}}\right]}$$

Équation 3.11

où :

- $coût_{HEM}$ = coût du nouveau moteur à haut rendement
- $coût_{ancien}$ = coût du rebobinage du moteur ancien
- $coût_{électricité}$ = coût de l'électricité
- kW = consommation électrique moyenne par moteur en fonctionnement.

Agents moteurs pour la mise en œuvre

- Les moteurs CA sont souvent installés afin d'améliorer le contrôle-commande des machines
- D'autres facteurs sont importants lors du choix des moteurs : par exemple sécurité, qualité et fiabilité, puissance réactive, intervalle de maintenance.

Exemples

- LKAB (Suède) – cette société minière consomme 1700 gigawattheures d'électricité par an, dont 90 % sont utilisés pour alimenter 15 000 moteurs. Le choix de moteurs à haut rendement a permis à LKAB de réduire sa facture d'énergie annuelle de plusieurs centaines de milliers de dollars (aucune date)
- Usine de conditionnement d'aliments Heinz (Royaume-Uni) : un nouveau centre de l'énergie sera de 14 % plus rentable grâce à des ventilateurs d'air de combustion

actionnés par des moteurs CA. Le centre de l'énergie comporte quatre chaudières et a remplacé la chaudière existante.

Références bibliographiques
[137, EC, , 139, US_DOE, , 231, The motor challenge programme, 232, 60034-30]

3.7 Systèmes d'air comprimé (SAC)

[168, PNEUROP, 2007, 169, EC, 1993, 194, ADEME, 2007] [189, Radgen&Blaustein, 2001, 196, Wikipedia]

Description
L'air comprimé est de l'air stocké et utilisé à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Les systèmes d'air comprimé prennent une masse d'air donnée, qui occupe un volume donné et la comprime en un volume plus petit.

L'air comprimé représente jusqu'à 10 % de la consommation industrielle d'électricité, ou plus de 80 TWh par an dans l'Union Européenne des 15.

L'air comprimé est utilisé de deux manières :

- en tant que partie intégrante des procédés industriels, par exemple :
  - fourniture d'azote de faible pureté pour obtenir une atmosphère inerte
  - fourniture d'oxygène de faible pureté dans les procédés d'oxydation, par exemple traitement des eaux résiduaires
  - pour les salles blanches, la protection contre les contaminants, etc.
  - mélange dans les procédés à température élevée, par exemple acier et verre
  - soufflage des fibres de verre et des conteneurs en verre ;
  - moulages des plastiques
  - tri pneumatique ;
- en tant que fluide d'énergie, par exemple
  - entraînement des outils pneumatiques
  - entraînement des actionneurs pneumatiques (par exemple vérins).

L'utilisation prédominante d'air comprimé dans les applications relevant de l'IPPC figure en tant que composante intégrante des procédés industriels. La pression, la pureté de l'air comprimé et le profil de la demande sont prédéterminés par le procédé proprement dit.

L'air comprimé est intrinsèquement propre et sûr en raison de son faible risque d'inflammation ou d'explosion soit directement, soit par des éléments ayant accumulé de la chaleur : il est, de ce fait, fréquemment employé en zones dangereuses dans l'industrie chimique et dans les industries associées. À l'inverse de l'électricité, il n'est pas tributaire d'une canalisation ou d'un câble de « retour ». Lorsqu'il est utilisé pour entraîner des outils, il permet d'avoir une densité de puissance élevée et, dans le cas des outils à déplacement positif, un couple constant à pression constante y compris à de faibles vitesses de rotation, ce qui constitue un avantage par rapport aux outils électriques pour de nombreuses applications. Par ailleurs, il s'adapte facilement aux fluctuations des exigences de production (souvent dans des situations de production à volume élevé), et il peut être utilisé avec ses propres commandes

logiques pneumatiques. Son installation est facile (bien que ces dernières soient peu à peu détrônées par des commandes électroniques devenues disponibles à des coûts inférieurs).

Les dispositifs mécaniques pneumatiques sont souvent utilisés pour des mouvements linéaires courts, rapides mettant en jeu des forces de faible intensité ou pour créer des forces de forte intensité à basse vitesse, comme pour l'entraînement des outils et des procédés d'assemblage (manuels ou automatisés). Il existe des dispositifs électriques pouvant être utilisés aux mêmes fins comme les moteurs à aimants pour les mouvements rapides, courts et des moteurs avec des entraînements à tige filetée pour les forces élevées. Toutefois, les outils pneumatiques sont pratiques en raison de leur excellent rapport poids-puissance qui les rend utiles sur de longues durées sans surchauffe et avec de faibles coûts de maintenance.

Toutefois, en l'absence de toute autre force d'entraînement, il est nécessaire d'étudier les alternatives à l'emploi de l'air comprimé.

La fourniture d'air comprimé fait souvent intégralement partie de la conception de l'installation et doit être analysée en parallèle avec la demande globale en air comprimé de l'installation. Dans les applications relevant de l'IPPC, le système d'air comprimé est un grand consommateur d'énergie et la part de l'énergie totale utilisée dans les installations peut varier entre 5 et 25 %. En raison de l'intérêt accru pour l'efficacité énergétique, les fabricants de compresseurs et d'équipements associés ont mis au point des technologies et des outils pour l'optimisation des systèmes d'air comprimé existants et pour la conception de solutions nouvelles et plus efficaces.

De nos jours, les investissements sont régis par des analyses de coût sur la durée de vie, en particulier lorsqu'il s'agit de la fourniture d'un nouveau système d'air comprimé. L'efficacité énergétique est considérée comme un paramètre majeur de la conception des systèmes d'air comprimé et il existe encore un potentiel d'optimisation des systèmes d'air comprimé existants. La durée de vie d'un gros compresseur est estimée à 15 à 20 ans. Pendant cette période, le profil de la demande d'une installation peut varier et devoir être réévalué, et de surcroît de nouvelles technologies deviennent disponibles pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes existants.

En règle générale, le choix d'un fluide énergétique (par exemple air comprimé) dépend de nombreux paramètres de l'application et doit faire l'objet d'une analyse au cas par cas.

Efficacité énergétique des systèmes d'air comprimé

Dans la plupart des pratiques majeures de l'industrie de transformation, l'air comprimé fait intégralement partie du procédé industriel. Dans la majorité de ces applications, il s'agit de la seule technologie facilement disponible pour effectuer le procédé tel quel, c'est-à-dire sans réaménagement majeur de la conception. Dans de telles situations, l'efficacité énergétique des SAC est principalement ou exclusivement déterminée par le rendement de la production d'air comprimé, de son traitement et de sa distribution.

Le rendement énergétique de la production, du traitement et de la distribution de l'air comprimé est prédéterminé par la qualité de la planification, de la fabrication et de la maintenance du système. L'objectif d'une conception experte est de fournir de l'air comprimé adapté aux besoins de l'application. Une bonne compréhension de l'application et de la demande en air comprimé doit être identifiée avant la mise en œuvre d'une ou de plusieurs techniques d'efficacité énergétique. Il semble raisonnable d'incorporer ces techniques dans un

système de management de l'énergie où un audit du système d'air comprimé fiable est étayé par une base de données de bonne qualité (voir Sections 2.1 et 2.15.1).

En 2000, une étude réalisée dans le cadre du programme européen SAVE a analysé les potentiels d'efficacité énergétique d'un SAC. Bien que cette analyse couvre toutes les applications et que les SAC des installations relevant de l'IPPC soient généralement plus gros qu'un SAC industriel moyen, elle fournit une bonne vue générale des mesures applicables en vue de l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un SAC.

Le tableau 3.23 présente un résumé :

Mesure d'économies d'énergie	**Applicabilité en % (1)**	**Gains en % (2)**	**Contribution potentielle en % (3)**	**Commentaires**
Installation ou rénovation du système				
Amélioration des entraînements (moteurs à haut rendement)	25	2	0,5	Meilleur rapport coût-efficacité des petits systèmes (<10 kW)
Amélioration des entraînements (régulateur de vitesse)	25	15	3,8	Applicable à des systèmes à charge variable. Dans les installations multimachines, une seule machine doit être équipée d'un entraînement à vitesse variable. Le gain estimé concerne l'amélioration globale des systèmes, qu'ils soient mono ou multimachines.
Modernisation du compresseur	30	7	2,1	
Emploi de système de commande sophistiqué	20	12	2,4	
Récupération de la chaleur perdue en vue de son utilisation dans d'autres fonctions	20	20 – 80	4,0	Remarque : le gain est exprimé en termes d'énergie et non pas de consommation électrique, étant donné que l'électricité est convertie en chaleur utile
Amélioration du refroidissement, du séchage et de la filtration	10	5	0,5	Ceci ne comporte pas une augmentation de la fréquence de remplacement des filtres (voir ci-dessous)
Conception globale du système incluant des systèmes multipression	50	9	4,5	
Réduction des pertes de pression par frottement	50	3	1,5	

(par ex. par une augmentation du diamètre des canalisations)				
Optimisation de certains dispositifs d'utilisation finale	5	40	2,0	
Fonctionnement et maintenance du système				
Réduction des fuites d'air	80	20	16,0	Gains potentiels plus importants
Augmentation de la fréquence de remplacement des filtres	40	2	0,8	
TOTAL			**32,9**	
Légende du tableau : (1) % de SAC où cette mesure est applicable et de bon rapport coût-efficacité (2) réduction en % de la consommation d'énergie annuelle (3) contribution potentielle = applicabilité * réduction				

Tableau 3.23 : Mesures d'économies d'énergie dans les systèmes d'air comprimé [168, PNEUROP, 2007]

En cas d'utilisation de l'air comprimé pour l'entraînement des outils, il faut prendre en compte le fait que « le rendement mécanique » est défini comme « la puissance à l'arbre de l'outil divisée par la puissance électrique totale en entrée nécessaire pour produire l'air comprimé consommé par l'outil » et il se situe généralement dans la plage de 10 à 15 %.

Avantages obtenus pour l'environnement

La plupart des techniques utilisées pour la conception ou la modification d'un SAC ont pour objectif d'améliorer le rendement énergétique du système. Les avantages découlant de l'amélioration du rendement énergétique d'un SAC comprennent la réduction des émissions sonores et de l'utilisation de l'eau de refroidissement. La durée de vie des SAC et des compresseurs est relativement élevée, c'est pourquoi l'utilisation de matériaux dans les équipements de remplacement est faible.

Effets croisés

Les émissions sont limitées à des émissions sonores et des brouillards d'huile. Les autres impacts sur l'environnement d'un SAC sont mineurs par rapport à la consommation d'énergie.

Dans la plupart des installations, le SAC est un sous-système indépendant. La plupart des modifications possibles dans ces systèmes n'ont aucune influence sur les autres systèmes ou procédés. La consommation d'énergie d'un SAC doit être évaluée lorsqu'il est utilisé dans d'autres procédés, voir Section 1.3.

Données opérationnelles

Composants d'un système d'air comprimé

Un système d'air comprimé est une combinaison de quatre sous-systèmes indépendants de l'application :

- génération de l'air comprimé
- stockage de l'air comprimé
- traitement de l'air comprimé

- réseau de distribution de l'air comprimé.

En outre, il comporte des systèmes auxiliaires tels que récupération de chaleur ou traitement des condensats.

Le tableau 3.24 représente les composants types des sous-systèmes :

Génération	Stockage	Traitement	Distribution	Systèmes auxiliaires
Compresseur	cuve	Sécheur	Canalisation	Récupération de chaleur
Contrôleur		Filtre	Vannes	Purges de condensat
Refroidisseur				

Tableau 3.24 : Composants types d'un système d'air comprimé
[168, PNEUROP, 2007]

La figure 3.31 représente un schéma des composants types d'un système d'air comprimé.

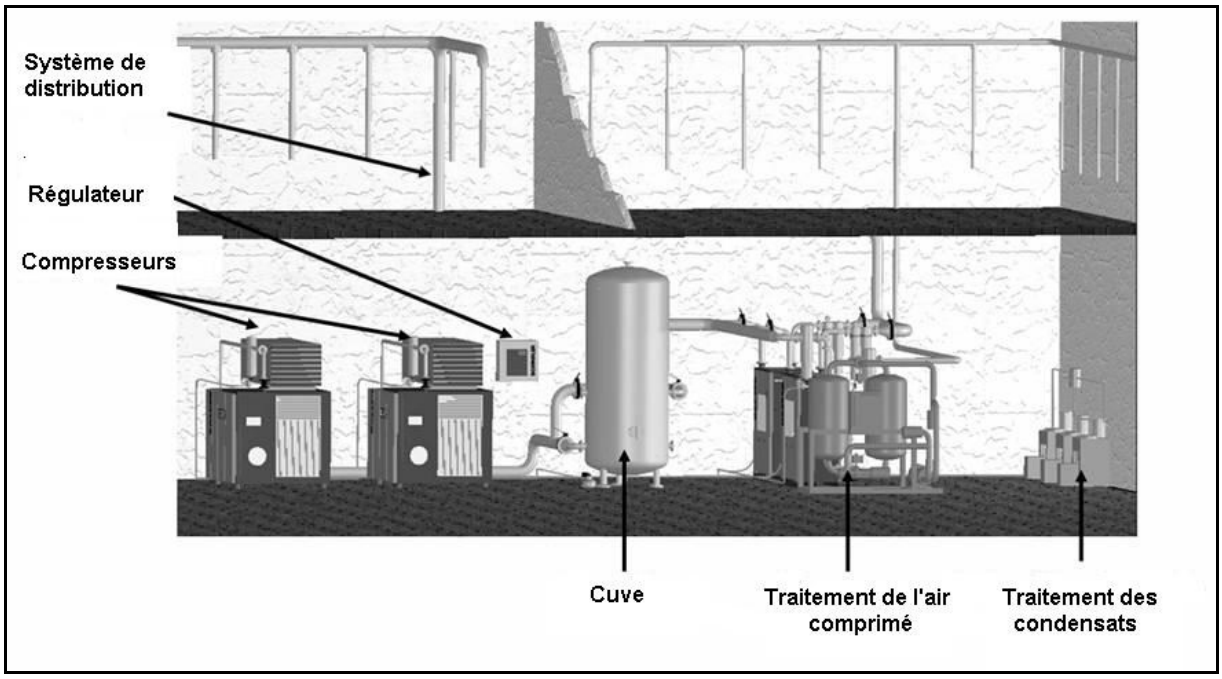


Figure 3.31 : Composants types d'un système d'air comprimé (SAC)
[168, PNEUROP, 2007]

La majorité des installations ont une station multi-compresseur avec un traitement central de l'air comprimé et un grand système de distribution. En outre, des machines telles que des métiers à tisser ou des dispositifs de fabrication du verre comportent souvent un système d'air comprimé intégré, dédié. Il n'existe aucune conception de système standard pour des applications spécifiques. En fonction du procédé et des paramètres, il est nécessaire de choisir les bons composants et de gérer leur interaction.

Types de compresseurs

Le rendement varie en fonction du type et de la conception du compresseur. Le rendement, et par conséquent les coûts d'exploitation sont des facteurs clés pour le choix d'un compresseur, mais ce choix peut être déterminé par la qualité et la quantité d'air comprimé requises.

Il existe deux groupes principaux de compresseurs d'air : les compresseurs volumétriques et les compresseurs dynamiques. Ces deux groupes se subdivisent à leur tour par type de compresseur comme représenté sur la Figure 3.32 et présenté en détail dans le texte ci-dessous.

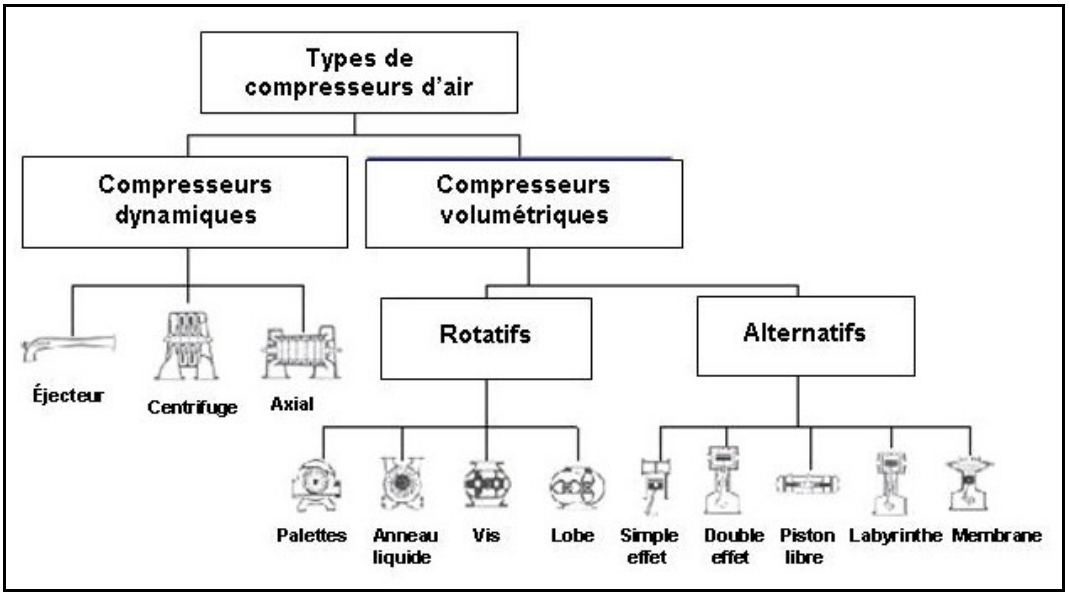


Figure 3.32 : Types de compresseurs
[168, PNEUROP, 2007]

- **les compresseurs volumétriques** augmentent la pression d'une quantité d'air donnée en réduisant l'espace occupé par l'air à sa pression d'origine. Il en existe deux modèles principaux : les compresseurs à piston et les compresseurs rotatifs. Chacun de ces deux modèles sont en outre classés selon différentes technologies :

    - *les compresseurs à piston* comportent un piston qui se déplace à l'intérieur d'un cylindre pour comprimer de l'air basse pression en haute pression. Ils sont disponibles en configurations à simple effet et à double effet ;
    - *les compresseurs rotatifs* sont les compresseurs les plus fréquemment employés dans l'industrie, dans la plage de 40 (30 kW) à 500 hp (373 kW). Ils sont disponibles en configuration lubrifiée et exempte d'huile. La popularité des compresseurs rotatifs est due à leur conception relativement simple, leur facilité d'installation, leur faible exigence en maintenance de routine, leur facilité de maintenance, leur longue durée de vie et leur coût raisonnable ;

- **les compresseurs dynamiques** sont des machines rotatives à flux continu dans lesquels l'élément tournant rapidement accélère l'air lorsqu'il le traverse, en transformant la charge dynamique en pression, partiellement dans l'élément rotatif et partiellement dans les diffuseurs ou lames stationnaires. La capacité d'un compresseur dynamique varie considérablement avec la pression de service.

Applicabilité

Chaque système d'air comprimé est une application complexe qui nécessite une bonne compétence pour sa conception et l'application de techniques particulières. La conception dépend de nombreux paramètres, tels que :

- le profil de la demande (incluant la demande de pointe)
- la qualité de l'air comprimé nécessaire
- la pression
- les contraintes spatiales imposées par le bâtiment et/ou l'installation.

A titre d'exemple, la norme ISO 8573-1 classe la qualité de l'air comprimé en fonction de trois types de contaminants. Il existe plusieurs classes correspondant aux plages de pureté nécessaire par contaminant dans différentes applications :

- matières solides 8 classes
- humidité et eau liquide 10 classes
- teneur totale en huile 5 classes.

De surcroît, il est impossible d'évaluer comparativement l'application de techniques d'efficacité énergétique pour des systèmes totalement différents, comme on peut le voir avec les deux profils de demande représentés sur la Figure 3.33 :

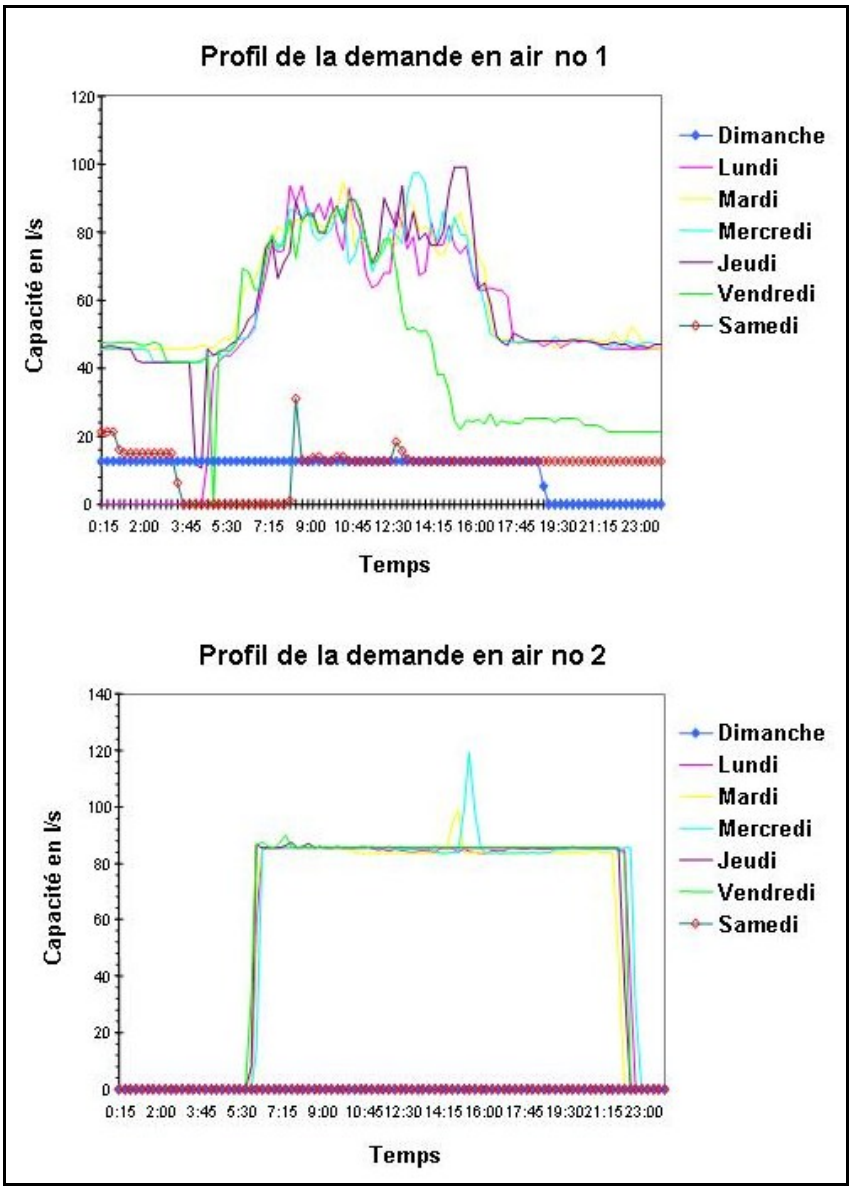


Figure 3.33 : Différents profils de demande
[168, PNEUROP, 2007]

La description des techniques ci-après (voir Section 3.7.1 à 3.7.11) donne un bref aperçu des possibilités. Un système expert et une analyse de la demande sont les conditions préalables indispensables à une nouvelle conception ou à l'optimisation d'un SAC.

Comme décrit dans le chapitre 2, les modifications des systèmes complexes doivent être évaluées au cas par cas.

Aspects économiques

Le prix de l'air comprimé en Europe varie fortement d'une société à l'autre, et va de 0,006 EUR à 0,097 EUR par Nm^3 (selon les chiffres établis par le cabinet de conseil NUS Consulting, en 2006 la fourchette du prix de l'électricité allait de 0,052 EUR/kWh en Finlande à 0,1714 EUR/kWh au Danemark). On estime que 75 % du prix de l'air comprimé est attribuable à l'énergie et que seulement 13 % correspondent aux investissements et 12 % à

la maintenance (ces chiffres reposent sur une utilisation de 6000 heures/an sur cinq ans). Les fluctuations de son coût sont principalement dues à la différence entre une installation optimisée et une installation n'ayant pas été optimisée. Il est capital de tenir compte de ce paramètre clé à la fois lors de la conception d'une installation et lors de l'exploitation d'une installation existante.

Le coût énergétique de l'air comprimé est exprimé en termes de consommation énergétique spécifique (SEC) en Wh/Nm^3. Pour une installation dimensionnée correctement et bien gérée, fonctionnant à un débit nominal et à une pression de 7 bars, il est possible de prendre comme référence (cette référence prend en compte différentes technologies de compresseurs) ce qui suit :

$$85\ Wh/Nm^3 < SEC < 130\ Wh/Nm^3$$ [194, ADEME, 2007]

Ce rapport représente la qualité de la conception et de la gestion de l'installation d'air comprimé. Il est important de le connaître et de le surveiller (voir Analyse comparative, Section 2.16), parce qu'il peut se détériorer rapidement, et entraîner une forte augmentation du prix de l'air.

Des initiatives ont déjà été prises par les sociétés et les fabricants des États membres dans le domaine de l'amélioration de l'efficacité énergétique. De tels programmes ont montré un bon retour sur investissement de la mise en œuvre des techniques décrites.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
L'amélioration de l'efficacité énergétique associée à des périodes d'amortissement de courte durée est la motivation principale pour la mise en oeuvre des techniques décrites (forces normales du marché).

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[190, Druckluft, , 191, Druckluft, , 193, Druckluft] [168, PNEUROP, 2007]

3.7.1 Conception du système

Description
De nos jours, de nombreux systèmes d'air comprimé existants auraient besoin d'une mise à jour de leur conception globale. L'installation de compresseurs supplémentaires et la mise en œuvre de diverses applications à différents stades de la durée de vie de l'installation, sans que soit repensé parallèlement le système d'origine se sont souvent traduites par des performances sous-optimales du SAC.

La pression est un paramètre fondamental d'un SAC. Un certain nombre de demandes en pression, selon l'application, débouchent habituellement sur un compromis entre les basses pressions qui donnent un meilleur rendement énergétique et les hautes pressions qui permettent d'employer des dispositifs plus petits et moins onéreux. La majorité des consommateurs utilise une pression d'environ 6 bars (g), mais il existe des demandes pour des

pressions pouvant atteindre 13 bars (g). Souvent la pression retenue est celle permettant de satisfaire la demande en pression la plus élevée.

Il est important de tenir compte du fait qu'une pression trop basse entraîne un dysfonctionnement de certaines machines, tandis qu'une pression plus élevée que nécessaire n'entraîne pas de dysfonctionnement mais une diminution du rendement. Dans de nombreux cas, la pression du système est de 8 ou 10 bars (g), mais la majeure partie de l'air est ramené à 6 bars (g) au moyen de vannes réductrices de pression.

Il est judicieux de choisir une pression qui répond à 95 % de tous les besoins et d'utiliser un petit dispositif d'augmentation de pression pour le reste. Les exploitants essaient d'éliminer les dispositifs nécessitant une pression supérieure à 6 bars (g), ou d'avoir deux systèmes avec des pressions différentes, l'un avec une pression plus élevée et l'autre pour 6,5 bars (g).

Le choix du volume de stockage est un autre paramètre fondamental. Comme la demande en air comprimé provient généralement de nombreux dispositifs différents, qui pour la plupart fonctionnent par intermittence, il existe des fluctuations de la demande en air. Un volume de stockage permet d'en réduire les fluctuations et de répondre aux demandes de pointe sur un temps très court (voir Section 3.7.10).

Une demande lissée permet de faire appel à compresseurs plus petits fonctionnant à un régime plus stable, avec une réduction des temps d'inactivité et par conséquent une diminution de l'énergie électrique nécessaire. Les systèmes peuvent être équipés de plusieurs cuves de stockage de l'air. Le choix stratégique consistant à implanter des cuves de stockage à proximité des sources à forte demande sur une courte période peut également s'avérer efficace, en permettant de satisfaire la demande de pointe tout en réduisant les pressions systèmes.

Le dimensionnement des canalisations et l'emplacement des compresseurs constituent un troisième paramètre fondamental pour la conception d'un système d'air comprimé. Tout type d'obstruction, de rétrécissement ou de rugosité dans le système va entraîner une résistance à l'écoulement de l'air et une perte de charge ; il en va de même des grandes longueurs de canalisation. Dans le réseau de distribution, les pertes de charge les plus élevées se situent habituellement aux points d'utilisation, ainsi qu'au niveau des tuyaux souples sous-dimensionnés, des raccords rapides, des filtres, des régulateurs et des lubrificateurs. Par ailleurs, l'utilisation de canalisation soudée permet de réduire les pertes par frottement.

Parfois, la demande en air a augmenté «structurellement » au fil des ans et une branche autrefois secondaire de la canalisation, dotée d'un petit diamètre, doit maintenant acheminer un flux volumique plus élevé, ce qui se traduit par une perte de charge. Dans d'autres cas, un équipement n'est plus utilisé. Le débit d'air acheminé à cet équipement inutilisé doit être stoppé le plus loin possible en amont dans le réseau de distribution sans avoir d'incidence sur les équipements en fonctionnement.

Un système correctement conçu doit avoir une perte de pression inférieure à 10 % de la pression de sortie du compresseur au point d'utilisation. Cette valeur peut être atteinte par : une surveillance régulière des pertes de pression, un choix de sécheurs, filtres, tuyaux souples et raccords rapides à faible perte de charge en fonctionnement nominal, une réduction des

distances d'acheminement de l'air dans le réseau de distribution et un nouveau calcul du diamètre des canalisations s'il existe de nouvelles demandes en air.

L'expression « conception globale du système » désigne souvent sous une forme abrégée, la définition du concept d'utilisation de l'air comprimé. Il peut s'ensuivre une utilisation inappropriée, par exemple, une surpressurisation suivie d'une détente pour atteindre la pression correcte, mais ces situations sont rares. Dans l'industrie de nos jours, la plupart des utilisateurs sont conscients du fait que l'air comprimé est un facteur de coût important.

Avantages obtenus pour l'environnement
Le maintien dans le temps d'une conception à la pointe de la technique pour les systèmes d'air comprimé, contribue à une réduction de la consommation d'énergie électrique.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Un meilleur rendement nécessite parfois des équipements en nombre supérieur et meilleurs (des conduites, des filtres, etc. plus gros et en nombre supérieur).

Applicabilité
Il existe de nombreux systèmes d'air comprimé (selon les estimations, jusqu'à 50 % de tous les systèmes), qui pourraient être améliorés par une révision de leur conception globale, avec un gain de 9 % obtenu par une réduction de la pression et avec un meilleur dimensionnement des cuves (dans 50 % des systèmes) et de 3 % par une réduction des pertes de charge dans les canalisations (dans 50 % des systèmes), ce qui se traduit par 6 % = 0,5 x (0,09 + 0,03) d'économies d'énergie.

La conception du système peut également comprendre l'optimisation de certains dispositifs d'utilisation finale ; en général dans 5 % de tous les systèmes, il est possible de réduire une demande de quelques 40 %, ce qui se traduit par 2 % d'économie d'énergie (c'est-à-dire 0,05 x 0,4).

Aspects économiques et agent moteur pour la mise en œuvre
Les coûts d'une révision d'un système d'air comprimé avec un réajustement consécutif de la pression et un renouvellement des canalisations est difficile à calculer et dépend beaucoup de la situation de l'installation. Les économies dans un système de taille moyenne de 50 kW peuvent être estimées comme suit :

50 kW x 3000 h/an x 0.08 EUR/kW x 10 % = 1200 EUR/an

Les coûts d'une révision majeure d'un tel système, en ajoutant une cuve de 90 litres à proximité d'un consommateur critique et une vanne de fermeture pour une branche rarement utilisée, en remplaçant 20 mètres de canalisation, 10 tuyaux souples et des déconnecteurs s'élèvent à environ 2000 EUR ; la période de retour sur investissement est de 1,7 an. Souvent, les coûts sont inférieurs, lorsqu'il s'agit seulement de procéder à des réajustements de pression, mais dans chaque cas, il est nécessaire d'étudier complètement la pression tolérable la plus faible pouvant satisfaire les besoins.

Les aspects économiques sont un agent moteur de la révision des systèmes d'air comprimé. Un obstacle majeur est le manque de connaissance des systèmes d'air comprimé et/ou de personnel compétent qui en est responsable. Le personnel technique peut être conscient du fait que l'air comprimé est onéreux, mais les inefficacités ne sont pas évidentes à déceler à première vue et l'exploitant ne dispose pas nécessairement de personnel doté d'une expérience suffisamment approfondie.

Dans de nombreux pays de l'Union européenne, des initiatives visant à diffuser les connaissances dans le domaine de l'air comprimé ont fortement contribué à la promotion de sa mise en œuvre, en créant une situation dont tout le monde sort gagnant : le propriétaire du système d'air comprimé avec une réduction des coûts globaux, le fournisseur de compresseur et d'autres dispositifs avec une augmentation de ses bénéfices et l'environnement avec une réduction des émissions des stations.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[168, PNEUROP, 2007, 194, ADEME, 2007]

3.7.2 Entraînements à vitesse variable (EEV)

Description
Sur les compresseurs, les entraînements à vitesse variable (EVV, voir Section 3.6.3) s'utilisent principalement lorsque les besoins en air du procédé fluctuent, selon les heures de la journée et selon les jours de la semaine. Les systèmes de régulation classiques tels que les systèmes de régulation de charge/décharge, modulation, capacité et autres, essaient de suivre ces changements de la demande en air. Si ces fluctuations entraînent des fréquences de commutation et des temps d'inactivité élevés, il s'ensuit une baisse de l'efficacité énergétique. Dans les compresseurs EVV, la vitesse du moteur électrique varie en fonction des demandes en air comprimé, ce qui se traduit par un niveau élevé d'économie d'énergie.

Selon des études, dans une majorité d'application mettant en jeu de l'air comprimé, il existe des fluctuations modérées à importantes de la demande en air : il s'agit là d'un important gisement d'économies d'énergie exploitable en ayant recours à des compresseurs à vitesse variable.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
Les tests réalisés dans un laboratoire indépendant ont mis en évidence des économies d'énergie importantes pour des fonctionnements se référant à des modèles types de demande en air. Les entraînements à vitesse variable sur les compresseurs, outre des économies d'énergie, apportent également quelques avantages supplémentaires :

- la pression est très stable et cette stabilité contribue à la stabilité du procédé opérationnel dans certains procédés sensibles ;
- les facteurs de puissance sont beaucoup plus élevés que pour les entraînements classiques, ce qui donne une puissance réactive faible ;
- les courants de démarrage ne dépassent jamais les courants à pleine charge du moteur. Les utilisateurs peuvent, en conséquence, réduire les puissances nominales des compresseurs électriques. Par ailleurs lorsque cela est applicable, les utilisateurs évitent ainsi de se voir appliquer des pénalités par les sociétés de distribution d'électricité en évitant des pics de courant au démarrage. Les économies au niveau des pics se produisent automatiquement ;
- la technologie EVV permet un démarrage progressif à faible vitesse, ce qui élimine les crêtes de courant et de couple, réduisant ainsi l'usure mécanique et les contraintes électriques, et prolongeant la durée de vie du compresseur ;
- le niveau sonore est réduit dans la mesure où le compresseur ne fonctionne que si nécessaire.

Applicabilité
L'utilisation des compresseurs à vitesse variable est indiquée pour un certain nombre d'opérations dans un large éventail d'industries, notamment dans la métallurgie, les industries alimentaires, textiles, pharmaceutiques et chimiques, etc., dans lesquelles le modèle de la demande en air comprimé est fortement fluctuant. Aucun bénéfice réel ne peut être obtenu si le compresseur fonctionne en continu à pleine capacité ou à une puissance proche de celle-ci (voir Exemples, ci-dessous).

Des compresseurs à vitesse variable peuvent être appliqués à une installation d'air comprimé existante. D'autre part, les régulateurs EVV peuvent être intégrés dans des compresseurs à vitesse fixe existants ; toutefois on obtient de meilleures performances lorsque le régulateur EVV et le moteur sont fournis conjointement car ils sont en adéquation pour offrir le meilleur rendement à l'intérieur d'une plage de vitesse. L'emploi des EVV doit être limité aux compresseurs les plus récents en raison de l'éventualité de problèmes avec des compresseurs plus anciens. En cas de doute, consulter le fabricant ou un expert en système d'air comprimé.

De nombreux systèmes d'air comprimé possèdent déjà un compresseur à vitesse variable, de sorte que l'applicabilité dans l'industrie pour des compresseurs à vitesse variable supplémentaires s'élève à environ 25 %. Les économies peuvent atteindre 30 %, bien que les gains moyens lorsqu'on ajoute un compresseur doté d'un entraînement à vitesse variable dans un système d'air comprimé soient d'environ 15 %. Davantage de systèmes d'air comprimé pourraient vraisemblablement employer avec bénéfice des compresseurs à vitesse variable.

Aspects économiques
L'énergie représente en règle générale environ 80 % des coûts du cycle de vie du compresseur, les 20 % restants correspondant aux investissements et à la maintenance. Une installation, dans laquelle (selon une estimation conservatrice) les économies d'énergie réalisées grâce à l'emploi d'EVV s'élèvent à 15 %, économise 12 % en termes de coût de cycle de vie, tandis que l'investissement supplémentaire pour le compresseur à vitesse variable (au lieu d'un compresseur classique) n'ajoute que 2 à 5 % au coût du cycle de vie.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Les aspects économiques et les préoccupations pour l'environnement sont les principaux agents moteurs.

Exemples
Des tests de capacité de débit conformément à la norme BS1571 ont été menés sur un compresseur à vis installé depuis 18 mois, dans l'usine norvégienne Talc Ltd., Hartlepool, au Royaume-Uni. Des économies d'énergie de 9,4 kW (soit 9 % de la puissance à pleine charge) à une puissance nominale de sortie de 50 % sont possibles, et des économies encore plus grandes sont possibles avec un fonctionnement à une charge encore inférieure. Toutefois, la consommation d'énergie à pleine charge serait de 4 % supérieure en raison des pertes de puissance dues à l'inverseur. C'est pourquoi un EVV ne doit pas être utilisé avec des compresseurs fonctionnant à pleine charge sur de longues durées.

Références bibliographiques
[168, PNEUROP, 2007, 194, ADEME, 2007, 195, DETR]

3.7.3 Moteurs à haut rendement (HEM)

Description
Bien qu'il n'existe aucune définition formelle d'un moteur à moteur à haut rendement, ces composants sont généralement classés comme étant des moteurs dans lesquels les pertes ont été réduites au minimum absolu. Les moteurs à haut rendement minimisent les pertes électriques et mécaniques pour apporter des économies d'énergie. Il existe diverses classifications dans le monde, pour différencier les moteurs à haut rendement des autres. À titre d'exemples, on peut citer EFF1, NEMA premium, etc. (voir Section 3.6.1).

Avantage obtenu pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
- réduction des appels de courant
- réduction de la chaleur générée.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
Les pertes des moteurs sont indépendantes de l'emplacement et de l'utilisation du moteur. En d'autres termes des moteurs à haut rendement peuvent être utilisés presque partout. Ils sont déjà utilisés dans la plupart des grandes applications (75 %) ; la majeure partie des 25 % restants correspondent à des systèmes plus petits.

Aspects économiques
Un gain en efficacité apparemment faible, ne serait-ce que de 1 à 2 % contribue à des économies en proportion pendant toute la durée de vie du moteur. Les économies cumulées seront importantes.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coût.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[168, PNEUROP, 2007, 194, ADEME, 2007, 195, DETR]

3.7.4 Modules de pilotage centralisé des systèmes d'air comprimé

Description
Dans la majorité des applications relevant de l'IPPC, les systèmes d'air comprimé sont des installations à plusieurs compresseurs. Le rendement énergétique de telles installations peut être considérablement amélioré grâce à des modules de pilotage centralisé des SAC qui permettent d'échanger des données opérationnelles avec les compresseurs et un contrôle partiel ou total des modes de fonctionnement de chaque compresseur.

L'efficacité de tels modules de pilotage centralisé dépend fortement des capacités des liaisons de communication, qui peuvent aller des simples contacts de relais flottant jusqu'à des réseaux utilisant des protocoles d'automatisation. Une augmentation de la capacité de communication confère un plus grand degré de liberté pour rechercher les données opérationnelles provenant du compresseur, pour piloter le mode de fonctionnement de chaque compresseur et pour optimiser la consommation énergétique globale d'un SAC.

La stratégie de contrôle-commande du module de pilotage centralisé doit tenir compte des caractéristiques de chaque compresseur, notamment de leur mode de contrôle. Certaines remarques sur les modes de contrôle des compresseurs courants sont indiquées à des fins d'illustration. Les modes de contrôle les plus couramment utilisés pour les compresseurs sont les suivants :

- commutation entre charge, ralenti et arrêt, et
- contrôle de fréquence.

Les principales caractéristiques des modules de pilotage centralisé et des compresseurs sophistiqués peuvent être résumées comme suit :

- caractéristiques de communication avancées (reposant sur des protocoles d'automatisation),
- accès complet du module de pilotage centralisé du SAC aux données opérationnelles de chaque compresseur,
- contrôle global de tous les modes de fonctionnement des compresseurs par le module de pilotage centralisé du SAC,
- optimisation par auto-apprentissage de la stratégie de pilotage centralisé, incluant la reconnaissance des propriétés des SAC,
- détermination et activation des combinaisons à forte efficacité énergétique des compresseurs sous charge, au ralenti et à l'arrêt et des transitions entre ces états pour correspondre à la demande totale en débit d'air libre (FAD),
- contrôle efficace des compresseurs à fréquence variable pour compenser des fluctuations à court terme de la demande FAD, ce qui évite un fonctionnement inefficace à long terme à vitesse constante, en particulier à basses fréquences,
- minimisation des fréquences de commutation et d'un fonctionnement au ralenti des compresseurs à vitesse fixe,

- méthodes et modèles de prédiction sophistiqués pour la demande totale en débit d'air libre (FAD), incluant l'identification des modèles de demande cyclique (modèles selon postes jour, semaine, et zone de travail, etc.),
- fonctions supplémentaires comme la surveillance à distance, la collecte des données de l'installation, la planification de la maintenance, les téléservices, et/ou la fourniture de données opérationnelles prétraitées par le biais de serveur web,
- contrôle des autres composants du SAC en plus des compresseurs.

Avantages obtenus pour l'environnement
- amélioration de l'efficacité énergétique,
- réduction du courant tiré et de la chaleur générée.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
- *dans les installations à un seul compresseur :* dans un SAC, les conditions de fonctionnement sont optimales lorsque le compresseur fonctionne en continu à vitesse fixe à rendement optimum. Toutefois, si la demande en air n'est pas continue, la mise à l'arrêt/au ralenti du compresseur pendant de longues périodes d'inactivité peut s'avérer une solution plus rentable ;
- **les compresseurs sans contrôle de fréquence** sont commutés entre charge, ralenti et arrêt pour fonctionner à une vitesse fixe et fournir 100 % du débit d'air libre (FAD) pendant la charge et 0 % du débit d'air libre (FAD) pendant la période de ralenti ou d'arrêt. Il peut être parfois nécessaire de mettre le compresseur en mode ralenti au lieu du mode arrêt, notamment si la fréquence des changements entre FAD 100 % et FAD 0 %, imposée par la régulation de pression, est supérieure à la fréquence de démarrage autorisée du moteur d'entraînement électrique.

La consommation d'électricité en mode ralenti représente généralement de 20 à 25 % de la valeur à pleine charge. Des pertes supplémentaires proviennent de la ventilation du compresseur après commutation sur arrêt et des pertes liées au démarrage électrique du moteur d'entraînement. Dans les installations à un seul compresseur, la fréquence de commutation requise dépend directement du profil de charge, de la taille de la cuve (stockage), de la plage de pression admissible et du débit d'air libre du compresseur.

Si ces paramètres de contrôle sont sélectionnés de manière inappropriée, le rendement moyen des compresseurs à vitesse fixe fonctionnant en mode discontinu peut être considérablement réduit par rapport à ceux fonctionnant à pleine vitesse en mode continu. Dans de ce cas, l'emploi d'un module de pilotage centralisé évolué afin d'optimiser les paramètres du régime du compresseur fonctionnant en discontinu s'avère un outil performant pour améliorer le rendement du système d'air comprimé. Les modules de pilotage centralisé évolués sont conçus et programmés pour minimiser le fonctionnement au ralenti et les fréquences de commutation, au moyen de diverses stratégies en arrêtant directement les compresseurs chaque fois que la température du moteur (mesurée ou estimée) permet un redémarrage immédiat, si nécessaire. Les compresseurs à vitesse fixe sont très rentables au plan de l'énergie si l'on parvient à minimiser les périodes de ralenti.

- **dans les compresseurs avec contrôle de fréquence,** la vitesse de fonctionnement de l'élément compresseur transite sans arrêt entre vitesse maximum et vitesse minimum. En

principe, la plage des contrôles va de la vitesse maximale à la vitesse minimale, à savoir approximativement de 4:1 à 5:1 et le débit d'air libre des compresseurs volumétriques (par exemple des compresseurs à vis) est grossièrement proportionnel à la vitesse de fonctionnement. En raison des pertes inhérentes aux convertisseurs de fréquence et des pertes induites dans les moteurs à entraînement asynchrone, le rendement du système d'entraînement proprement dit est réduit par rapport à celui de moteurs à vitesse fixe (3 à 4 % de réduction à pleine charge, voire même davantage à charge partielle). En outre, le taux d'efficacité des compresseurs volumétriques (par exemple compresseur à vis à injection d'huile et compresseur à vis exempt d'huile) diminue considérablement à de faible vitesse de fonctionnement par rapport à un fonctionnement nominal.

Dans les installations à un seul compresseur, ces effets négatifs peuvent être compensés par les propriétés de régulation appropriées du compresseur à fréquence variable, en éliminant les pertes dues au ralenti, à la ventilation et/ou au démarrage que les compresseurs à vitesse fixe auraient dans la même application. En raison de cette plage de contrôle limité (voir ci-dessus), même les compresseurs à fréquence variable ont des pertes dues au ralenti, à l'arrêt et/ou au démarrage avec de faibles demandes en débit d'air libre.

- *Installations à plusieurs compresseurs :*
  Pour les installations à plusieurs compresseurs, le raisonnement ci-dessus est trop simpliste parce que la demande globale FAD fluctuante va être satisfaite avec le module de pilotage centralisé par le biais de combinaisons complexes des modes de fonctionnement de plusieurs compresseurs et par des transitions entre ces modes. Ceci inclut également le contrôle de la vitesse de fonctionnement d'un compresseur à fréquence variable, le cas échéant, afin de minimiser significativement le fonctionnement au ralenti et les fréquences de commutation des compresseurs à vitesse fixe.

L'intégration d'un compresseur à vitesse variable dans une installation à plusieurs compresseurs peut être très réussie dans un système d'air comprimé ayant une capacité de stockage relativement faible, une demande en débit d'air libre fluctuant fortement et/ou rapidement, un petit nombre de compresseurs et/ou des tailles de compresseur qui ne sont pas suffisamment étagées. Par ailleurs, un SAC avec des tailles de compresseur raisonnablement étagées permet au module de pilotage centralisé d'ajuster avec précision le débit d'air libre produit au débit d'air libre requis, en activant une multitude de différentes combinaisons de compresseurs mais avec des fréquences de commutation et un temps de fonctionnement en mode ralenti qui sont réduits.

Les modules de pilotage centralisé prennent généralement en charge plusieurs compresseurs sur une plage de pression commune pour maintenir la pression minimum définie à un point de mesure approprié. Il en découle des économies d'énergie nettes par rapport aux schémas en cascade. Les modules de pilotage centralisé utilisent des stratégies qui permettent d'avoir une plage de pression plus étroite sans augmenter les fréquences de commutation ni les temps de fonctionnement en mode ralenti des compresseurs. Une plage de pression étroite contribue, en outre, à réduire la contre-pression moyenne et par conséquent la demande en énergie spécifique des compresseurs sous charge ainsi que la demande artificielle en aval.

Applicabilité
Selon une étude réalisée dans le cadre du programme SAVE, l'installation après coup de modules de pilotage évolués est applicable et de bon rapport coût efficacité pour 20 % des

systèmes d'air comprimé existants. Pour les systèmes d'air comprimé des installations relevant de l'IPPC qui sont relativement importants, l'emploi de modules de pilotage centralisés évolués doit être considéré comme l'expression de l'état de l'art.

Les économies d'énergie les plus grosses sont réalisées si la mise en œuvre des modules de pilotage centralisé évolués est planifiée dans la phase de conception du système en même temps que le choix initial du compresseur, ou en association avec des remplacements de composants (compresseurs) majeurs. Dans ces deux cas, il convient de faire porter son choix sur des modules centralisés et des compresseurs avec des fonctions de communication avancées, globales et compatibles.

En raison de la longue durée de vie d'un système d'air comprimé, ce scénario optimum n'est pas toujours possible, mais la modernisation d'un système d'air comprimé existant avec un module de pilotage centralisé évolué et, en dernier ressort, s'il n'y a aucune autre solution d'évolution, la connexion d'anciens compresseurs à ce module par le biais de contacts de relais flottants, peut générer des économies d'énergie importantes.

Aspects économiques
Le rapport coût efficacité de l'intégration des modules de pilotage centralisés dans un système d'air comprimé nouvellement conçu dépend des circonstances, notamment des profils de la demande, des longueurs de câbles et des types de compresseurs. Les économies d'énergie moyennes obtenues sont estimées à 12 %. Dans le cas d'une modernisation, l'installation d'un module de pilotage centralisé dans un système d'air comprimé existant, l'intégration des anciens compresseurs et la possibilité de pouvoir disposer de plans sont autant de sources d'incertitude, mais en règle générale, le temps de retour sur investissement est inférieur à un an.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Le principal agent moteur pour la mise en œuvre est la réduction des coûts d'énergie mais il en existe d'autres qu'il faut mentionner. Si l'installation de modules de pilotage centralisé et compresseurs permet d'avoir des fonctions de communication très élaborées, il devient possible de collecter des données opérationnelles globales dans le module de pilotage centralisé. Cette possibilité, en association avec d'autres fonctions, constitue une base pour la maintenance sur demande ou planifiée, les téléservices, la surveillance à distance, la collecte des données, le calcul du coût de l'air comprimé et autres services similaires, qui contribuent à une réduction des coûts de maintenance, à une augmentation de la disponibilité opérationnelle et à une meilleure sensibilisation aux coûts de production de l'air comprimé.

Exemples
L'installation d'un module de pilotage de compresseur informatisé a réduit les coûts de production d'air comprimé de 18,5 % chez Ford Motor Company (autrefois Land Rover) à Solihull, Royaume-Uni. Le système a été installé et mis en fonctionnement sans aucune interruption de la production. Les coûts globaux engagés pour le système ont donné lieu à une période de retour sur investissement de 16 mois qui a pu être reproduite sur la plupart des systèmes d'air comprimé utilisant trois compresseurs ou plus. Il y a là une opportunité simple et fiable pour permettre aux grands consommateurs d'air comprimé de réduire leur facture électrique comme indiqué ci-dessous :

- utilisateurs potentiels : toute salle de compresseurs contenant trois compresseurs ou plus ;

- coûts d'investissement : les coûts totaux liés au système étaient de 44900 EUR, dont 28300 EUR pour les coûts de capital (prix de 1991) ;
- économies réalisées : 600000 kWh (2100 GJ/an, soit l'équivalent de 34000 EUR/an (prix de 1991) ;
- période de retour sur investissement : 1,3 an (avantage direct provenant du module de pilotage) ; huit mois (en tenant compte de la diminution des fuites consécutives).

(1 GBP = 1,415489 EUR, 1er janvier 1991)

Les coûts d'investissement ayant considérablement chuté entre temps, le coût en capital serait donc ramené de 28300 EUR à 5060 EUR en 1998, ce qui équivaudrait à une période de retour sur investissement inférieure à 3 mois malgré un coût d'électricité plus faible pour Land Rover en 1998.

Références bibliographiques
[113, Best practice programme, 1996]

3.7.5 Récupération de chaleur

Description
La majeure partie de l'énergie électrique utilisée par un compresseur d'air industriel est convertie en chaleur et doit être évacuée vers l'extérieur. Dans de nombreux cas, une unité de récupération de chaleur correctement conçue récupère un pourcentage élevé de cette énergie thermique disponible et permet d'en faire bon usage en chauffant de l'air ou de l'eau lorsqu'il existe une demande.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Aucun.

Données opérationnelles
Il existe deux systèmes de récupération différents.

- Chauffage de l'air : les compresseurs monoblocs refroidis par air sont adaptés à la récupération de chaleur destinée au chauffage des locaux, au séchage industriel, au préchauffage de l'air aspiré pour les brûleurs à fioul ou à toutes autres applications nécessitant de l'air chaud. L'air atmosphérique ambiant traverse les refroidisseurs du compresseur dont il extrait la chaleur.

Étant donné que les compresseurs monoblocs sont généralement installés dans des armoires, et comprennent déjà des échangeurs de chaleur et des ventilateurs, les seules modifications nécessaires sont l'ajout de gaines et d'un autre ventilateur pour gérer le chargement de la gaine et pour éliminer toute contre-pression sur le ventilateur de refroidissement du compresseur. Ces systèmes de récupération de chaleur peuvent être modulés grâce à un simple évent à volet contrôlé par thermostat.

La récupération de chaleur pour le chauffage des locaux est moins performante avec des compresseurs refroidis par eau parce qu'il faut ajouter un étage supplémentaire d'échangeur de chaleur et que la température de la chaleur disponible est plus basse. Comme de nombreux compresseurs refroidis à l'eau sont de gros compresseurs, la récupération de chaleur pour le chauffage des locaux peut être une opportunité séduisante.

- Chauffage de l'eau : il est également possible d'utiliser un échangeur de chaleur pour extraire la chaleur perdue des refroidisseurs à huile situés dans les compresseurs monoblocs refroidis par air ou par eau afin de produire de l'eau chaude. En fonction du modèle, les échangeurs de chaleur peuvent produire de l'eau potable ou non potable. Lorsqu'il n'existe pas de demande d'eau chaude, le lubrifiant est acheminé au refroidisseur de lubrifiant standard.

L'eau chaude peut être utilisée dans les systèmes à chauffage central ou à chaudières, dans les systèmes de douche, les procédés de nettoyage industriel, les opérations d'applications de revêtement métallique, les pompes à chaleur, les buanderies ou toute autre application nécessitant de l'eau chaude.

Applicabilité
Pour la plupart des compresseurs sur le marché, il existe en option des systèmes de récupération de chaleur, soit intégrés dans le bloc compresseur, soit sous forme de solution externe. Un système d'air comprimé existant peut, en principe, être modernisé très facilement et de manière économique. Les systèmes de récupération de chaleur sont applicables à la fois aux compresseurs refroidis par air et par eau.

Aspects économiques
Environ 80 à 95 % de l'énergie électrique consommée par un compresseur d'air industriel est convertie en énergie thermique. Dans de nombreux cas, une unité de récupération de chaleur correctement conçue récupère approximativement 50 à 90 % de cette énergie thermique disponible et la convertit en travail utile pour chauffer l'air ou l'eau.

Les économies d'énergie potentielles dépendent du système d'air comprimé, des conditions d'exploitation et de l'utilisation.

La chaleur récupérable à partir d'un système d'air comprimé est normalement insuffisante pour produire directement de la vapeur.

Des températures d'air de 25 à 40 °C supérieures à la température de l'air d'admission de refroidissement et des températures d'eau de 50 à 75 °C peuvent être obtenues en règle générale.

Le tableau 3.25 ci-dessous présente un exemple de calcul d'économie d'énergie pour un compresseur à vis avec injection d'huile :

Puissance nominale du compresseur	**Chaleur récupérable** (approximativement. 80 % de la puissance nominale)	**Économie annuelle de fioul** pour un fonctionnement annuel de 4000 heures	**économies de coûts annuelles pour** 0,50 EUR/l de fioul
kW	kW	Litres/an	EUR/an
90	72	36330	18165

Tableau 3.25 : Exemple d'économies de coût
[168, PNEUROP, 2007]

Équation 3.12

$$\text{Économie de coût annuel (EUR/an)} = \frac{\text{Puissance nominale compresseur } (kW) \times 0{,}8 \times \text{heures fonct / an} \times \text{coûts fioul } (EUR/l)}{\text{Pouvoir calorif brut combust}(kWh/l) \times \text{Facteur d'efficacité chauffage fioul}}$$

où

- Pouvoir calorifique brut du fioul = 10,57 (kWh/l)
- Facteur d'efficacité – chauffage au fioul = 75 %.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coûts.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[121, Caddet Energy Efficiency, 1999, 168, PNEUROP, 2007]

3.7.6 Réduction des fuites des systèmes d'air comprimé

Description
La réduction des fuites des systèmes d'air comprimé (SAC) est de loin le plus grand gisement d'économies d'énergie. Une fuite est directement proportionnelle à la pression du système. Les fuites sont présentes dans tous les systèmes d'air comprimé, 24 heures sur 24, et non pas seulement pendant la production.

Dans un grand système bien entretenu, les pertes d'air comprimé imputables aux fuites doivent être inférieures à 10 % de la capacité d'un compresseur. Pour les petits systèmes, le pourcentage de fuites recommandé doit être inférieur à 5 %. Les pertes d'air comprimé imputables aux fuites dans un système d'air comprimé mal entretenu « qui grossissent au fil du temps » peuvent atteindre 25 %.

C'est pourquoi les programmes de maintenance préventive des systèmes d'air comprimé doivent comprendre des mesures de prévention des fuites et des tests périodiques. Lorsque des fuites sont détectées puis réparées, les systèmes doivent être réévalués. Les tests doivent comprendre ce qui suit :

- Estimation de la quantité de fuite : toutes les méthodes permettant d'estimer la quantité de fuite d'un système d'air comprimé supposent qu'il n'existe aucune demande sur le système, ce qui signifie que tous les appareils consommant de l'air sont coupés et par conséquent que la consommation d'air est uniquement due à la fuite :
  - Une mesure directe est possible si un dispositif de mesure de la consommation d'air comprimé est installé ;
  - Dans un SAC doté de compresseurs qui utilisent des commandes marche/arrêt, l'estimation de la quantité de fuite est possible en déterminant le temps de

fonctionnement (temps en charge) du compresseur par rapport au temps total de la mesure. Afin d'obtenir une valeur représentative, le temps de la mesure doit comprendre au moins cinq démarrages du compresseur. La fuite exprimée en pourcentage de la capacité du compresseur est ensuite calculée comme suit :

Fuite (%) = 100 x temps de fonctionnement/temps de mesure

- Dans un SAC avec d'autres stratégies de contrôle, il est possible d'estimer une fuite si une vanne est installée entre le compresseur et le système. Une estimation du volume total du système en aval de cette vanne et une jauge de pression en aval de la vanne sont également nécessaires.
- Le système est ensuite amené jusqu'à sa pression de service (P1), le compresseur est mis à l'arrêt et la vanne est fermée. Le temps (t) nécessaire au système pour passer de P1 à une pression inférieure P2 est mesuré. P2 doit être égale à environ 50% de la pression de service (P1). Le débit de fuite peut alors être calculé comme suit :

  - Fuite (m^3/min) = volume du système (m^3) x (P1 (bar) – P2 (bar)) x 1.25/t (min).

  - Le multiplicateur 1,25 correspond à une correction pour la réduction de fuite avec la chute de pression du système.

  - la fuite exprimée en pourcentage de la capacité du compresseur est ensuite calculée comme suit :

Fuite (%) = 100 x fuite (m^3/min)/débit en volume entrée compresseur (m^3/min)

- Réduction des fuites : le colmatage des fuites peut être aussi simple qu'une action consistant à resserrer un raccord ou aussi complexe qu'une action consistant à remplacer un équipement défectueux comme des couplages, des raccords, des sections de tuyaux, des tuyaux souples, des articulations, des drains et des purgeurs. Dans de nombreux cas, les fuites sont provoquées par une application mauvaise ou incorrecte de la garniture d'étanchéité. Des équipements ou des pièces entières du système qui ne sont plus utilisées doivent être isolés de la partie active du SAC.

Une manière supplémentaire de réduire des fuites consiste à abaisser la pression de service du système. Avec une pression différentielle plus faible sur une fuite, le débit de la fuite est réduit.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Les fuites sont non seulement une source de gaspillage d'énergie mais elles contribuent également à d'autres pertes d'exploitation. Elles provoquent une chute de pression dans le système, qui peut occasionner une baisse de performance d'autres outils pneumatiques et par conséquent une baisse de la productivité. En outre, les fuites impliquent une augmentation du nombre de cycles des équipements du système et contribuent ainsi à raccourcir la durée de vie de la plupart d'entre eux (y compris du bloc compresseur proprement dit). Une augmentation du temps de fonctionnement peut également conduire à des besoins de maintenance supplémentaires et à une augmentation des temps d'immobilisation non planifiés. Enfin, les

fuites d'air peuvent entraîner l'ajout d'une capacité de compression qui n'est pas absolument nécessaire.

Effets croisés
Aucun effet croisé rapporté.

Données opérationnelles
Les fuites sont une source importante de gaspillage d'énergie dans un système d'air comprimé industriel, et représentent parfois 20 à 30 % de la sortie d'un compresseur. Une installation type qui n'a pas été très bien entretenu est susceptible d'avoir un taux de fuite égal à 20 % de la capacité de production totale d'air comprimé.

Par ailleurs, une détection proactive des fuites et leur réparation permettent de ramener les pertes à moins de 10 % de la sortie du compresseur y compris dans un grand système d'air comprimé.

Il existe plusieurs méthodes de détection des fuites :

- recherche d'un bruit audible provoqué par des grosses fuites,
- application d'eau savonneuse avec un pinceau sur les zones suspectes,
- utilisation de détecteurs acoustiques aux ultrasons,
- détection des fuites au moyen de gaz traceurs, en utilisant par exemple de l'hydrogène ou de l'hélium.

Alors qu'une fuite peut subvenir dans toute partie du système, les zones problématiques les plus courantes sont les suivantes :

- accouplements, tuyaux souples, tubes et raccords,
- régulateurs de pression,
- purgeurs de condensat et vannes d'arrêt ouverts,
- raccords de tuyauterie, déconnexions et garniture d'étanchéité tressées,
- outils pneumatiques.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Aucun.

Applicabilité
Applicable, en règle générale, à tous les SAC. (Voir Tableau 3.23).

Aspects économiques
Les coûts imputables à la détection et à la réparation des fuites sont fonction de chaque SAC mais aussi de la compétence de l'équipe de maintenance de l'installation. Pour un SAC de taille moyenne de 50 kW, les économies types sont de :

$$50 \text{ kW} \times 3000 \text{ h/an} \times 0{,}08 \text{ EUR/kWh} \times 20\ \% = 2400 \text{ EUR/an}$$

Les coûts types de la détection et de la réparation systématique des fuites sont de 1000 EUR/an.

La limitation des fuites, compte tenu de son champ d'application très étendu (80 %) et du fait qu'elle procure les gains les plus élevés (20 %), est une mesure primordiale à mettre en place pour réduire la consommation d'énergie des SAC.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Usine à titre d'exemple
Selon des données de 1994, Van Leer (UK) Ltd consommait 179 kWh pour produire 1000 m^3 d'air comprimé, à un coût de 7,53 EUR/1000 m^3. La réduction des fuites s'est traduite par des économies d'énergie annuelles de 189200 kWh, soit l'équivalent de 7641 EUR/an, ce qui représentait 25 % d'économie sur le coût de la fourniture d'air comprimé. Le coût de la campagne de détection des fuites s'est élevé à 2235 EUR auxquels il faut ajouter 2874 EUR (incluant pièces détachées et main d'œuvre) pour les travaux de réparation. Avec des économies de 7641 EUR/an, la période de recouvrement de l'investissement du programme de réduction des fuites est de neuf mois.
(1 GBP = 1,314547 EUR, 1er janvier 1994)

Références bibliographiques
[168, PNEUROP, 2007]

3.7.7 Maintenance des filtres

Description
Les pertes de pression peuvent avoir pour origine un mauvais entretien des filtres dû soit à un nettoyage insuffisant, soit à une fréquence de remplacement insuffisante dans le cas des filtres jetables.

Avantages obtenus pour l'environnement
- économies d'énergie
- émissions réduites de brouillard d'huile et/ou de particules.

Effets croisés
Augmentation de la consommation des filtres et de leur mise au rebut en tant que déchets.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
Tous les SAC.

Aspects économiques
Voir Tableau 3.23.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques

3.7.8 Alimentation des compresseurs avec de l'air frais extérieur

Description
Souvent la station de compression principale est installée à proximité des principales charges demandant de l'air comprimé, pour réduire les pertes de charge dans les canalisations. Il n'est pas rare de trouver la station principale en sous-sol, ou dans des salles intérieures à l'installation. Dans de tels cas, il y a normalement un manque d'air frais pour alimenter les compresseurs, et les moteurs sont obligés de comprimer l'air ambiant, qui est généralement à une température supérieure à celle de l'air extérieur. Pour des raisons thermodynamiques, la compression de l'air chaud nécessite davantage d'énergie que la compression de l'air froid. Dans la littérature technique, on peut lire que chaque augmentation de 5 °C de la température de l'air d'admission dans le compresseur provoque une augmentation d'environ 2 % de l'énergie nécessaire. Cette énergie peut tout simplement être économisée en alimentant la station d'air comprimé avec de l'air extérieur, en particulier pendant la saison froide, lorsque la différence entre la température extérieure et intérieure peut se chiffrer en multiples de 5 °C, en fonction de l'emplacement géographique. Il est possible d'installer un conduit raccordant l'extérieur à l'admission du compresseur, ou à toute la station d'air comprimé. La présence d'un ventilateur est parfois nécessaire, en fonction de la longueur du conduit, et il faut tenir compte de cette énergie pendant la planification. L'admission extérieure doit être placée du côté nord, ou du moins être à l'ombre la plupart du temps.

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction de la consommation des ressources d'énergie primaire. Normalement, les compresseurs sont entraînés par des moteurs électriques.

Effets croisés
Aucun connu.

Données opérationnelles
En raison de la présence d'une grande quantité de chaleur libérée par le compresseur, qu'elle soit récupérée ou non, la température ambiante des stations d'air comprimé est toujours élevée. Il n'est pas rare d'avoir des températures ambiantes allant de 30 à 35 °C, même en hiver. De toute évidence, plus la différence entre la température extérieure et la température intérieure est grande, plus les économies d'énergie possibles sont grandes ; il faut garder présent à l'esprit que de telles économies sont proportionnelles au nombre d'heures de fonctionnement des compresseurs dans le cadre d'un fonctionnement normal.

Applicabilité
La réduction de la température de l'air d'admission des compresseurs par une alimentation d'air frais provenant de l'extérieur est toujours possible. Il suffit parfois de percer un trou circulaire dans un mur et d'installer un conduit raccordant l'air extérieur à l'admission du compresseur. Lorsque la station d'air comprimé se situe dans un emplacement où l'accès vers

l'extérieur est difficile, il faut améliorer la ventilation de la pièce. On estime que cette mesure est applicable à 50 % des cas.

Aspects économiques
La réduction de température de l'air admis dans le compresseur implique des avantages économiques, notamment : l'alimentation en air froid provenant de l'extérieur est gratuite ; réduction du nombre d'heures de fonctionnement des compresseurs (économies en kWh) ; réduction de l'alimentation en énergie électrique (économies en kWh).

Le tableau 3.26 présente une évaluation des économies pouvant être obtenues grâce à cette technique. Cet exemple est extrait d'un diagnostic énergétique réel.

	Description	Valeur	Unité	Formule	Commentaire
A	Puissance installée actuelle pour la compression	135	kW	-	
B	Nombre d'heures de fonctionnement/an à pleine charge	2000	h/an	-	
C	Énergie nécessaire	270000	kWh	AxB	
D	Réduction de la température de l'air d'alimentation obtenue	5	°C	-	Estimation
E	Économies en pour-cent	2,00	%	-	Extrait de la littérature technique
F	Économies d'énergie électrique annuelles	5400	kWh	CxE	
G	Coût du kWh	0,1328	EUR /kWh	-	Données moyennes
H	Économies annuelles au plan financier	717	EUR /an	FxG	
I	Investissement	5000	EUR	-	Estimation pour conduit et ventilateur
L	Taux de retour interne (IRR) avant taxes	6,7	%	-	Extrait d'une analyse coût-avantage (*)
M	Valeur positive nette	536	EUR	-	Extrait d'une analyse coût-avantage (*)
N	Retour sur investissement	7,0	ans	-	Extrait d'une analyse coût-avantage (*)
(*) Pour une durée de vie de 10 ans et un taux d'intérêt de 5 %					

Tableau 3.26 : Économies obtenues grâce à l'alimentation du compresseur avec de l'air froid extérieur

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- simplicité de l'installation,
- économies d'énergie et financières.

Exemples
Usine de semi-conducteurs en Italie.

Références bibliographiques
[229, Di Franco, , 231, The motor challenge programme, , 233, Petrecca, 1992]

3.7.9 Optimisation du niveau de pression

Description

Plus le niveau de pression de l'air comprimé généré est bas, meilleur est le rapport coût-efficacité de la production. Toutefois, il est nécessaire de garantir à tous les consommateurs actifs qu'ils disposent à tout moment de suffisamment d'air comprimé. Grâce à des systèmes de régulation améliorés, il est possible de réduire la pression de pointe. En principe, il existe plusieurs manières permettant de « rétrécir » les plages de pression, et de réduire ainsi la pression de l'air comprimé généré. Ces possibilités sont énumérées ci-dessous et illustrées sur la figure 3.35 :

- réajustement direct grâce à des pressostats mécaniques sur les compresseurs. La manière la moins onéreuse d'ajuster la plage de pression d'un compresseur consiste à utiliser des pressostats mécaniques. Comme le réglage change parfois tout seul, il faut réajuster ces pressostats de temps en temps ;
- contrôle intelligent grâce à un compresseur à convertisseur de fréquence ou grâce à un dimensionnement optimal des compresseurs. La plage de pression est réajustée au moyen d'un compresseur à convertisseur de fréquence fonctionnant comme un compresseur à pleine charge et en adaptant sa vitesse aux besoins spécifiques en air comprimé, ou par le biais d'un module de pilotage centralisé qui assure la commutation sur un compresseur de taille plus appropriée ;
- réduction de la plage de pression juste à la « limite » (contrôle intelligent optimisé). Le système de régulation intelligent réduit la plage de pression jusqu'au point qui permet au réseau de compresseurs de fonctionner juste au-dessus de la limite de sous-approvisionnement en air comprimé.

La figure 3.34 présente les différents rendements de ces systèmes de régulation.

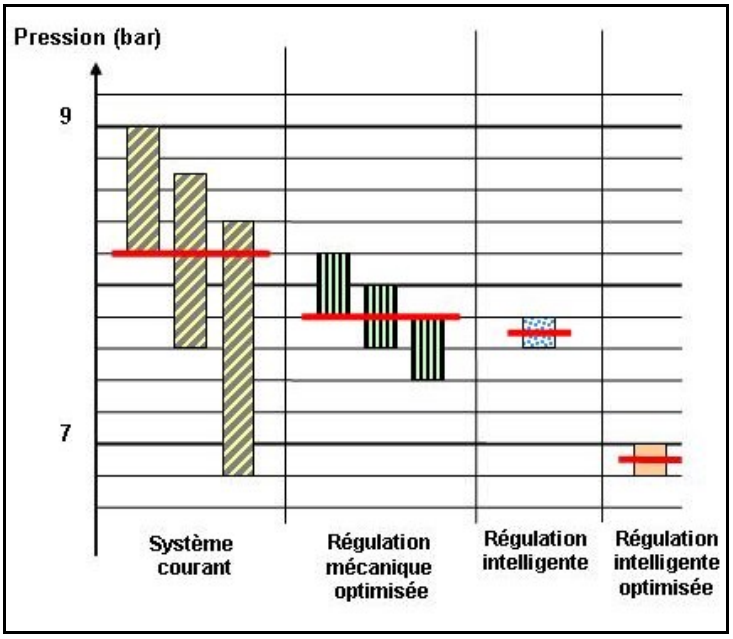


Figure 3.34 : Différents types de régulation des compresseurs [28, Berger, 2005]

La figure 3.34 est décrite ci-dessous :

- les lignes rouges horizontales des différents systèmes de régulation indiquent la pression moyenne de l'air comprimé généré
- les barres hachurées avec des traits jaunes en diagonale indiquent que la pression moyenne de l'air comprimé est de 8,2 bars
- les barres hachurées de traits verts verticaux indiquent que les pressostats mécaniques ne peuvent être réglés qu'à une différence de 0,4 bar (la différence entre les seuils inférieur et supérieur prédéfinis) en raison de la présence de marges de tolérances, ce qui permet de produire de l'air comprimé à 7,8 bars. Ceci repose sur l'hypothèse selon laquelle le point auquel le premier compresseur fonctionnant en charge de pointe est commuté reste inchangé à 7,6 bars.
- un système de régulation intelligent – barres tachetées de bleu – peut réduire la plage de pression de toute la station de compression jusqu'à 0,2 bar. Ce système de régulation s'adapte aux changements de pression. A condition que le point auquel le premier compresseur fonctionnant en charge de pointe est commuté reste encore par la suite la limite basse de pression prédéfinie, la pression moyenne dans ce cas est de 7,7 bars.

Une pression de 7,7 bars est encore une pression assez élevée au regard d'autres stations d'air comprimé comparables. Étant donné que la limite de pression pour la commutation sur le second compresseur ayant une charge de pointe (= compresseur suivant) est de 6,8 bars, on considère qu'il s'agit de la limite inférieure d'air comprimé. Cette pression correspond à celle de stations d'air comprimé similaires. La pression moyenne est dans ce cas de 6,9 bars.

Avantages obtenus pour l'environnement
En pratique, il a été démontré qu'en réduisant la pression de 1 bar, on obtient des économies d'énergie de 6 à 8 %. La réduction de pression apporte également une réduction des fuites.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
La régulation avec entraînement à vitesse variable d'un compresseur, qui peut être utilisé dans des systèmes de régulation intelligents et dans des systèmes de régulation intelligents optimisés s'avère habituellement d'un bon rapport coût-efficacité uniquement dans le cas d'un nouvel achat, parce que l'installation après coup d'un convertisseur de fréquence dans un compresseur existant n'est pas recommandée par les fabricants.

Aspects économiques
Avec une régulation intelligente optimisée, la pression de l'air comprimé peut donc être ramenée d'une moyenne de 8,2 à 6,9 bars, ce qui correspond à des économies d'énergie de 9,1 %. L'optimisation de la régulation implique uniquement des coûts mineurs et peut générer des économies de l'ordre de plusieurs centaines de MWh/an, c'est-à-dire des dizaines de milliers d'euros (par exemple pour des performances d'un compresseur installé de 500 kW, les économies obtenues sont d'environ 400 MWh/an et il est possible d'obtenir des économies de 20.000 EUR/an dans le cas d'un fonctionnement sur 8700 heures/an).

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coût.

Usines à titre d'exemple
L'installation d'un système de régulation de compresseur informatisé a permis de réduire les coûts de production d'air comprimé de 18,5 % sur le site de Land Rover (Royaume-Uni). Les coûts globaux pour le système ont donné une période de retour sur investissement de 16 mois. 20 % d'économies supplémentaires ont également été obtenues grâce à la réparation des fuites d'air comprimé.

Références bibliographiques
[227, TWG, , 244, Best practice programme]

3.7.10 Stockage de l'air comprimé à proximité des utilisations à forte fluctuation

Description
Des réservoirs stockant l'air comprimé peuvent être situés à proximité des parties du SAC dont l'emploi est soumis à forte fluctuation.

Avantages obtenus pour l'environnement
Lissage des pics de la demande grâce auquel les compresseurs requis par le système peuvent être de moindre capacité. La répartition des charges est davantage uniforme et les compresseurs peuvent fonctionner aux charges les plus rentables.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
- étudier tous les cas présentant des zones où la demande est soumise à de fortes fluctuations ;
- utilisation très courante.

Aspects économiques.
Réduction des coûts en capital et des coûts d'exploitation.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Usines à titre d'exemple
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
Aucune donnée communiquée.

3.8 Systèmes de pompage

Introduction
Les systèmes de pompage représentent approximativement 20 % de la demande mondiale en énergie électrique et de 25 à 50 % de la consommation d'énergie dans certaines opérations des installations industrielles. Les systèmes de pompage sont couramment utilisés dans différents secteurs :

- services industriels, par exemple :
- traitement des aliments,
- produits chimiques,
- pétrochimie,
- industrie pharmaceutique,
- services commerciaux et agricoles,
- services de traitement des eaux municipales/eaux résiduaires,
- applications domestiques.

Il existe deux grandes familles de pompes, définies selon la méthode de déplacement du fluide utilisée : les *pompes rotodynamiques* et les *pompes volumétrique*s. Dans l'industrie, la majorité des pompes sont entraînées par des moteurs électriques mais elles peuvent également être entraînées par des turbines à vapeur dans les grosses applications industrielles (ou même par des moteurs à pistons indépendants).

Les pompes rotodynamiques (habituellement centrifuges) comportent généralement des roues à aubes qui tournent à l'intérieur d'un fluide pour lui impartir une accélération tangentielle et en augmenter l'énergie. L'objectif d'une pompe est de convertir cette énergie en énergie de pression du fluide pouvant être utilisée dans le système de canalisation associé. Après les moteurs, on peut dire que les pompes centrifuges sont les machines les plus fréquentes dans le monde, et qu'elles sont énergivores.

Les pompes volumétriques provoquent le déplacement d'un liquide en piégeant une quantité fixe de fluide et en forçant (véhiculant) le volume piégé dans le tuyau d'évacuation. Les pompes volumétriques peuvent en outre être classées selon les types suivants :

- les pompes rotatives (par exemple les pompes rotatives à palettes). Leur emploi fréquent est illustré par les pompes hydrauliques pour haute pression et les pompes à vide primaire, notamment dans des applications incluant l'évacuation des canalisations de réfrigérant des climatiseurs ;

les pompes volumétriques alternatives (par exemple les pompes à membrane). Les pompes à membrane ont une bonne hauteur d'aspiration, certaines sont des pompes à basse pression avec de faibles débits. Elles ont de bonnes caractéristiques de fonctionnement à sec et ce sont des pompes à faible cisaillement (en d'autres termes, elles ne fractionnent pas les particules solides). Elles peuvent accepter des liquides à forte teneur en matières solides, tels que les boues et les suspensions chargées y compris avec une forte teneur en sable. Les pompes à membrane dotées de membranes en téflon, les clapets à bille et les actionneurs hydrauliques sont utilisés pour fournir des volumes précis de solutions chimiques à des pressions élevées (pouvant atteindre 350 bars) dans des chaudières industrielles ou des cuves de procédé. Les pompes à membrane peuvent être utilisées pour fournir de l'air exempt d'huile à des fins médicales, pharmaceutiques et ayant un rapport avec les produits alimentaires.

L'énergie et les matériaux utilisés par un système de pompage dépendent de la conception de pompe, de la conception de l'installation et de la manière dont fonctionne le système. Les pompes centrifuges sont généralement l'option la moins onéreuse. Les pompes peuvent avoir une configuration mono-étagée ou multi-étagée, par exemple pour obtenir des pressions plus élevées/plus basses. Elles sont souvent installées par paires, pour permettre aux applications critiques de disposer d'une pompe de service et d'une pompe de secours.

3.8.1 Inventaire et évaluation des systèmes de pompage

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux systèmes de pompage sont présentées dans la Section 3.8.7)

La première étape pour identifier les mesures possibles d'économie d'énergie et optimiser un système de pompage consiste à établir un inventaire des systèmes de pompage de l'installation et à repérer leurs principales caractéristiques de fonctionnement. L'inventaire est établi en 2 phases (voir Section 2.15.1 et Annexe 7.7.3) :

- description sommaire du système : elle consiste à compiler les données de l'entreprise ou à réaliser quelques mesures simples, pour recueillir les informations suivantes :
  - la liste par exemple des 50 pompes les plus puissantes (en estimant la puissance totale de chaque pompe, la taille et le type) ;
  - la fonction de ces systèmes ;
  - la consommation électrique de chacune de ces pompes ;
  - le profil de la demande : estimation de la variation au cours de la journée et de la semaine ;
  - le type du système de régulation
  - le nombre d'heures de fonctionnement par an, et donc la consommation d'énergie annuelle
  - les problèmes ou les questions de maintenance spécifiques à chaque pompe.

Pour beaucoup d'entreprises, la plupart ou la totalité de ces données peuvent être collectées en interne.

- documentation et mesure des paramètres de fonctionnement des pompes : il est souhaitable de connaître ou de mesurer les éléments ci-après pour tous les systèmes de pompage et cela est essentiel pour les grands systèmes (au-delà de 100 kW). La collecte de ces données demande un certain niveau d'expertise technique, disponible soit en interne auprès de l'équipe technique, soit en externe, auprès d'une société tierce.

Etant donnée la grande diversité des systèmes de pompage, il est impossible de proposer une liste arrêtée des points à évaluer ; la liste ci-dessous est donc indicative des points clés à traiter.

3.8.2 Choix des pompes

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux systèmes de pompage sont présentées dans la Section 3.8.7)

Une pompe est le cœur même d'un système de pompage. Son choix est dicté par les impératifs du procédé, qui peuvent être avant tout, une hauteur statique de pression et un débit. Le choix dépend aussi du système, du liquide, de caractéristiques de l'atmosphère, etc.

Afin de disposer d'un système de pompage performant, le choix de la pompe doit être adapté au système de telle sorte que le point de fonctionnement soit le plus près possible du point de fonctionnement optimal de la pompe, comme représenté sur la Figure 3.35.

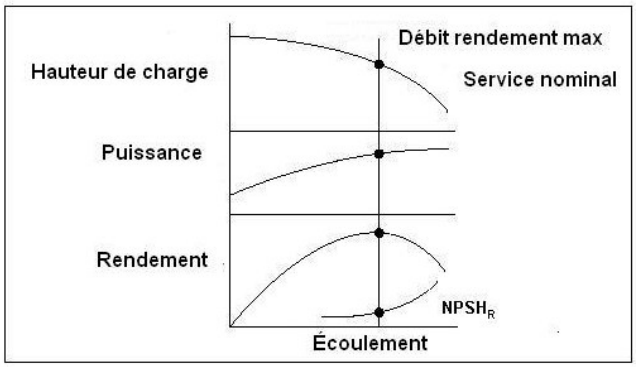


Figure 3.35 : Débit rendement maximal par rapport à la hauteur de charge, puissance et rendement [199, TWG]

La Figure 3.36 représente les plages de hauteurs de charge totales en fonction du débit et pour une vitesse donnée dans différents types de pompes.

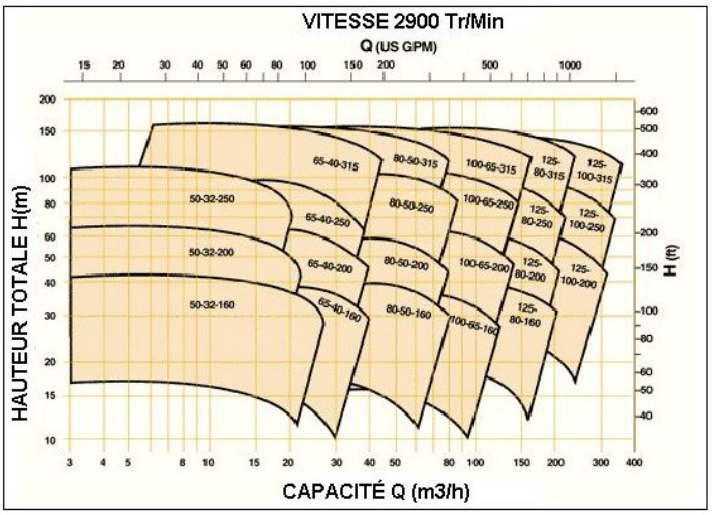


Figure 3.36 : Capacité de la pompe en fonction de la hauteur de charge

[199, TWG]

On estime que 75% des systèmes de pompage sont surdimensionnés, la plupart de plus de 20%. Le surdimensionnement des pompes à lui seul représente la plus grande source de gaspillage d'énergie.

Lors du choix d'une pompe, son surdimensionnement n'est pas une solution rentable en termes de coût ou de rendement énergétique car :

- le coût en capital est élevé
- le coût en énergie est élevé, un débit plus important étant pompé à une pression plus élevée que nécessaire. Le gaspillage d'énergie est imputable à un excès de débit qu'il faut réguler par étranglement, à des dérivations importantes ou au fonctionnement de pompes inutiles.

De nouvelles pompes peuvent être nécessaires là où des pompes surdimensionnées sont identifiées : leur remplacement doit être correctement évalué par comparaison avec d'autres méthodes possibles pour en réduire le débit, notamment usinage ou changement de la roue et/ou utilisation d'un entraînement à vitesse variable. L'usinage des roues est la méthode la moins onéreuse pour corriger le surdimensionnement des pompes. La hauteur de charge peut être réduite de 10 à 50 pourcents en usinant ou en changeant le diamètre de la roue dans les limites recommandées par le constructeur, pour le corps de la pompe.

Les besoins en énergie de l'ensemble du système peuvent être réduits grâce à l'emploi d'une pompe de surpression qui permet à la fois d'augmenter la pression du fluide pour les besoins spécifiques d'un « utilisateur » et d'alimenter le reste du système à pression et puissance réduites.

Les recommandations d'achat européennes relatives aux pompes à eau constituent une méthodologie simple afin de choisir une pompe performante ayant un rendement élevé au point de fonctionnement requis. Cette méthodologie peut être téléchargée à l'adresse suivante :
http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/motorchallenge/pdf/EU_pumpguide_final.pdf

3.8.3 Réseau de canalisation

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux systèmes de pompage sont présentées dans la Section 3.8.7)

Le réseau de canalisation est déterminant dans le choix des performances des pompes. En fait, ses caractéristiques doivent être combinées à celles des pompes afin d'obtenir les performances de pompage requises par l'installation comme représenté sur la Figure3.37 ci-dessous.

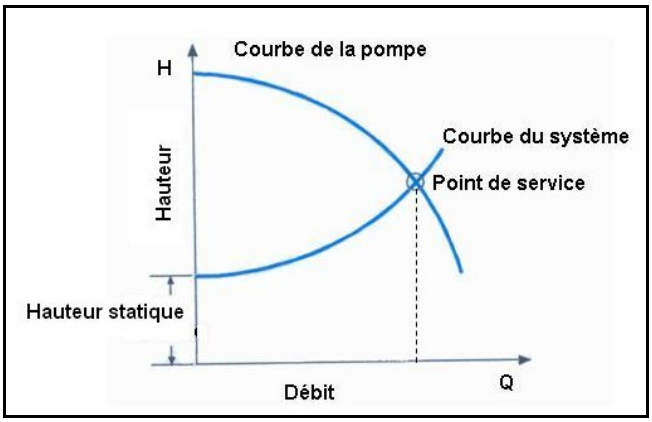


Figure 3.37 : Hauteur de charge de la pompe en fonction du débit

La consommation d'énergie directement liée au réseau de canalisation est la conséquence des pertes par frottement imputables au déplacement des liquides dans les tuyaux, aux vannes et autres équipements du système. Ces pertes sont proportionnelles au carré du débit. Pour les réduire, il faut notamment :

- éviter d'employer un trop grand nombre de vannes ;
- éviter les coudes (en particulier les changements de direction brutaux) dans le réseau de canalisation
- vérifier et augmenter le cas échéant la section des tuyaux.

3.8.4 Maintenance

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux systèmes de pompage sont présentées dans la Section 3.8.7)

Une maintenance excessive des pompes peut être synonyme de :
- pompes en cavitation
- usure excessive des pompes,
- inadéquation des pompes à l'usage qui en est fait.

Les pompes exploitées avec un étranglement permanent du débit, dans des conditions de pression et débits constants sont des pompes surdimensionnées. La perte de charge à travers la vanne de régulation constitue une perte d'énergie, qui est proportionnelle à la perte de charge et au débit.

Une pompe bruyante indique généralement une cavitation due à une forte réduction de la pression par étranglement ou à une régulation d'admission excessive. Des vannes de contrôle ou de dérivation bruyantes indiquent habituellement une forte perte de charge, avec en corollaire une perte d'énergie élevée.

La performance et l'efficacité d'une pompe se détériorent au fil du temps. La capacité et le rendement d'une pompe diminuent avec l'augmentation des fuites internes occasionnées par un jeu excessif entre certaines pièces usées : plaque arrière ; roue ; bagues de la gorge ; bagues ; paliers. Un test de surveillance permet de détecter cette situation et d'opérer un dimensionnement correct soit par la mise en place d'une nouvelle roue, soit par un usinage de la roue initiale, afin de réaliser des économies d'énergie très importantes. Il convient de restaurer les tolérances internes si les performances diminuent significativement.

L'application d'un film de réduction des frottements réduit les pertes par frottement.

3.8.5 Contrôle et régulation du système de pompage

Description et données opérationnelles
(Les informations concernant les avantages obtenus pour l'environnement, les effets croisés, l'applicabilité, les aspects économiques, les agents moteurs pour la mise en œuvre, ainsi que les exemples, et les références bibliographiques pour les techniques d'efficacité énergétique relatives aux systèmes de pompage sont présentées dans la Section 3.8.7)

Une application mettant en jeu une pompe peut devoir couvrir plusieurs points de fonctionnement, dont le débit et/ou la hauteur d'élévation le plus grand va déterminer les caractéristiques de fonctionnement nominal de la pompe. Un système de contrôle et de régulation est de première importance dans un système de pompage pour optimiser les conditions de fonctionnement en service pour la pression et le débit. Il permet :

- une régulation du procédé
- une amélioration de la fiabilité du système
- des économies d'énergie.

Pour toute pompe avec des variations de pression ou de débit importantes, lorsque la pression normale ou le débit normal sont inférieurs à 75% de leur maximum, il y a certainement un gaspillage d'énergie occasionné par une réduction du débit en excès ou par des délestages importants (assuré par un système de régulation ou des orifices de protection contre les surpressions), ou par le fonctionnement inutile de certaines pompes.

Il est possible d'utiliser les techniques de contrôle ci-après :

- arrêter les pompes inutiles. Cette mesure d'économie d'énergie évidente mais fréquemment oubliée peut être mise en œuvre après une réduction importante de la consommation d'eau (ou d'un autre fluide pompé) dans l'usine. (d'où la nécessité d'évaluer la totalité du système) ;
- un entraînement à vitesse variable (sur le moteur électrique) engendre des économies maximales car il permet d'ajuster la puissance (sortie) de la pompe aux fluctuations du système, mais le coût d'investissement est supérieur à celui des autres méthodes de régulation. Son emploi ne convient pas à toutes les situations, par exemple lorsque les charges sont constantes (voir Section 3.6.3) ;
- L'utilisation de pompes en parallèle offre une alternative à la variation de vitesse, à la régulation par dérivation ou par étranglement. Les économies résultent de la possibilité d'arrêter une ou plusieurs pompes lorsque le débit est faible tandis que les autres pompes fonctionnent avec un haut rendement. L'installation de plusieurs petites pompes en

parallèle doit être envisagée quand la charge de pompage est inférieure à la moitié de la capacité unitaire maximale. Dans les systèmes comportant plusieurs pompes, les pertes d'énergie proviennent généralement du délestage de la capacité en excès, du fonctionnement inutile de certaines pompes, du maintien d'une pression excessive ou d'un grand incrément de débit entre les pompes ;

- la régulation d'une pompe centrifuge au moyen d'un robinet d'étranglement sur la conduite de refoulement constitue une perte d'énergie. Toutefois, le gaspillage d'énergie est en principe moindre qu'avec les deux autres moyens couramment utilisés : l'absence de régulation et la régulation par délestage. Les vannes d'étranglement peuvent donc être un moyen d'économiser de l'énergie, sans pour autant être le choix optimal.

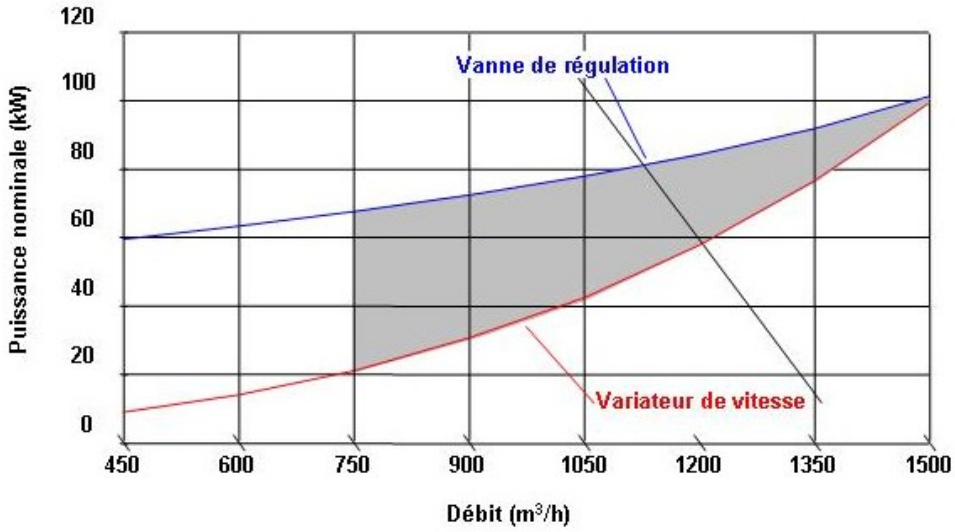


Figure 3.38 : Exemple de consommation d'énergie de deux systèmes de régulation de pompes rotodynamiques

3.8.6 Moteur et transmission

Voir Sous-systèmes entraînés » par moteur électrique, Section 3.6.
Remarque : il est important d'avoir une adéquation entre la bonne pompe pour la tâche (voir Section 3.8.2) et un dimensionnement correct du moteur pour les besoins en pompage (service de pompage), voir Section 3.6.2.

3.8.7 Avantages obtenus pour l'environnement, effets croisés, applicabilité et autres considérations concernant les techniques d'efficacité énergétique pour les systèmes de pompage

Avantages obtenus pour l'environnement
Selon certaines études, 30 à 50 % de l'énergie consommée par les systèmes de pompage pourraient être économisés grâce à des changements d'équipements ou des modifications du système de régulation.

Effets croisés
Aucun effet croisé rapporté.

Applicabilité
L'application de mesures particulières et l'ampleur des économies de coûts qui en découle, dépendent de la taille et de la nature spécifique de l'installation et du système. Seule une évaluation du système et des besoins de l'installation peut déterminer les mesures qui seront à la fois techniquement faisables et rentables. Ceci peut être réalisé par un fournisseur de services, compétent dans le domaine des pompes ou en interne par du personnel d'ingénierie qualifié.

Les conclusions de l'évaluation identifieront les mesures qui sont applicables à votre système et comprendront une estimation des économies, le coût des mesures, ainsi que le temps de retour.

Aspects économiques
Les systèmes de pompage ont une durée de vie de 15 à 20 ans : il est donc judicieux d'établir une comparaison entre les coûts du cycle de vie et le coût initial (achat).

En règle générale, les pompes sont achetées à titre de composants individuels bien qu'elles n'assurent un service que lorsqu'elles fonctionnent dans le cadre d'un système ; il est donc important de considérer l'ensemble du système pour disposer d'une évaluation correcte de leur coût-rentabilité.

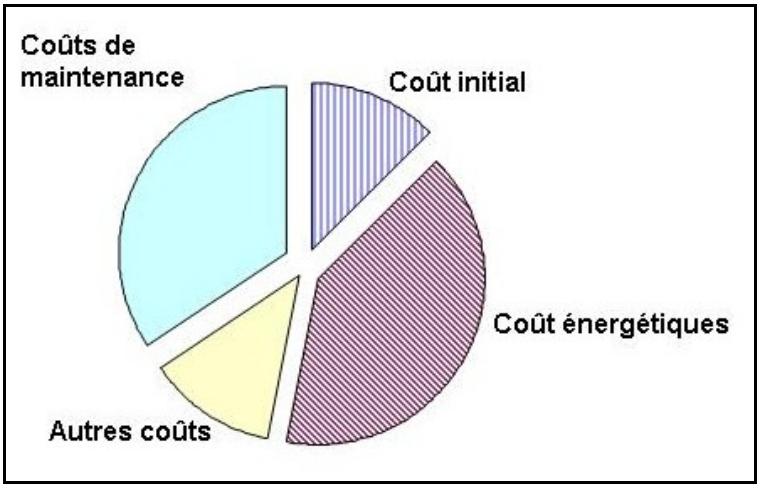


Figure 3.39 : Coûts d'une pompe industrielle de taille moyenne sur sa durée de vie [200, TWG]

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies d'énergie et de coût.

Exemples
Utilisation très répandue des techniques d'optimisation.

Références bibliographiques
[170, EC, 2003, 199, TWG, , 200, TWG]

3.9 Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)

Introduction

Un système CVC type comprend des équipements de chauffage ou de refroidissement (pour les chaudières, voir Section 3.2; les pompes à chaleur, Section 3.3.2 etc.), des pompes (Section 3.8) et/ou des ventilateurs, les réseaux de canalisation, des refroidisseurs (Section 3.3.3) et des échangeurs de chaleur (Section 3.3.1) qui transfèrent ou absorbent de la chaleur à partir d'un espace ou d'un procédé.

Des études ont montré qu'environ 60 % de l'énergie d'un système CVC est consommée par le refroidisseur/la pompe à chaleur tandis que les 40 % restants sont consommés par les machines périphériques.

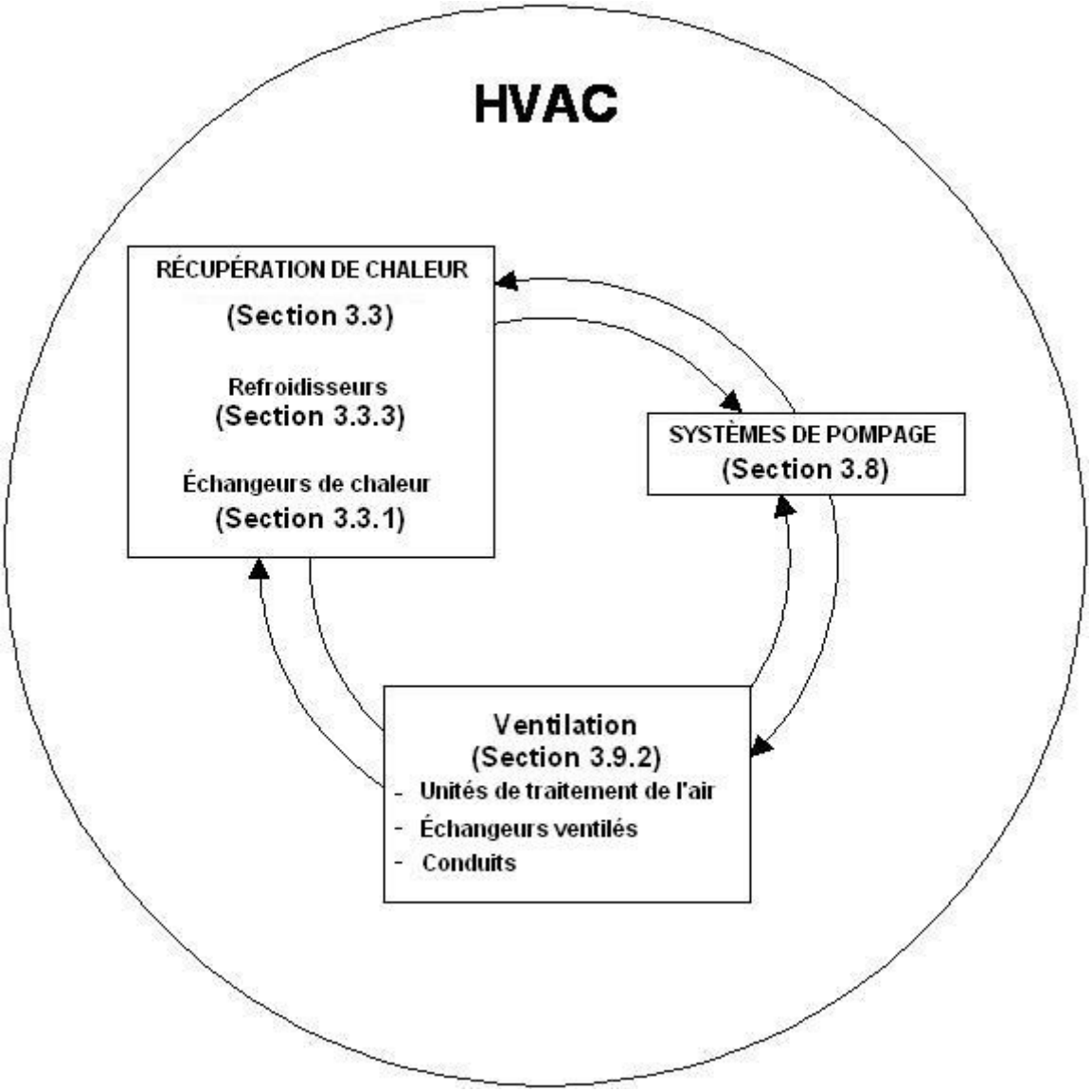


Figure 3.40 : Schéma d'un système CVC

3.9.1 Chauffage et refroidissement des locaux

Description
Dans les installations IPPC, il existe un large éventail d'activités de chauffage et de refroidissement des locaux. Leur application et leur utilisation dépendent du secteur d'activités et de leur emplacement géographique en Europe, mais elles permettent :

- de conserver des conditions de travail satisfaisantes ;
- de maintenir la qualité des produits (chambres froides) ;
- de maintenir des caractéristiques de manutention et la qualité des matières en entrée, par exemple zones de stockage des déchets fermées en Scandinavie, prévention de la corrosion des composants dans les industries de traitement des surfaces des métaux.

Les systèmes peuvent être localisés (par exemple réchauffeurs de locaux à infrarouge pour les équipements des zones de stockage) ou centralisés (par exemple systèmes de climatisation des bureaux).

La consommation d'énergie pour le chauffage/refroidissement des locaux est considérable. Par exemple, en France elle est de l'ordre de 30 TWh, ce qui représente approximativement 10 % de la consommation de combustible. Il est fréquent d'avoir des températures de chauffage élevées dans les bâtiments industriels, que l'on pourrait facilement baisser de 1 ou 2 °C ; inversement, pour la climatisation, il est courant d'avoir des températures que l'on pourrait facilement augmenter de 1 ou 2 ºC sans altérer le confort. Ces mesures impliquent un changement pour les employés et elles doivent être mises en œuvre grâce à une campagne d'information.

Les économies d'énergie peuvent être réalisées de deux manières :

- réduction des besoins en chauffage/refroidissement par :
  - isolation des bâtiments,
  - pose de vitrage efficace,
  - réduction des infiltrations d'air,
  - fermeture automatique des portes,
  - déstratification,
  - baisse des réglages de la température pendant les périodes de non production (régulation programmable)
  - baisse des points de consigne,
- amélioration de l'efficacité des systèmes de chauffage par :
  - récupération ou utilisation de la chaleur perdue (voir Section 3.3),
  - pompes à chaleur,
  - système de chauffage rayonnant et local couplés à une réduction des températures dans les zones des bâtiments non occupées.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune donnée communiquée.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles

Avec une baisse de 1 °C de la température de chauffage et une augmentation de 1°C de celle de la climatisation, il est possible de réduire la consommation énergétique d'environ 5 à 10 %, en fonction de la différence moyenne de température entre l'intérieur et l'extérieur. En règle générale, l'élévation des températures de climatisation permet de réaliser des économies plus importantes car les différences de température sont généralement plus élevées. Il s'agit là de généralités et les économies réelles varient en fonction du climat de chaque région.

En limitant le chauffage/le refroidissement pendant les périodes de non-production, il est possible d'économiser 40 % de la consommation électrique d'une installation fonctionnant 8 heures par jour. En limitant le chauffage et en réduisant systématiquement la température dans les zones inoccupées, et en mettant en place un chauffage radiant local dans les zones occupées, il est possible de générer approximativement 80 % d'économie d'énergie en fonction du pourcentage de zones occupées.

Applicabilité
Les températures peuvent être réglées en fonction d'autres critères, par exemple températures minimum régulées pour le personnel, températures maximales pour maintenir la qualité des produits alimentaires.

Aspects économiques
Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[278, ADEME], [234, PROMOT, , 260, TWG, 2008]

3.9.2 Ventilation

Introduction
Un système de ventilation est indispensable au bon fonctionnement de nombreuses installations industrielles. Il assure de nombreuses fonctions, notamment :

- la protection du personnel contre les émissions de polluants et de chaleur à l'intérieur des locaux,
- la protection de la qualité des produits grâce à une atmosphère de travail propre.

Une installation de ventilation est un système comportant de nombreuses parties interagissant entre elles (voir Figure 3.41). Par exemple :

- le réseau d'air (admission, diffusion, réseau de transport),
- les ventilateurs (ventilateurs, moteurs, systèmes de transmission),
- les systèmes de contrôle et de régulation de la ventilation (variation du débit, gestion technique centralisée (GTC), etc.),
- les récupérateurs d'énergie,
- les épurateurs,

- et les différents types de systèmes de ventilation retenus (ventilation générale, ventilation spécifique, avec ou sans conditionnement d'air, etc.).

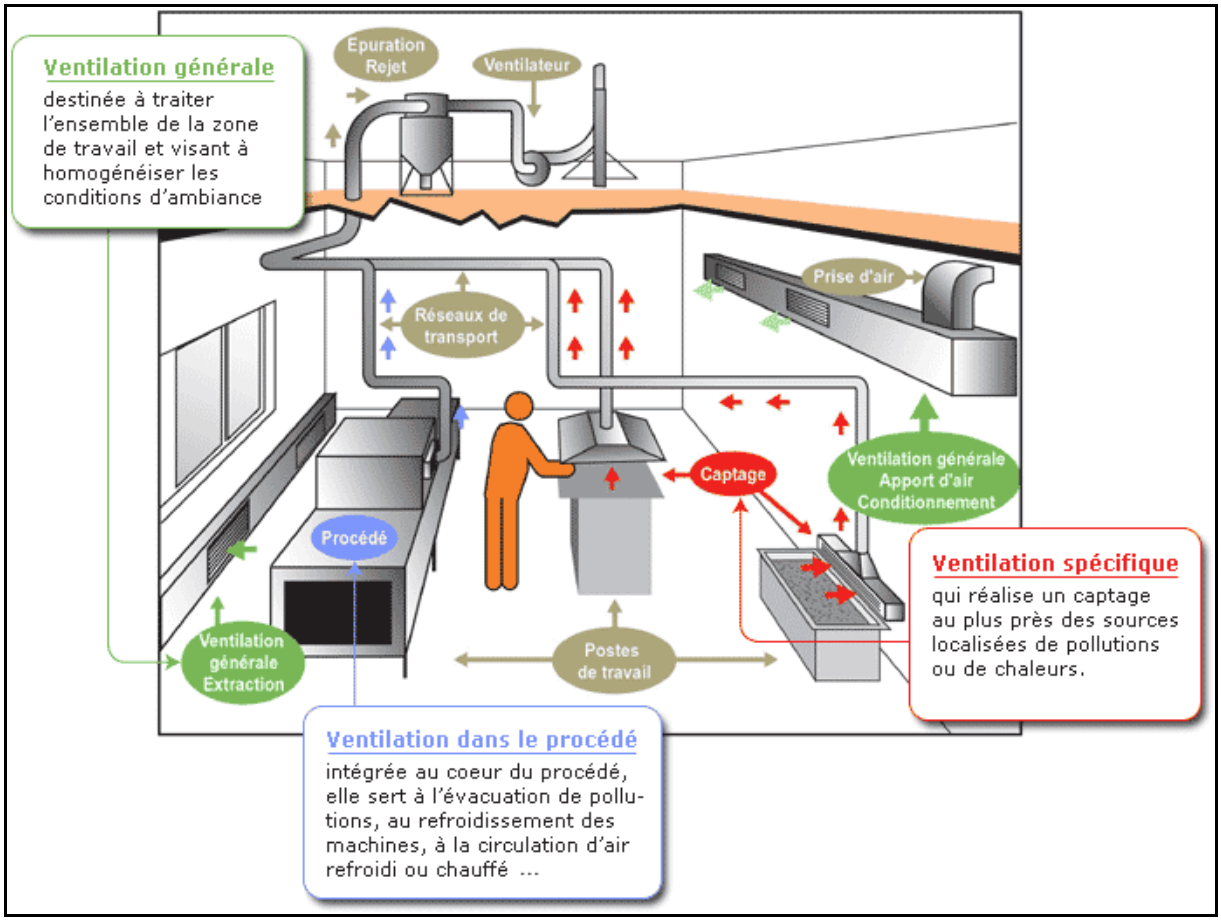


Figure 3.41: Système de ventilation

3.9.2.1 Optimisation de la conception d'un système de ventilation nouveau ou modernisé

Description

Pour bien choisir et bien concevoir un système de ventilation, il est nécessaire de bien connaître ses besoins, qui peuvent être les suivants :

- admission d'air propre
- maintien de conditions ambiantes (température, pression, hygrométrie, etc.), pour améliorer le confort et l'hygiène des zones de travail ou pour protéger les produits
- transport des matières
- extraction de fumées, de poussières, d'humidité et/ou de produits dangereux.

L'organigramme sur la Figure 3.42 facilite l'analyse et le choix des options d'efficacité énergétique les mieux adaptées à une situation particulière :

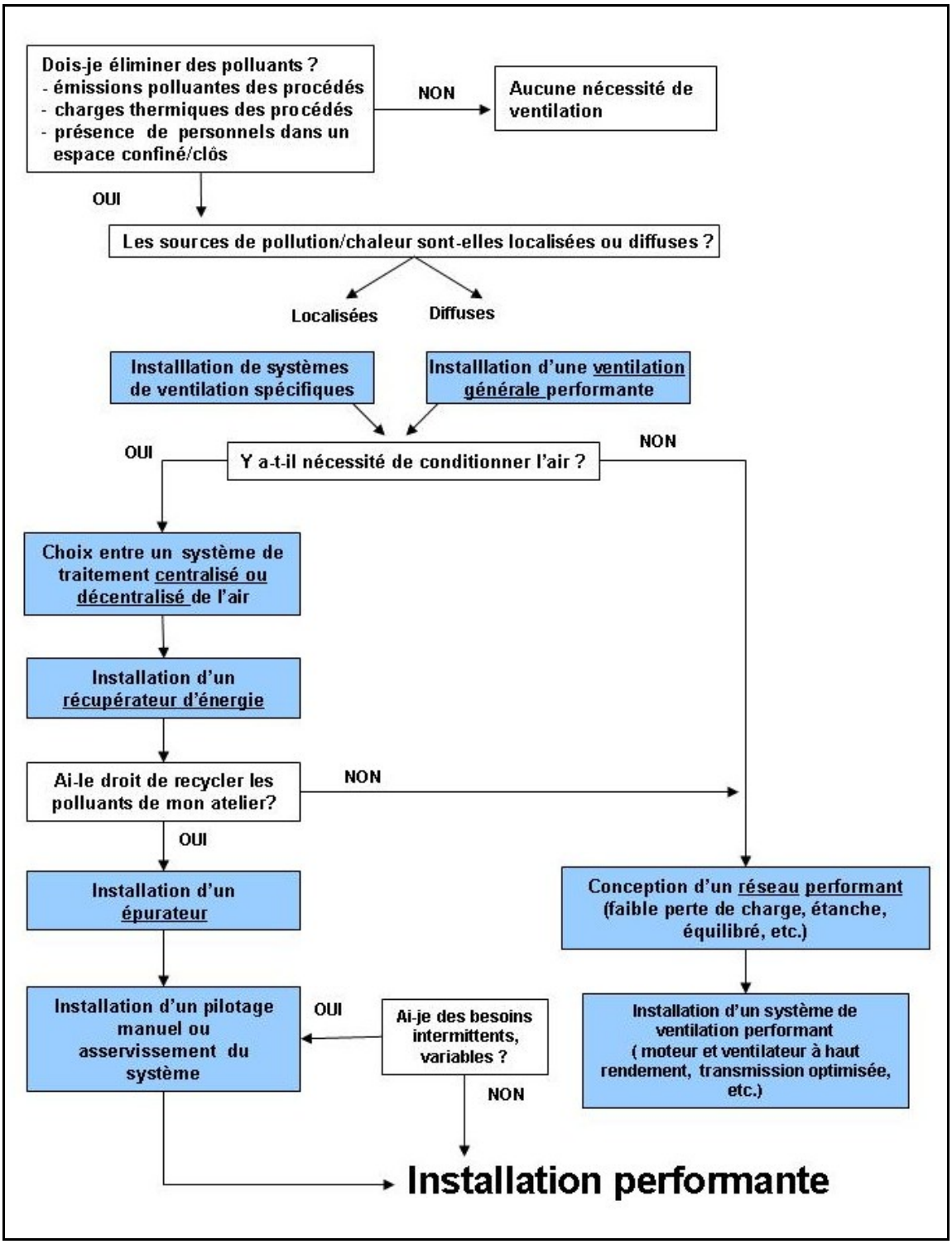


Figure 3.42 : Organigramme : optimisation de la consommation d'énergie dans les systèmes de ventilation

Les interactions et leurs effets relatifs, en particulier entre le ventilateur et le réseau des gaines d'air, peuvent représenter un pourcentage élevé des pertes dans un circuit donné. Il faut donc adopter une approche cohérente pour concevoir un système répondant au cahier des charges et doté d'une efficacité énergétique optimale.

Les types de systèmes de ventilation ci-après peuvent être utilisés, voir Figure 3.41 :

- *ventilation générale :* ces systèmes permettent de renouveler la totalité de l'air dans les zones de travail occupant de grands volumes. Plusieurs types de systèmes de ventilation diffusant de l'air propre sont envisageables, en fonction des locaux à ventiler, de la nature de la pollution et de la nécessité d'avoir ou non une climatisation. Le débit d'air est un élément majeur ayant une incidence sur la consommation d'énergie. Plus le débit d'air est bas, plus la consommation d'énergie est réduite.

- *ventilation spécifique :* ces systèmes sont conçus pour évacuer les émissions au plus proche que possible de leur source. À la différence des systèmes de ventilation générale, ils luttent contre des émissions localisées de polluants. Ces systèmes présentent l'avantage de capter les polluants dès leur émission, grâce à des admissions de captage spécifiques et d'éviter leur dissémination dans la zone de travail, et donc :
  - d'éviter tout contact avec les opérateurs,
  - d'éviter d'avoir à renouveler la totalité de l'air dans la zone de travail.

Dans les deux cas, il est parfois nécessaire de traiter l'air extrait avant son évacuation dans l'atmosphère (voir le BREF CWW (Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique)).

Avantages obtenus pour l'environnement
On estime à 10 % la consommation d'électricité des sociétés imputable aux systèmes de ventilation. Un système de ventilation, avec en outre un conditionnement d'air peuvent représenter une part encore plus importante du budget énergie d'une société.

Effets croisés
Aucun effet croisé communiqué.

Données opérationnelles

- *ventilateurs :* ils sont la principale source de consommation d'électricité d'une installation. Leur type, dimensionnement et mode de commande sont des facteurs importants du point de vue énergétique. Remarque : le choix d'un ventilateur à rendement élevé et bien dimensionné permet parfois d'opter pour un ventilateur plus petit et de réaliser des économies sur le prix d'achat. Lors de la conception ou de la modification d'une installation, les points clés sont les suivants :

  - un ventilateur à rendement nominal élevé : le rendement maximum des ventilateurs est généralement compris entre 60 et 85 % en fonction du type de ventilateur. Les fabricants développent actuellement des ventilateurs dont le rendement est encore amélioré ;
  - un ventilateur conçu pour fonctionner aussi plus près de son régime de fonctionnement optimal : le rendement d'un seul ventilateur peut varier en fonction de son régime de fonctionnement. C'est pourquoi il est capital de bien choisir le dimensionnement du ventilateur par rapport à l'installation pour lui permettre de fonctionner au plus près du régime correspondant à son rendement maximum.

- *réseau d'air :* la conception d'un réseau d'air doit être conforme à certaines conditions afin d'être performant au plan énergétique :

- prévoir des gaines d'un diamètre suffisant (une augmentation de 10 % du diamètre peut entraîner une réduction de 72 % de la puissance absorbée)
- préférer des gaines circulaires qui offrent moins de pertes de charge à section égale que les gaines rectangulaires ;
- choisir le « tracé » le plus simple possible et éviter les obstacles (coudes, rétrécissements, etc.) ;
- vérifier l'étanchéité du réseau, en particulier au niveau des raccords ;
- veiller à l'équilibrage du réseau dès sa conception, pour être certain que tous les « utilisateurs » reçoivent la ventilation nécessaire. L'équilibrage du réseau après sa mise en place implique d'installer des registres à organe mobile unique dans certains conduits, ce qui augmente les pertes de charge et les pertes d'énergie.

- *moteurs électriques et accouplement avec des ventilateurs :* choisir le bon type et la bonne taille de moteur (voir sous-systèmes entraînés par moteur électrique, Section 3.6)

- *gestion du débit d'air :* le débit d'air est un paramètre fondamental lorsqu'il s'agit de la consommation d'énergie des systèmes de ventilation. Par exemple, pour une réduction du débit de 20 %, la réduction de la consommation électrique du ventilateur est de 50 %.
  La plupart des installations de ventilation ne fonctionnent pas en permanence à leur régime maximal. Il est donc important de pouvoir régler la vitesse de fonctionnement du ventilateur, par exemple en fonction de :

  - la production (quantité, type de produits, marche/arrêt des machines, etc.),
  - la période (année, mois, jour, etc.),
  - l'occupation des zones de travail par le personnel.

Il est indispensable d'analyser les besoins au moyen de détecteurs de présence, d'une horloge et d'un asservissement au procédé, et de concevoir une installation de ventilation contrôlée.

Une ventilation à « double flux » qui associe soufflage (admission d'air neuf) et extraction (élimination de l'air vicié) permet un meilleur contrôle du débit d'air ; elle est plus facile à piloter, par exemple par un système de management de récupération de l'énergie et de conditionnement de l'air du procédé. L'installation d'automates est une méthode permettant de piloter le système de ventilation en fonction de divers paramètres (mesurés, définis, etc.) et d'optimiser son fonctionnement à tout moment.

Les techniques permettant de faire varier le débit d'air en fonction de la demande sont nombreuses mais elles ne présentent pas toutes le même intérêt au plan de l'efficacité énergétique :

- les entraînements à vitesse variable électroniques permettent d'adapter la vitesse de fonctionnement des ventilateurs tout en optimisant la consommation d'énergie du moteur, ce qui engendre des économies d'énergie importantes ;
- la modification de l'angle des pales des ventilateurs hélicoïdes permet également de réaliser des économies d'énergie substantielles ;

- *système de récupération d'énergie :* lorsque les locaux ventilés sont dotés d'un système de conditionnement d'air, l'air renouvelé doit être reconditionné, ce qui consomme de grosses quantités d'énergie. Les systèmes de récupération d'énergie (échangeurs) permettent de récupérer une partie de l'énergie contenue dans l'air vicié expulsé hors de

la zone de travail. Lors du choix d'un système de récupération d'énergie, il est utile de vérifier les trois paramètres suivants :

- le rendement thermique,
- les pertes de charge,
- le comportement à l'encrassement.

- *Filtration de l'air :* un filtre à air permet de recycler l'air des locaux ventilés. Le débit d'air à renouveler et à reconditionner est donc réduit, ce qui apporte des gains énergétiques importants. Le choix d'un filtre à air lors de la conception d'une installation de ventilation est recommandé, parce que le surcoût est alors relativement faible par rapport à une installation à posteriori. Il est indispensable de vérifier que les polluants récupérés sont bien recyclables. Lorsque cette solution est envisageable, il est important de connaître les paramètres suivants :

  - l'efficacité du recyclage,
  - les pertes de charge,
  - le comportement à l'encrassement.

Pour améliorer le fonctionnement d'une installation existante, voir Section 3.9.2.2.

Applicabilité
Applicable à tous les nouveaux systèmes ou dans le cadre d'une modernisation.

Aspects économiques
Dans la plupart des installations ayant été soumises à un audit, des gisements d'économie d'énergie pouvant atteindre 30 % de la consommation ont été détectés. Il existe de nombreuses actions envisageables qui permettent souvent d'avoir un retour sur investissement inférieur à 3 ans.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Conditions de santé et de sécurité au travail.
- Économies de coût.
- Qualité des produits.

Exemples
Utilisation très fréquente.

Références bibliographiques
[202, IFTS, 1999]

3.9.2.2 Amélioration d'un système de ventilation existant à l'intérieur d'une installation

Description
Il convient de remarquer que l'amélioration du rendement d'un système de ventilation permet parfois aussi d'améliorer :

- le confort et la sécurité de personnel,
- la qualité des produits.

L'amélioration d'un système de ventilation existant peut se faire à trois niveaux :

- optimisation du fonctionnement de l'installation,
- mise en place d'un plan de maintenance et de surveillance de l'installation,
- investissement dans des solutions techniques plus performantes.

Avantages obtenus pour l'environnement
Les économies d'énergie, après optimisation de tous les paramètres du système de ventilation, engendrent en moyenne une diminution d'environ 30 % de la facture énergétique liée à son fonctionnement.

Effets croisés
Aucun communiqué.

Données opérationnelles
Diagnostic énergétique (audit global)
La connaissance de l'installation est une condition préalable indispensable à l'amélioration de ses performances. Le diagnostic de l'installation permet :

- d'évaluer les performances du système de ventilation,
- de déterminer les coûts impliqués dans la production de l'air comprimé,
- de détecter tout éventuel dysfonctionnement,
- de dimensionner correctement une nouvelle installation.

Maintenance et surveillance de l'installation
La consommation d'énergie d'un système de ventilation augmente au fil du temps, pour un service identique. Pour rester performant, le système doit être soumis à une surveillance et le cas échéant, faire l'objet d'interventions de maintenance, ce qui devrait engendrer des économies d'énergie importantes tout en augmentant la durée de vie du système. Ces interventions consistent notamment à :

- mener des campagnes de détection et de réparation des fuites sur le réseau des gaines d'air ;
- remplacer régulièrement les filtres, notamment sur les épurateurs d'air, parce que :
  - les pertes des charge augmentent très rapidement avec un filtre usagé ;
  - l'efficacité des filtres pour l'élimination des particules s'altère au fil du temps
- vérifier la conformité aux normes d'hygiène et de sécurité associées à l'élimination des substances polluantes ;
- mesurer et enregistrer régulièrement les valeurs clés de l'installation (consommation électrique, perte de charge des dispositifs, débit d'air).

Fonctionnement
- actions immédiates :
  - arrêter ou réduire la ventilation dès que possible. La consommation d'énergie d'une installation de ventilation est directement liée aux débits d'air. Le débit d'air est déterminé par :
    - la présence des exploitants,
    - le nombre de sources de pollutions et le type des polluants,

        - le taux et la répartition de chaque source de pollution
    - remplacer les filtres encrassés ;
    - colmater les fuites ;
    - si l'air est conditionné, vérifier les paramètres et s'assurer qu'ils sont bien adaptés aux besoins du moment.

- actions simples, efficaces :

    - équiper les postes de travail avec des captages spécifiques adaptés ;
    - optimiser le nombre, la forme et la taille des captages de polluants afin de réduire (autant que possible) le débit d'air nécessaire à l'extraction des polluants (voir le BREF STM (Gestion des résidus et des stériles des activités minières)
    - envisager la mise en place d'une régulation automatique du débit de ventilation en fonction du besoin réel. Il existe différentes moyens pour piloter cette régulation :
        - asservissement automatique de la ventilation à une machine (selon les mises en marche/arrêt de cette dernière). La plupart du temps, cette fonction est assurée par des machines outils ou par des torches de soudage équipées d'un système d'aspiration ;
        - mise en place d'un déclenchement automatique de la ventilation lors des émissions de pollution. Par exemple, l'immersion d'une pièce dans un bain de traitement modifie le taux d'émission de pollution. La ventilation peut, dans ce cas être accélérée lors de l'immersion des pièces et réduite le reste du temps ;
        - fermer les bains ou les réservoirs lorsqu'ils ne sont pas utilisés, en manuel ou en automatique (voir le BREF STM (Gestion des résidus et des stériles des activités minières).

Il convient de remarquer qu'une régulation du débit implique de vérifier que les conditions sanitaires restent correctes dans toutes les conditions d'exploitation.

    - Les réseaux de gaines d'air doivent être équilibrés afin d'éviter une surventilation dans certains points. Cet équilibrage peut être effectué par une société spécialisée.

- actions de bon rapport coût efficacité :

    - équiper les ventilateurs avec des variateurs électroniques de vitesse (VEV), en présence de débit variable ;
    - installer des ventilateurs à haut rendement ;
    - installer des ventilateurs dont le régime optimal de fonctionnement correspond aux besoins spécifiques de l'installation ;
    - installer des moteurs à haut rendement (par exemple labellisés EFF1) ;
    - intégrer la gestion du système de ventilation à un système de gestion technique centralisé (CTM) ;
    - mettre en place des instruments de mesure (débitmètres, compteurs électriques) afin de surveiller le fonctionnement de l'installation ;
    - étudier la possibilité d'intégrer des filtres à air dans le réseau des gaines d'air et des dispositifs de récupération d'énergie pour éviter des pertes d'énergie importantes lors de l'évacuation de l'air vicié ;
    - étudier la possibilité de modifier l'ensemble du système de ventilation et de le fractionner en ventilation générale, ventilation spécifique et ventilation des procédés.

Applicabilité
Applicable à tous les systèmes existants.

Aspects économiques
Dans la plupart des installations ayant été soumises à un audit, des gisements d'économie d'énergie pouvant atteindre 30 % de la consommation ont été détectés. Il existe de nombreuses actions possibles offrant un retour sur investissement de moins de deux ans.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Conditions d'hygiène et de sécurité au travail.
- Économies de coût.
- Qualité des produits.

Exemples
Utilisation très courante.

Références bibliographiques
[202, IFTS, 1999]

3.9.3 Refroidissement gratuit (free-cooling)

Description
L'adoption des techniques de *refroidissement gratuit* permet d'améliorer l'efficacité énergétique à la fois pour les procédés industriels et/ou la climatisation. Il y a refroidissement gratuit lorsque l'enthalpie de l'air ambiant extérieur est inférieure à l'enthalpie de l'air intérieur. Le refroidissement est *gratuit* parce qu'il utilise l'air ambiant.

La contribution gratuite peut être transférée au système nécessitant un refroidissement soit directement, soit indirectement. Dans la pratique, on utilise en principe des méthodes indirectes. Elles comportent généralement des systèmes d'extraction-recirculation de l'air (voir Figure 3.43). La régulation est assurée par des vannes de régulation automatique : lorsque l'air frais extérieur est disponible (c'est-à-dire lorsque la température du thermomètre humide extérieur est en dessous du point de consigne de l'eau réfrigérée), les vannes augmentent automatiquement l'admission d'air frais, ce qui réduit simultanément la recirculation interne à un minimum afin de maximaliser l'utilisation du refroidissement gratuit. L'utilisation de techniques semblables à cette dernière, permet de s'affranchir partiellement de l'emploi d'équipement de réfrigération dans certaines saisons de l'année et/ou pendant la nuit. Il existe plusieurs possibilités techniques permettant de tirer parti du refroidissement gratuit. La Figure 3.43 représente une installation simple avec refroidissement gratuit qu'il est possible de réaliser.

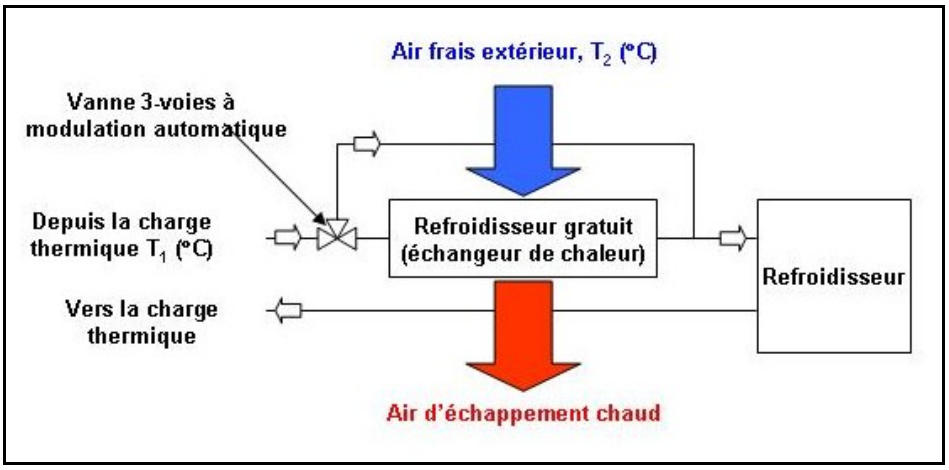


Figure 3.43 : Schéma d'un exemple de mise en œuvre du refroidissement gratuit

L'eau renvoyée depuis la charge thermique à destination du refroidisseur est automatiquement dérivée par la vanne 3-voies pour être acheminée au refroidisseur gratuit (échangeur de chaleur) . L'eau y est pré refroidie, ce qui réduit la charge thermique imposée au refroidisseur et l'énergie consommée par les compresseurs. Plus la température ambiante descend en dessous de la température de l'eau de retour, plus l'effet du refroidissement gratuit est important et plus les économies d'énergie sont conséquentes.

Avantages obtenus pour l'environnement

En principe, les refroidisseurs sont entraînés par des moteurs électriques et quelquefois par des entraînements endothermiques ; il y a donc une réduction de la consommation des ressources d'énergie primaire.

Effets croisés

Aucun communiqué.

Données opérationnelles

Le refroidissement gratuit est davantage envisageable lorsque la température ambiante est inférieure d'au moins 1 °C à la température de l'eau provenant de la charge thermique, c'est-à-dire de l'eau qui entre dans le refroidisseur. Par exemple, sur la Figure 3.43, si T_1 (température de l'eau renvoyée à partir de la charge thermique) est de 11 °C, le refroidissement gratuit peut être activé lorsque T_2 (température de l'air extérieur) passe en dessous de 10 °C.

Applicabilité

Le refroidissement gratuit est applicable dans des circonstances spécifiques : pour un transfert indirect, la température de l'air ambiant doit être inférieure à la température du fluide réfrigérant renvoyé au refroidisseur ; pour les utilisations directes, la température de l'air extérieur doit être égale ou inférieure à la température requise. Il faut également pouvoir disposer d'un espace supplémentaire pour la mise en place des équipements.

On estime que cette méthode est applicable dans 25 % des cas.

Les échangeurs à refroidissement gratuit peuvent être adaptés sur les circuits d'eau réfrigérée existants et/ou incorporés à de nouveaux systèmes.

Aspects économiques
L'adoption des techniques de refroidissement gratuit implique une série d'avantages économiques, notamment : la source de froid est gratuite, une réduction du nombre d'heures de fonctionnement des compresseurs avec les économies d'énergie qui en découlent en termes de kWh du réseau électrique non consommés, une réduction du coût de l'approvisionnement en électricité.

Il est souhaitable, en principe, d'étudier l'éventualité de l'emploi du refroidissement gratuit lors de la planification du projet d'un nouveau système ou d'un système modernisé. Le retour sur investissement pour un nouveau système peut être de 12 mois ; le retour sur investissement d'une modernisation d'unités peut atteindre 3 ans.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Simplicité d'installation.
- Économies d'énergie et d'argent.

Exemples
Utilisation très fréquente.

Références bibliographiques
[240, Hardy, , 241, Coolmation]

3.10 Éclairage

Description
L'éclairage artificiel représente une part importante de la consommation d'énergie électrique totale dans le monde. Dans les bureaux, l'éclairage représente entre 20 et 50 pourcents de la consommation d'énergie totale. Mais de surcroît, dans certains bâtiments, plus de 90 % de la consommation d'énergie pour l'éclairage constitue une dépense inutile en raison d'un éclairement lumineux excessif. Ainsi, l'éclairage représente une pièce maîtresse de la consommation d'énergie aujourd'hui, notamment dans les grands immeubles de bureaux ainsi que dans d'autres emplois à grande échelle où il existe de nombreuses alternatives pour réduire la consommation de l'énergie consacrée à l'éclairage.

Il existe plusieurs techniques pour minimiser les besoins en énergie dans tous les bâtiments :

a) identification des besoins en éclairage pour chaque zone

Ce concept fondamental consiste à décider du niveau d'éclairement requis pour une tâche donnée. Les types d'éclairage sont classés selon leur utilisation, à savoir éclairage général, éclairage localisé ou éclairage d'une tâche, en fonction de la diffusion de la lumière produite par la lampe. En clair, la quantité de lumière nécessaire pour éclairer un trottoir est inférieure à celle nécessaire pour éclairer un poste de travail informatique. En règle générale, l'énergie dépensée est proportionnelle au niveau d'éclairement théorique. Par exemple, un niveau d'éclairement de 800 lux peut être choisi pour un environnement de travail englobant des salles de réunion et de conférence, tandis qu'un niveau de 400 lux peut être choisi pour les couloirs d'un immeuble :

- l'éclairage général est destiné à l'éclairement général d'une zone. À l'intérieur, il peut s'agir d'une simple lampe de bureau, d'un lampadaire, ou d'un plafonnier. À l'extérieur, par exemple pour une zone de stationnement, la valeur retenue peut n'être que de 10 à 20 lux car les piétons et les automobilistes qui sont déjà accoutumés à l'obscurité ont besoin de peu de lumière pour traverser la zone ;

- l'éclairage des tâches est principalement fonctionnel comme pour lire ou inspecter des produits et c'est habituellement l'éclairage le plus concentré. Par exemple, pour la lecture de documents dont la qualité d'impression est médiocre, les niveaux d'éclairage requis peuvent atteindre 1500 lux et pour certaines tâches d'inspection ou pour des interventions chirurgicales les niveaux requis sont encore plus élevés.

b) analyse de la qualité et de la conception de l'éclairage

- intégration de la planification de l'espace à la conception interne (incluant le choix des surfaces d'intérieur et de la géométrie des pièces) afin d'optimiser l'utilisation de la lumière naturelle. L'emploi de la lumière naturelle contribue non seulement à réduire la consommation d'énergie, mais a un impact favorable sur la santé et les performances des êtres humains ;
- planification des activités pour optimiser l'utilisation de la lumière naturelle ;
- prise en compte du spectre requis pour toutes les activités nécessitant de la lumière artificielle ;
- choix de modèles d'appareils et de lampes qui reflètent les meilleures techniques disponibles pour la conservation de l'énergie.

Les types d'éclairages électriques comprennent :

- *les lampes à incandescence :* une lampe à incandescence utilise le principe d'excitation des particules par la chaleur et produit de la lumière lorsqu'un courant électrique traverse un mince filament et le chauffe à une température élevée. Le filament est enfermé dans une ampoule de verre pour éviter que l'oxygène de l'air ne détruise le filament chaud.

  Les lampes à incandescence présentent l'avantage d'être fabriquées dans un large éventail de tensions, allant de quelques volts à plusieurs centaines de volts. En raison de leur efficacité lumineuse relativement médiocre, elles sont progressivement remplacées dans de nombreux applications par des lampes fluorescentes, des lampes à décharge haute intensité, des diodes électroluminescentes (DEL) et d'autres dispositifs.

- *Les lampes à arc ou les lampes à décharge de gaz* : l'expression lampe à arc est l'expression générique désignant une catégorie de lampes qui produisent de la lumière par un arc électrique (ou arc voltaïque). La lampe comprend deux électrodes qui sont généralement en tungstène et qui sont séparées par un gaz. Ces lampes utilisent en principe un gaz rare (argon, néon, krypton ou xénon) ou un mélange de ces gaz. La plupart d'entre elles contiennent des matériaux supplémentaires, notamment du mercure, du sodium et/ou des halogénures métalliques. La lampe fluorescente classique est en réalité une lampe à arc à mercure basse pression dont l'ampoule est revêtue à l'intérieur par une couche de phosphore émettant de la lumière. Les lampes à décharge haute intensité fonctionnent à un courant supérieur à celui des lampes fluorescentes et il en existe de nombreux modèles en fonction du matériau faiblement utilisé. On peut dire qu'un éclair est une sorte de lampe à arc naturel, ou du moins une lampe éclair. Ce type

de lampe tire souvent son appellation du gaz contenu dans l'ampoule, par exemple néon, argon, xénon, krypton, sodium, halogénures métalliques et mercure. Les lampes à arc ou à décharge de gaz les plus courantes sont les suivantes :

- les lampes fluorescentes,
- les lampes aux halogénures métalliques,
- les lampes à vapeur de sodium haute pression,
- les lampes à vapeur de sodium basse pression.

Dans une lampe à arc ou à décharge de gaz, l'arc électrique est entretenu par un gaz qui est initialement ionisé par l'injection d'un courant de forte intensité et qui devient conducteur. Pour allumer une lampe à arc, il faut habituellement une très haute tension « d'allumage » ou « d'amorçage » de l'arc. Il est donc nécessaire d'avoir un circuit électrique dénommé parfois « allumeur », qui fait partie d'un circuit plus grand appelé « ballast ». Le ballast fournit la tension et le courant nécessaires au fonctionnement de la lampe car ses caractéristiques électriques se modifient avec la température et le temps. Le ballast est généralement conçu pour conserver des conditions de fonctionnement sûres et une émission de lumière constante pendant toute la durée de vie de la lampe. La température de l'arc peut atteindre plusieurs milliers de degrés Celsius. Une lampe à arc ou à décharge de gaz a une longue durée de vie et une efficacité lumineuse élevée, mais sa fabrication est plus complexe, fait appel à l'électronique pour fournir le débit de courant correct à travers le gaz.

- *lampes au soufre* : la lampe au soufre est un système d'éclairage sans électrode à spectre complet et à haut rendement dont la lumière est générée par un plasma de soufre qui est excité par un rayonnement micro-onde.

À l'exception des lampes fluorescentes, le temps de préchauffage d'une lampe à soufre est remarquablement court par rapport aux autres lampes à décharge de gaz, même à basse température ambiante. Elle atteint 80 % de son flux lumineux final en 20 secondes (vidéo) et elle peut être redémarrée approximativement cinq minutes après une coupure de courant.

- *diodes électroluminescentes, y compris les diodes électroluminescentes organiques (DELO) :* une diode électroluminescente (DEL) est une diode à semi-conducteur qui émet une lumière incohérente à spectre étroit.

L'un des principaux avantages de l'éclairage avec des DEL réside dans leur efficacité lumineuse élevée, telle qu'exprimée par le rapport du flux lumineux émis par unités de puissance électrique consommée.

Si la couche émettrice d'une DEL est un composé organique, la lampe prend le nom de diode électroluminescente organique (DELO). Comparé aux DEL normales, les DELO sont plus légères, et les diodes électroluminescentes à polymère présentent l'avantage supplémentaire d'être souples. L'application commerciale de ces deux types de lampe a vu le jour, mais les applications à l'échelle industrielle sont encore limitées.

Les différents types de lampes ont des rendements immensément différents comme le montre le tableau Table 3.27ci-dessous.

Nom	Spectre optique	Efficacité nominale (lm/W)(1)	Durée de vie Temps moyen entre	Température De couleur(2) (kelvin)	Couleur	Indice de rendu des couleurs

			panne, MTBF (heures)			(4)
Lampe à incandescence	Continu	12 – 17	1000 – 2500	2700	Blanc chaud (jaunâtre)	100
Lampe halogène	Continu	16 – 23	3000 – 6000	3200	Blanc chaud (jaunâtre)	100
Lampe fluorescente	Mercure + phosphore	52 – 100	8000 – 20000	2700 – 5000	Blanc (avec une nuance de vert)	15 – 85
Lampe aux halogénures métalliques	Quasi-continu	50 – 115	6000 – 20000	3000 – 4500	Blanc froid	65 – 93
Lampe à vapeur de sodium haute pression	Large bande	55 – 140	10000 – 40000	1800 – 2200(3)	Orange rosé	0 – 70
Lampe à vapeur de sodium basse pression	Raie étroite	100 – 200	18000 – 20000	1800(3)	Jaune, Pratiquement sans aucun rendu des couleurs	0
Lampe au soufre	Continus	80 – 110	15000 – 20000	6000	Vert pâle	79
Diodes électroluminescentes		20 – 40	100000		(Lumière ambre et rouge)	
		10 – 20			(Lumière bleue et verte)	
		10 – 12			(blanc)	

(1) 1 lm = 1 cd·sr = 1 lx·m^2. (2) La température de couleur est définie comme la température d'un corps noir émettant un spectre similaire. (3) Ces spectres sont très différents de ceux des corps noirs. (4) L'indice de rendu des couleurs (IRC) est une mesure de la capacité d'une source lumineuse à reproduire les couleurs des divers objets qu'elle éclaire.

Tableau 3.27 : Caractéristiques et rendement des différents types de lampes

La source de lumière électrique la plus rentable est la lampe à vapeur de sodium basse pression. Elle produit une lumière orange presque monochromatique, qui déforme fortement la perception des couleurs. Pour cette raison, elle est généralement réservée aux éclairages publics extérieurs. Les lampes à vapeur de sodium basse pression génèrent une pollution légère qui peut être facilement filtré contrairement aux spectres à large bande ou continus.

Des données sur des options telles que les types d'éclairage, sont disponibles par le programme GreenLight. Le programme GreenLight est une action volontaire pour préserver l'environnement qui encourage les consommateurs d'électricité du secteur non résidentiel (publics et privés), référencés en tant que Partenaires, à s'engager auprès de la Commission Européenne sur l'installation des technologies d'éclairage à rendement optimum dans leurs équipements quand (1) le choix technologique est économiquement rentable, et (2) la qualité de l'éclairage maintenue ou améliorée.

c) gestion de l'éclairage

- mettre l'accent sur l'utilisation de systèmes de contrôle de gestion de l'éclairage, incluant notamment des détecteurs d'occupation, des minuteries, etc. ayant pour objectif de réduire la consommation liée à l'éclairage ;
- former les occupants des immeubles à utiliser les éclairages de la manière la plus efficace ;
- entretenir les systèmes d'éclairage pour minimiser le gaspillage d'énergie.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Certains types de lampes, par exemple les lampes à vapeur de mercure, les lampes fluorescentes contiennent des produits chimiques toxiques, tels que le mercure ou le plomb. À la fin de leur durée de vie utile, les lampes doivent être recyclées ou jetées dans des conditions correctes.

Données opérationnelles
Il est utile de fournir une intensité lumineuse correcte et un spectre de couleurs adaptés à chaque tâche ou environnement. Dans le cas contraire, on risque non seulement de gaspiller de l'énergie mais un éclairement excessif peut aussi induire des effets nocifs sur la santé et le psychisme, notamment des maux de tête fréquents, du stress et une augmentation de la tension artérielle. En outre, l'éblouissement ou une source de lumière excessive risquent d'entraîner une baisse de productivité du personnel. La lumière artificielle de nuit a été associée avec des cycles menstruels irréguliers.

Pour évaluer l'efficacité, des modèles de référence et post-installation peuvent être construits en utilisant les procédés associés aux options de mesure et vérification (M&V) A, B, C et D décrites dans le Tableau 3.28.

Option M&V	Méthode de calcul des économies d'énergie	Coût
Option A: Se base sur l'aspect physique du changement (équipement) opéré pour vérifier que l'installation est conforme aux spécifications. Les facteurs de performance clés (éclairage ou wattage) sont déterminés par des mesures ponctuelles ou sur le court terme et les facteurs opérationnels (nombre d'heures d'utilisation de l'éclairage) sont estimés à partir de l'analyse historique des données ou de mesures ponctuelles ou sur le court terme. Mesure ou vérification annuelle des facteurs de performance et du bon fonctionnement.	Calculs d'ingénierie utilisant des mesures ponctuelles ou sur le court terme, des simulations informatiques et/ou des données historiques	En fonction du nombre de points de mesure. Approx. 1 à 5 % du coût du projet
Option B: Les économies d'énergie sont déterminées après l'achèvement du projet par des mesures sur le court terme ou par des mesures prises tout au long du contrat au niveau du système ou de l'équipement concerné). Surveillance à la fois des facteurs de performance et des facteurs opérationnels.	Calculs d'ingénierie utilisant des relevés de mesures	En fonction du nombre et du type de systèmes mesurés mais aussi du type de contrat d'analyse/mesure. En règle générale, 3 à 10 % du coût d'élaboration du projet
Option C: Après l'achèvement du projet, les économies sont déterminées au niveau de	Analyse des relevés des utilités (globaux ou détaillés) au moyen de	En fonction du nombre et de la complexité des paramètres de l'analyse. En règle

l'ensemble du bâtiment ou de la globalité de l'installation en utilisant les relevés des compteurs de l'année en cours ou des données issus des anciens relevés de compteurs ou de sous-compteurs.	techniques allant de la simple comparaison aux analyses de régression multivariées (horaire ou mensuelle).	générale, 1 à 10 % du coût d'élaboration du projet
Option D: Les économies sont déterminées par le biais d'une simulation de composants et/ou d'une simulation globale (toute l'installation)	Simulation/modélisation calibrées avec des données de facturation des utilités à l'heure ou au mois et/ou des relevés de consommation finale	En fonction du nombre et de la complexité des systèmes évalués. En règle générale, 3 à 10 % du coût d'élaboration du projet

Tableau 3.28 : Économies réalisables à partir des systèmes d'éclairage

La seule section du protocole qui concerne l'éclairage est reproduite dans la présente section. Pour plus d'information, il est possible de télécharger la totalité du protocole à l'adresse suivante http://www.evo-world.org/.

Applicabilité

Des techniques telles que l'identification de l'éclairement requis pour chaque zone d'utilisation, les activités de planification afin d'optimiser l'utilisation de la lumière naturelle, le choix des types de lampes et d'appareils en fonction des exigences spécifiques à l'utilisation qui va en être faite, et la gestion de l'éclairage sont applicables à toutes les installations relevant de l'IPPC. D'autres mesures telles que l'intégration de la planification de l'espace afin d'optimiser l'utilisation de la lumière naturelle sont applicables uniquement aux installations nouvelles ou modernisées.

Aspects économiques

Les investissements dans le cadre du Programme Green Light utilisent une technologie, des produits et des services ayant fait leurs preuves, qui sont susceptibles de réduire la consommation d'énergie pour l'éclairage de 30 à 50 %, les retombées étant quant à elles comprises entre 20 et 50 %.

Le retour sur investissement peut être calculé en utilisant les techniques décrites dans le document de référence ECM (Aspects économiques et effets croisés).

Agents moteurs pour la mise en œuvre

- Santé et sécurité au travail.
- Économies d'énergie.

Exemples

Utilisation très répandue.

Références bibliographiques

[209, Wikipedia, , 210, EC, 2000] [210, EC, 2000, 238, Hawken, 2000, 242, DiLouie, 2006] [211, ADEME, 1997, 212, BRE_UK, 1995, 213, EC, , 214, EC, 1996, 215, Initiatives, 1993, 216, Initiatives, 1995, 217, Piemonte, 2001, 218, Association, 1997, 219, IDAE]

3.11 Procédés de séchage, de séparation et de concentration

Introduction
Le séchage est un procédé énergivore. Il est étudié ici en même temps que les techniques de séparation et de concentration, car grâce à l'utilisation de ces différentes techniques ou combinaisons de techniques, il est possible de réaliser des économies d'énergie.

La chaleur peut être transférée par convection (sécheurs directs), par conduction (sécheurs à contact ou indirects) par rayonnement thermique comme le rayonnement infrarouge, micro-ondes ou par champ électromagnétique haute fréquence (sécheurs rayonnants) ou par une combinaison de ces moyens. La plupart des sécheurs industriels sont de type convectif et utilisent des gaz de combustion directe ou de l'air chaud comme fluide de séchage.

La séparation est un procédé qui transforme un mélange en au moins deux flux (qui peuvent être des flux de produits-produits ou de produits-déchets) qui sont de compositions différentes. La technologie de séparation consiste, de ce fait, à fractionner et à isoler les produits souhaités à partir d'un mélange contenant différentes substances ou une substance pure sous forme de plusieurs phases ou tailles. En variante, la séparation peut également être utilisée pour séparer des flux de déchets, voir le BREF CWW (Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique).

Le procédé de séparation se déroule dans un dispositif de séparation avec application d'un gradient de séparation par un agent séparateur. Dans la présente section, les procédés de séparation ont été classés en fonction des différents principes de séparation et des différents agents de séparation utilisés.

L'objectif de cette section n'est pas de décrire de manière complète chaque technique de séparation, mais d'étudier essentiellement les points qui recèlent un gisement plus important d'économies d'énergie. Pour plus de détails sur une méthode donnée, voir les Références bibliographiques.

Classement des méthodes de séparation :

- apport d'énergie dans le système :
  un classement détaillé de ces techniques peut être établi en fonction des différents types d'énergie apportés au système comme énuméré ci-dessous :
  - chaleur (vaporisation, sublimation, séchage),
  - rayonnement,
  - pression (recompression mécanique de vapeur),
  - électricité (électrofiltration du gaz, électrodialyse),
  - magnétisme (utilisation d'aimants) (voir les métaux ferreux et non ferreux, EFS pour les métaux non ferreux),
  - énergie cinétique (séparation centrifuge) ou énergie potentielle (décantation).

- extraction d'énergie hors du système :
  - refroidissement ou congélation (condensation, précipitation, cristallisation, etc.)

- barrières mécaniques :
  - filtres ou membranes (nanofiltration, ultrafiltration ou microfiltration, perméation de gaz, tamisage)

- autres :
  - interactions physico-chimiques (solution/précipitation, adsorption, flottation, réactions chimiques),
  - différences entre d'autres propriétés physiques ou chimiques des substances comme densité, polarité etc.

La combinaison des principes de séparation ou des agents de séparation précédemment mentionnés est applicable à plusieurs procédés, ce qui conduit à des techniques de séparation hybrides. À titre d'exemple, on peut citer :

- la distillation (vaporisation et condensation),
- la pervaporation (vaporisation et membrane),
- l'électrodialyse (champ électrique et membrane échangeuse d'ions),
- séparation cyclonique (énergie cinétique et énergie potentielle).

3.11.1 Sélection de la technologie ou de la combinaison de technologies optimales

Description
Le choix d'une technologie de séparation s'opère souvent parmi plusieurs solutions possibles. Il est fonction des caractéristiques de la charge d'alimentation et des sorties requises ainsi que d'autres contraintes liées au type d'installation et au secteur. Le procédé de séparation possède également ses propres contraintes. Il est possible d'utiliser des technologies en étage, c'est-à-dire avec deux étapes ou plus d'une même technologie ou de combinaison de différentes technologies.

Avantages obtenus pour l'environnement
Réduction de la consommation d'énergie. Une quantité significative d'énergie peut être économisée s'il est possible d'utiliser deux ou plus de deux étages de séparation ou prétraitements (voir la rubrique Exemples ci-dessous).

Effets croisés
Aucun effet croisé rapporté.

Données opérationnelles
Avant de sélectionner une technique de séparation, certains facteurs liés au matériau d'alimentation, au produit final ou au procédé doivent être pris en considération, notamment :

- matériau d'alimentation :
  - type, forme :
    - liquide
    - pâte
    - granulaire, en poudre
    - fibreux
    - plat
    - courroie
    - déjà en forme
  - fragilité mécanique

  - thermosensibilité
  - teneur en humidité
  - débit/quantité à traiter
  - si applicable :
    - forme et taille
    - taille des gouttelettes
    - viscosité

- spécifications du produit final :
  - teneur en humidité
  - forme et taille
  - qualité :
    - couleur
    - oxydation
    - goût

- procédé :
  - discontinu (en lot) /continu
  - sources de chaleur :
    - combustibles fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon, etc.)
    - électricité
    - énergie renouvelable (solaire, bois, etc.)
  - transfert de chaleur par :
    - convection (air chaud, vapeur surchauffée)
    - conduction
    - rayonnement thermique (énergies rayonnantes : infrarouge, micro-ondes, haute fréquence)
  - température maximale
  - capacité
  - temps de résidence
  - action mécanique sur le produit.

Une étude de faisabilité est nécessaire pour définir les meilleures solutions d'un point de vue technique, économique, énergétique et environnemental. Les exigences doivent être définies avec précision :

- paramètres d'alimentation et des produits (caractéristiques de masse et de débit) en particulier teneur en humidité du produit : les derniers pourcentages d'humidité sont habituellement les plus difficiles à sécher et sont de ce fait les plus énergivores ;
- liste de toutes les utilités disponibles (électricité, réfrigération, air comprimé, vapeur, autres sources de froid ou de chaud) et de leurs caractéristiques ;
- espace disponible ;
- possibilité de prétraitement ;
- potentiel de récupération de la chaleur perdue pour le procédé ;
- équipement et sources d'utilités à haut rendement énergétique (moteurs à haut rendement, utilisation de la chaleur perdue, etc.).

Il y a lieu d'effectuer une analyse comparative des propositions sur une base technique, économique, énergétique et environnementale :

- à l'intérieur des mêmes limites, incluant les utilités, le traitement des effluents, etc.
- en tenant compte de chaque incidence sur l'environnement (air, eau, déchet, etc.)
- en tenant compte de la maintenance et de la sécurité ;
- en quantifiant les temps et coûts de formation des opérateurs.

La Figure 3.44 représente la consommation énergétique de certains procédés de séparation en fonction des tailles d'espèces à séparer.

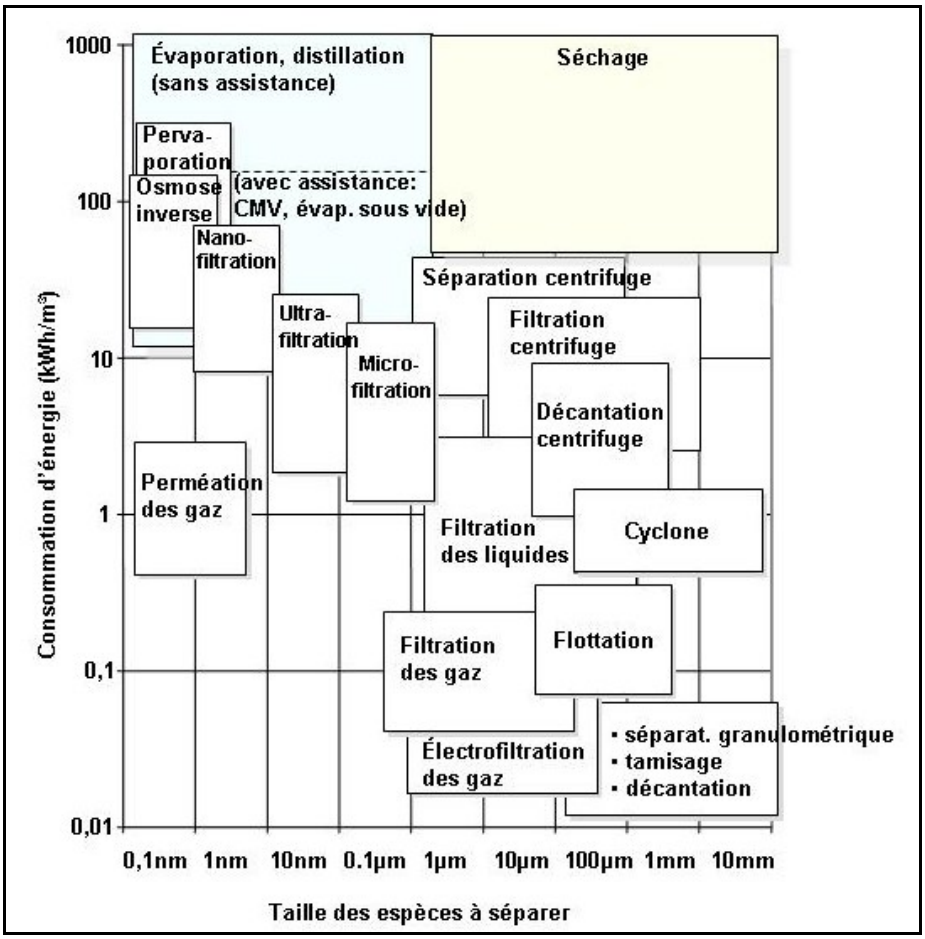


Figure 3.44 : Consommation d'énergie relative des procédés de séparation [248, ADEME, 2007]

Applicabilité

L'identification des technologies appropriées est applicable dans tous les cas. L'installation d'un nouvel équipement est habituellement réalisée en fonction du coût-avantage et/ou pour des raisons de qualité de production ou de productivité.

Aspects économiques

Aucune donnée communiquée

Agents moteurs pour la mise en œuvre

- réduction des coûts,
- qualité des produits,
- capacité de production du procédé.

Exemples
Pour le séchage des liquides (par exemple séchage par pulvérisation), le prétraitement peut être une filtration sur membrane (osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration ou microfiltration). La filtration sur membrane, dont la consommation d'énergie est de 1 à 3 ordres de grandeur inférieure au séchage par évaporation, peut être utilisée à titre d'étape de prétraitement. Par exemple, dans l'industrie du séchage, le lait peut être concentré jusqu'à obtention d'une teneur en humidité de 76 % avant un séchage par pulvérisation.

Références bibliographiques
[201, Dresch, 2006]

3.11.2 Procédés mécaniques

Description
La consommation d'énergie des procédés mécaniques peut être de plusieurs ordres de grandeur inférieure aux procédés de séchage thermique, voir Figure 3.44.

Lorsque le produit à sécher l'autorise, il est souhaitable d'utiliser de manière prédominante des procédés de séparation essentiellement mécaniques afin de réduire la quantité d'énergie consommée pour l'ensemble du procédé. En règle générale, la majorité des produits peut faire l'objet d'un prétraitement mécanique pour obtenir des niveaux moyens de teneur en humidité (le rapport entre la masse du liquide à extraire et la masse de matière sèche) compris entre 40 et 70 pourcents. En pratique, l'utilisation des procédés mécaniques est limitée par les charges de matière autorisées et/ou les temps de séchage économiquement rentables.

Parfois, le recours à des procédés mécaniques est également souhaitable avant un traitement thermique. Pour le séchage de solutions ou de suspensions (séchage par pulvérisation, par exemple), le prétraitement peut être une filtration sur membrane (osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration ou microfiltration). Par exemple, dans l'industrie des produits laitiers, le lait peut être concentré jusqu'à l'obtention d'une teneur en humidité de 76 % avant un séchage par pulvérisation.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune donnée communiquée.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
Aucune donnée communiquée.

Aspects économiques
Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[202, IFTS, 1999]

3.11.3 Techniques de séchage thermique

3.11.3.1 Calcul des besoins en énergie et du rendement énergétique

Description
Le séchage est une méthode fréquemment utilisée dans de nombreux secteurs industriels. Dans un système de séchage, le produit à sécher est tout d'abord chauffé jusqu'à la température de vaporisation de l'eau, puis l'eau est évaporée à une température constante :

$$Q_{th} = (c_G m_G + c_W m_W)\,\Delta T + m_D \Delta H_V$$ **Équation 3.13**

où :

- Q_{th} = sortie utile en kWh/h
- m_G, m_W = débit massique de matière sèche et proportion d'eau dans le produit en kg/s
- ΔT = modification de la température de chauffage en Kelvin
- m_D = quantité d'eau évaporée par unité de temps en kg/s
- c_G, c_W = capacités de chauffage spécifique des matières sèches et proportion d'eau dans le produit à sécher en kJ/(kg K)
- ΔH_V = chaleur de vaporisation de l'eau à la température d'évaporation respective (approximativement 2300 kJ/kg à 100 °C).

Le volume d'eau vaporisée est généralement éliminé en utilisant l'air provenant de la chambre de séchage. La demande en puissance Q_{pd} nécessaire pour chauffer le volume d'air en entrée (à l'exclusion de la sortie de chaleur utile Q_{th}) peut être calculée comme indiqué dans l'Équation 3.14.

$$Q_{pd} = V_{Cpd} \Delta T_{pd}$$ **Équation 3.14**

où :

- Q_{pd} = demande en puissance requise pour chauffer l'air en entrée en kWh/h (pertes par échappement thermique)
- V = débit de l'air en entrée en m^3/h
- c_{pd} = capacité de chauffage spécifique de l'air (approximativement 1,2 $kJ/m^3 \cdot K$) à 20 °C et 1013 mbar)
- ΔT_{pd} = différence entre la température de l'air frais et de l'air d'échappement en Kelvin.

Les pertes thermiques de l'installation (comme les pertes par la surface) doivent également être prises en compte et s'ajoutent aux valeurs précédentes. Ces pertes du système correspondent à la puissance d'attente Q_{hp} (demande en énergie du système lorsqu'il est non chargé, à la température de service, et en mode de recirculation de l'air uniquement). La totalité des besoins en chaleur est représentée dans l'Équation 3.15.

$$Q_I = Q_{th} + Q_{pd} + Q_{hp}$$ **Équation 3.15**

où:

- Q_I = puissance requise en sortie
- Q_{hp} = demande en puissance pour les systèmes non chargés.

Le rendement thermique de la combustion doit être pris en compte, en fonction de l'équipement de combustion. En conséquence, la sortie Q_{total} est telle que représentée dans l'équation 3.16.

$$Q_{total} = Q_I/\eta_{combustible}$$ **Équation 3.16**

où:

- Q_{total} = puissance totale en sortie
- $H_{combustible}$ = rendement thermique.

La Figure 3.45 représente les plages de consommation d'énergie secondaire spécifique par kilo d'eau évaporé à charge maximale et avec les performances d'évaporation maximales possibles pour divers types de sécheurs. À des fins de comparaison, on suppose que les sécheurs par convection utilisent un chauffage à résistance électrique.

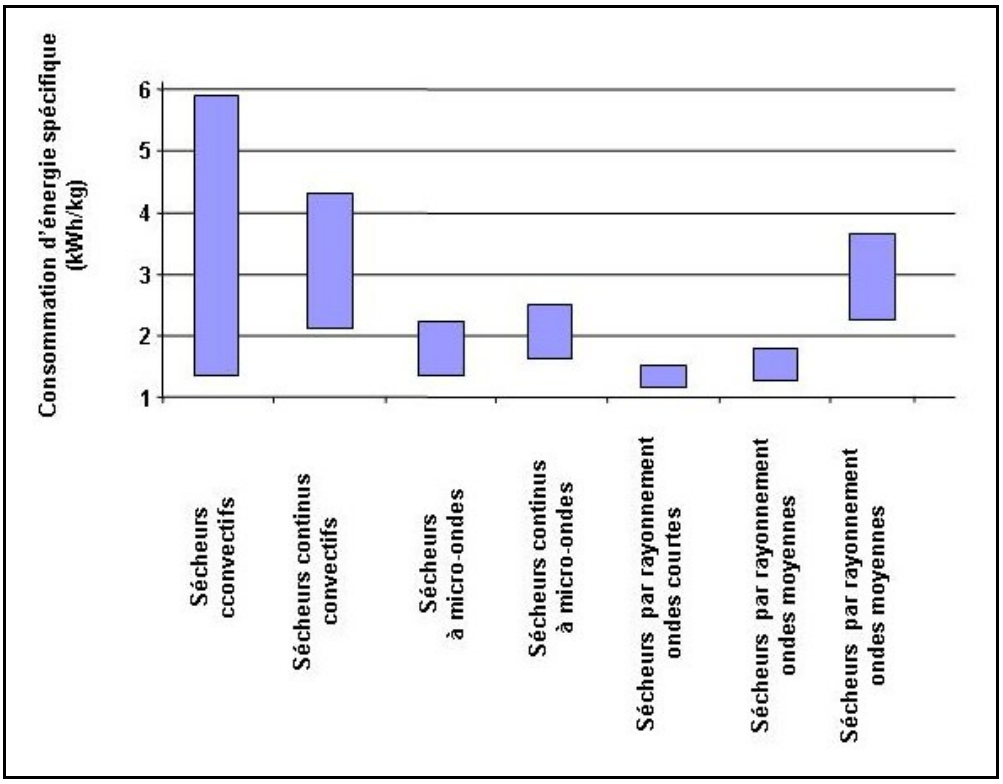


Figure 3.45 : Plages de consommation d'énergie secondaire spécifique de différents types de sécheurs lors de la vaporisation de l'eau
[26, Neisecke, 2003]

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune donnée communiquée.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Comme indiqué dans la Section 3.11.3.1, l'utilisation de procédés de séparation mécanique à titre de prétraitement possible avant le séchage contribue, dans de nombreux cas, à réduire considérablement la consommation d'énergie.

L'optimisation de la teneur en humidité de l'air dans les sécheurs revêt une importance capitale pour réduire la consommation d'énergie à son minimum dans les procédés de séchage.

Applicabilité
Aucune donnée communiquée.

Aspects économiques
Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples

Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[26, Neisecke, 2003, 203, ADEME, 2000]

3.11.3.2 Chauffage direct

Description
Le chauffage direct est principalement un chauffage par convection. Un gaz tiède ou chaud, habituellement de l'air (qui peut être mélangé aux gaz de combustion) ou de la vapeur (voir Section 3.11.3.4) est acheminé à travers, par-dessus ou autour des produits à sécher, qui peuvent être par exemple dans un tambour rotatif, sur des claies ou dans des bacs.

Les systèmes de séchage direct types sont les suivants :

- avec gaz en circulation :
  - par exemple tambour rotatif, four ou étuve de séchage, sécheur tunnel, sécheur à bande en spirale, sécheurs à plateaux
- avec solides aérés :
  - par exemple circulateur, sécheur discontinu, sécheur statique à claie
- avec agitation à grande échelle des solides :
  - par ex. lit fluidisé, séchage éclair centrifuge.

Avantages obtenus pour l'environnement
Le chauffage direct, en particulier avec de l'air chauffé par une combustion directe, évite bon nombre des pertes de chaleur qui surviennent dans les systèmes indirects, les chaudières et les canalisations vapeur, etc.

Effets croisés
Aucun identifié.

Données opérationnelles
Les produits à sécher et les liquides extraits doivent être compatibles et sans danger pour pouvoir être utilisés avec le système, par exemple ils ne doivent pas être inflammables en cas de chauffage direct par combustion de gaz naturel.

Applicabilité
Utilisation très répandue.

Aspects économiques
Aucun communiqué.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- réduction des coûts,
- gain de place,
- simplicité (par exemple le séchage à l'air réduit le besoin de vapeur).

Exemples

Utilisation très répandue dans de nombreuses industries, notamment avec les cylindres rotatifs qui sèchent des produits chimiques organiques, des engrais, des produits alimentaires et du sable. Il est également employé dans le traitement de surface des métaux et le séchage des composants en bacs. Le sécheur correspond à la dernière étape de la chaîne de bacs ; il s'agit d'un réservoir dont la taille est compatible avec celle des réservoirs précédents contenant des solutions de traitement et des solutions de rinçage. Les bacs sont abaissés et introduits dans le sécheur, de la même manière que dans les réservoirs de traitement. Le sécheur peut être équipé d'un couvercle à ouverture automatique.

Références bibliographiques
[263, Tempany, 2008, 266, Ullmann's, 2000]

3.11.3.3 Chauffage indirect

Description
Le chauffage indirect est réalisé par conduction. La chaleur est transférée au produit à sécher par une surface chauffée. Le produit peut être statique ou transféré en continu d'une surface chaude à l'autre.

Les systèmes de séchage indirect types sont les suivants :

- les produits plats et en bande, tels que les textiles, le papier ou le carton utilisent des sécheurs à tambour. Le produit humide est enroulé sur la paroi externe de cylindres horizontaux rotatifs chauffés intérieurement, habituellement avec de la vapeur ;
- les produits à faible viscosité comme les solutions de matières organiques ou inorganiques, utilisent un sécheur à rouleaux. Les produits sont acheminés en couches minces sur des rouleaux chauffés, et les solides séchés sont retirés sous forme de film, de flocons ou de poudre avec un racloir ;
- les produits pâteux sont séchés par :
  - un sécheur à rouleaux rainurés (qui les morcelle pour un séchage supplémentaire),
  - un sécheur à vis creuse qui utilise ou une ou deux vis d'Archimède creuses tournant dans une cuve. Les vis sont chauffées avec de l'eau chaude, de la vapeur saturée ou de l'huile chaude ; etc.
  - un sécheur toutes phases qui est un sécheur à contact doté d'un mélangeur et d'un malaxeur. Le boîtier, le couvercle, le rouleau principal creux et les éléments en forme de disque sont chauffés avec de la vapeur, de l'eau chaude ou de l'huile chaude.
- Les produits granulaires sont séchés par :
  - des sécheurs rotatifs, avec soit des canalisations chauffées à l'intérieur du tambour, soit un tambour chauffé comportant des tubes contenant le produit à sécher. La faible vitesse de l'air est adaptée aux produits pulvérulents ;
  - des sécheurs à bande (à alimentation par vis sans fin) dont les pales tournent dans un récipient chauffé ;
  - des sécheurs à vis sans fin conique avec un mélangeur en forme de cône tournant à l'intérieur d'une paroi chauffée en forme d'entonnoir ;
  - les sécheurs à plateaux, avec des plateaux chauffés ;
  - des sécheurs à tube en spirale, dans lesquels le produit n'est que brièvement en contact avec la surface chauffée du tube et est transporté pneumatiquement. Ils peuvent être fermés hermétiquement et utilisés pour l'élimination des solvants organiques, avec récupération des solvants.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucun communiqué.

Effets croisés
Le chauffage indirect utilise vraisemblablement davantage d'énergie que le chauffage direct en raison des pertes dues au transfert de chaleur, car il s'agit d'un procédé en deux étapes : chauffage de la surface puis chauffage du produit.

Données opérationnelles
Voir la rubrique Description.

Applicabilité
Ces sécheurs peuvent avoir des applications spécifiques, notamment pour l'élimination des solvants organiques.

Aspects économiques
Aucun communiqué.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Applications auxquelles il est impossible d'appliquer un chauffage direct ou pour lesquelles il existe d'autres contraintes.

Exemples
Utilisation très répandue.

Références bibliographiques
[264, Tempany, 2008, 266, Ullmann's, 2000]

3.11.3.4 Vapeur surchauffée

Description
La vapeur surchauffée est la vapeur chauffée à une température supérieure au point d'ébullition de l'eau à une pression donnée. Elle ne peut exister en contact avec l'eau ni contenir de l'eau ; elle est semblable à gaz parfait. Elle est également dénommée vapeur surchargée, vapeur anhydre et vapeur gazeuse. La vapeur surchauffée peut être utilisée comme fluide de chauffage à la place de l'air chaud dans tous les sécheurs directs (où le fluide de chauffage est en contact direct avec le produit) ; par exemple, dans le séchage par pulvérisation, dans un lit fluidisé, dans un lit jaillissant, dans des tambours, etc.

Avantages obtenus pour l'environnement
L'avantage réside dans le fait que le phénomène limitatif est uniquement le transfert de chaleur et non le transfert de la masse (eau). La cinétique du séchage s'en trouve améliorée. Les sécheurs ont une taille plus petite et il en va de même des pertes de chaleurs. En outre, l'énergie (chaleur latente) de l'eau extraite du produit est facilement recyclable dans le sécheur grâce à la recompression mécanique de vapeur ou utilisable dans un autre procédé, ce qui génère des économies d'énergie supplémentaires.

Le traitement des composés organiques volatils (COV) est facilité en raison du volume limité des gaz d'échappement. Ces composés peuvent être facilement récupérés.

Effets croisés
Risque de détérioration des produits thermosensibles en raison de la température élevée.

Données opérationnelles
La consommation d'énergie est d'environ 670 kWh/t d'eau évaporée sans récupération de chaleur et de 170 à 340 kWh/t avec récupération de chaleur (recompression mécanique de vapeur, par exemple).

Le contrôle du procédé est facilité car la teneur finale en humidité du produit et la cinétique du séchage peuvent être régulées par la température de la vapeur. L'élimination de l'air réduit le risque d'incendie et d'explosion.

Applicabilité
Il est possible de moderniser tous les sécheurs directs avec la vapeur surchauffée. Des tests doivent être conduits afin de garantir la qualité des produits et des calculs économiques doivent être réalisés.

Aspects économiques
L'investissement est généralement plus élevé, notamment en cas d'utilisation de la recompression mécanique de vapeur.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Les économies d'énergie sont le principal agent moteur de la mise en œuvre. L'amélioration de la qualité des produits est souvent citée en particulier dans l'industrie agroalimentaire (amélioration de la couleur, absence d'oxydation, etc.).

Exemples
- Sucrerie Lesaffre (Nangis, France) : séchage de la pulpe de betterave à l'aide de vapeur surchauffée
- applications : boues, pulpes de betterave, luzerne, détergents, céramiques techniques, combustibles à base de bois, etc.

Références bibliographiques
[208, Ali, 1996]

3.11.3.5 Récupération de la chaleur dans les procédés de séchage

Description
Le séchage est souvent un procédé à température élevée qui permet de procéder à une récupération de la chaleur perdue :

- soit directement, lorsque le procédé de séchage est un procédé à séchage direct utilisant de l'air chaud comme fluide de chauffage :
  - mélange d'air chaud et d'air frais directement en amont du brûleur ;
  - si l'air d'échappement est trop contaminé (poussières, humidité, etc.), recyclage de la chaleur émanant de l'air d'échappement par le biais d'un échangeur de chaleur (voir Section 3.3.1) afin de préchauffer le produit à sécher où l'air de séchage

- soit indirectement, au moyen de la recompression mécanique de vapeur (MVR) afin de comprimer la vapeur d'échappement (voir Section 3.3.2), notamment lorsque le fluide de chauffage est de la vapeur surchauffée (voir Section 3.11.3.4)

Seul le recyclage « direct » est étudié ici.

Avantages obtenus pour l'environnement
Minimisation de l'emploi d'énergie.

Effets croisés
Le préchauffage de l'air en amont du brûleur grâce à la récupération de chaleur est susceptible de perturber le procédé de séchage en ayant une influence sur la température – teneur en humidité. La présence de contaminants est possible en l'absence d'échangeur de chaleur. Une régulation peut être nécessaire afin d'assurer un contrôle correct de la température de séchage.

Données opérationnelles
Les économies d'énergie sont toujours plus importantes lorsque l'air ambiant est froid (en hiver, par exemple).
Les économies d'énergie prévues s'élèvent au moins à 5 %.

Applicabilité
Il est possible d'utiliser cette technique pour pratiquement tous les sécheurs à convection d'air chaud en continu (tunnel, four, tambour, etc.). Il est nécessaire de veiller au réglage du brûleur et au bon dimensionnement des différents éléments : ventilateur, diamètres des canalisations, vannes de régulation et échangeur de chaleur le cas échéant. Les échangeurs de chaleur doivent être en acier inoxydable. Lorsque le brûleur du sécheur fonctionne au mazout, l'air d'échappement contient du souffre et du SO_2 et risque d'endommager l'échangeur de chaleur en cas de condensation.

Aspects économiques
La période de retour sur investissement est très variable, en fonction du coût de l'énergie, de la capacité d'évaporation du sécheur et du nombre d'heures de fonctionnement. Toujours procéder à une simulation avec des hypothèses d'augmentation des prix de l'énergie.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économie d'argent par le biais des économies réalisées.

Usines à titre d'exemple
Séchage de pulpe de betterave (Cambrai, France) : récupération de la chaleur des gaz d'échappement.

Références bibliographiques
[203, ADEME, 2000]

3.11.3.6 Recompression mécanique de la vapeur ou pompes à chaleur avec évaporation

La concentration par évaporation associée à la recompression mécanique de vapeur (MVR) ou à une pompe à chaleur est une technique très efficace pour le traitement des eaux résiduaires.

En particulier, cette technique permet de réduire, de manière significative et à faible coût, les volumes d'eau résiduaires envoyés en traitement ainsi que le recyclage de l'eau.

Description
Pour l'évaporation d'une tonne d'eau, la consommation d'énergie est de 700 à 800 kWh/t. Il est possible de réduire les besoins en énergie grâce à des solutions de récupération de chaleur, comme des pompes à chaleur, incluant la recompression mécanique de vapeur (MVR) (voir Section 3.3.2) ou à des évaporateurs à effet multiple avec thermocompression.

Effets croisés
La concentration des flux d'eaux résiduaires est susceptible de nécessiter différentes techniques de gestion et de traitement (c'est-à-dire risque de ne plus pouvoir être rejetées en l'état).

Données opérationnelles
Le Tableau 3.29 présente plusieurs types d'évaporateur et leurs consommations spécifiques.

Type d'évaporateur	**Consommations spécifiques** [1, 2, 3]	
	kg de vapeur/twe (kWh)	kWh d'électricité / twe
1 étage	1200 (960)	10
2 étages	650 (520)	5
1 étage avec thermocompression	450 – 550 (400)	5
3 étages	350 – 450 (320)	5
6 étages avec thermocompression	115 – 140 (100)	5
1 étage avec MVR	0 – 20 (8)	15 à 30
2 étages avec MVR	0 – 20 (8)	10 à 20
Pompe à chaleur		
Remarques : 1. twe : tonne d'eau évaporée 2. Valeur moyenne pour les différentes concentrations du produit 3. La dernière colonne correspond aux consommations auxiliaires (pompes, tours de refroidissement, etc.)		

Tableau 3.29: Types d'évaporateurs et consommations spécifiques

Applicabilité
Le choix de la technologie dépend de la nature du produit et de sa concentration. Des tests de faisabilité peuvent être nécessaires.

Aspects économiques
Les aspects économiques sont déterminés au cas par cas.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
- Économies de coût.
- Augmentation de la productivité et/ou de la qualité des produits.

Exemples
La société ZF Lemforder Mecacentre fabrique différentes pièces pour l'industrie automobile (rotules de suspension ou de direction, colonne de direction) etc. En 1998, lors du processus d'obtention de la certification ISO 14001, la société a installé un évaporateur MVR afin de concentrer les eaux de rinçage provenant du nettoyage des pièces. L'équipement installé

concentre jusqu'à 120 litres d'eau résiduaire par heure avec une puissance de 7,2 kWh et permet de recycler entre 20 et 25 m^3 d'eau purifiée par mois dans le système de production. Les déchets liquides concentrés résiduaires sont envoyés à une installation de traitement des déchets appropriés.

Coût d'investissement : 91 469 EUR
Économie annuelle obtenue : 76 224 EUR
Période de retour sur investissement : 14 mois

Références bibliographiques
[26, Neisecke, 2003, 197, Wikipedia, , 201, Dresch, 2006] [243, R&D, 2002]

3.11.3.7 Optimisation de l'isolation du système de séchage

Description
Comme pour tous les équipements chauffés, les pertes de chaleur peuvent être réduites en isolant le système de séchage, notamment les fours ainsi que les canalisations de vapeur et de condensat (voir aussi Section 3.2.11). Le type d'isolation utilisé et l'épaisseur requise sont fonction de la température de service du système, des produits à sécher et de l'extraction éventuelle de liquides autres que l'eau, ou de l'éventuel contamination de la vapeur d'eau (par exemple avec de la vapeur acide).

Il convient de vérifier la bonne tenue de l'isolation, cette dernière étant susceptible de se détériorer au fil du temps par effritement, détérioration mécanique, action de l'humidité (par exemple provenant de la vapeur d'eau de condensation, de fuites de vapeur) ou par contact avec des produits chimiques. Une isolation endommagée peut être identifiée par une inspection visuelle ou par un balayage infrarouge, Section 2.10.1.

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie.

Effets croisés
Aucun identifié.

Données opérationnelles
Si le personnel risque d'être en contact avec les surfaces chaudes, la température maximale recommandée pour lesdites surfaces est de 50 °C.

L'isolation peut cacher des fuites et/ou de la corrosion, de ce fait des vérifications périodiques doivent être entreprises afin de détecter ces dernières.

Applicabilité
Lors de l'isolation d'un gros système de séchage ou lors de la modernisation d'une installation

Aspects économiques
Ils peuvent être calculés en fonction du projet.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Économies de coût ainsi que santé et sécurité

Exemples
Utilisation courante.

Références bibliographiques
[265, Tempany, 2008, 268, Whittaker, 2003]
www.pip.org

3.11.4 Énergies radiantes

Description
Avec les énergies radiantes, telles que les infrarouges (IR), les hautes fréquences (HF) et les micro-ondes (MW), l'énergie est transférée par rayonnement thermique. Il convient de remarquer qu'il existe une différence entre le séchage et le durcissement : le séchage nécessite d'élever les molécules des solvants jusqu'à une température égale ou supérieure à la chaleur latente d'évaporation, tandis que les techniques de durcissement fournissent l'énergie nécessaires à la réticulation (polymérisation) ou à d'autres réactions. Le séchage et le durcissement des revêtements sont étudiés dans le BREF STS (Traitement de surface utilisant des solvants).

Ces technologies sont appliquées dans les procédés de production industrielle pour chauffer des produits et peuvent par conséquent être appliquées aux procédés de séchage. Les énergies radiantes peuvent être utilisée seules ou en association avec la conduction ou la convection.

Avantages obtenus pour l'environnement
Les énergies radiantes grâce à leurs caractéristiques spécifiques, permettent de réaliser des économies d'énergie dans les procédés.

- Transfert direct de l'énergie. Les énergies radiantes transfèrent directement l'énergie de la source au produit, sans utiliser de fluide intermédiaire. Le transfert de chaleur est donc optimum, et évite notamment les pertes d'énergie liés aux systèmes de ventilation. Il s'en suit des économies d'énergie importantes. Par exemple, pour les procédés de séchage des peintures, environ 80 % de l'énergie est extraite avec les gaz de combustion.
- Densité de puissance élevée. Les densités de puissance surfaciques (IR) ou volumiques (HF, MW) sont plus élevées pour les énergies radiantes comparativement aux technologies classiques comme la convection d'air chaud. Il s'ensuit une augmentation de la vitesse de production et cela permet de traiter des produits à énergie spécifique comme certaines peintures.
- Focalisation de l'énergie. L'énergie peut être facilement concentrée sur la partie requise du produit.
- Souplesse de contrôle. L'inertie thermique est faible avec les énergies radiantes et les variations de puissance sont grandes. Il est possible d'utiliser un contrôle souple qui conduit à des économies d'énergie et à une bonne qualité des produits fabriqués.

Effets croisés
Aucun effet croisé rapporté.

Données opérationnelles

Le débit d'air d'échappement est généralement bien inférieur parce que l'air n'est pas le fluide intermédiaire du transfert de chaleur mais sert uniquement à extraire la vapeur ou d'autres solvants. Le traitement des gaz d'échappement, le cas échéant, est donc plus facile et moins onéreux.

Autres avantages obtenus spécifiquement avec les infrarouges (IR) :

- chauffage direct, réduction d'échappement d'air chaud, conduisant à des économies d'énergie ; peu voire aucun transport de fluides chauds ;
- réduction de la taille des équipements ;
- facilité de régulation ;
- modernisation des installations.

Autres avantages obtenus spécifiques aux hautes fréquences et aux micro-ondes :

- chauffage direct : réduction d'échappement d'air chaud, conduisant à des économies d'énergie ; peu ou aucun transport de fluides chauds ;
- le chauffage du volume conduit à un séchage rapide et à une diminution des pertes ;
- chauffage sélectif, l'eau est chauffée en priorité ;
- chauffage homogène si la taille des produits est compatible avec la longueur d'onde ;
- transfert de chaleur efficace.

Il se produit parfois un chauffage non uniforme des produits hétérogènes qui conduit à des produits de qualité médiocre.

Quelques inconvénients pour les infrarouges :

- investissements plus importants (+20 à 30 %),
- convient essentiellement aux produits plats ou de forme simple,
- ils figurent rarement en tête de liste dans les choix des constructeurs.

Quelques inconvénients pour les hautes fréquences et les micro-ondes :

- investissements plus importants (+20 à 30 %),
- ils figurent rarement dans les choix prioritaires des constructeurs.

Applicabilité

Les énergies radiantes, en particulier les infrarouges peuvent être utilisées pour la modernisation des installations ou pour « doper » la ligne de production, en association avec la convection ou la conduction.

Malgré leurs avantages (vitesse d'action, qualité des produits finaux, économies d'énergie), les énergies radiantes ne sont pas d'usage courant dans les applications industrielles réputées aujourd'hui offrir un fort potentiel d'économies d'énergie.

Les infrarouges peuvent être utilisés pour :

- le durcissement des peintures, des encres et des vernis
- le séchage des papiers, du carton, le préséchage des textiles

- le séchage des poudres dans les industries chimiques et des plastiques.

Les hautes fréquences peuvent être utilisées pour le séchage de :

- produits massifs (monolithiques) : textiles (bobines de fil), céramiques,
- poudre dans l'industrie chimique.

Les micro-ondes peuvent être utilisées pour le séchage de :

- produits massifs (monolithiques) (bois, agro-alimentaires) ou des produits plats,
- produits chimiques et pharmaceutiques (sous vide).

Aspects économiques
L'investissement est généralement plus onéreux (+20 à 30 %) que pour les techniques classiques.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Compacité de l'appareillage : le manque d'espace disponible peut être un agent moteur. Les énergies radiantes, en particulier les infrarouges, peuvent être utilisées pour doper les lignes de production existantes.

Exemples
Biotechs est une usine française produisant des oreillers en latex. Il est très difficile de sécher les oreillers dont la teneur en humidité résiduelle doit être < 1 % pour éviter des problèmes lors de leur emploi ultérieur. Le sécheur-tunnel à convection (courants contrariés) ne suffisait pas à assurer une bonne qualité de production et consommait trop d'énergie. La mise en œuvre d'un système haute fréquence à la sortie du tunnel a permis de respecter les critères de qualité et a entraîné une réduction de la consommation d'énergie spécifique par oreiller de 41 % (énergie primaire) avec une réduction multipliée par huit du temps de production. Le tunnel à convection permet d'obtenir des oreillers dont la teneur en humidité est de 19 à 45 % ; avec les hautes fréquences la teneur en humidité est de 1 %. Le temps de retour sur investissement communiqué est de 4 ans.

Références bibliographiques
[204, CETIAT, 2002, 205, ADEME, , 206, ADEME, 2002]

3.11.5 Régulation assistée par ordinateur/automatisation des procédés de séchage thermique

Description
Dans la vaste majorité des applications faisant appel à des procédés de séchage thermique, les sécheurs sont normalement régulés en utilisant des spécifications de valeurs cibles et/ou des valeurs empiriques prédominantes (expérience de l'opérateur). Le temps de rétention, le débit, la teneur en humidité initiale, la température et la qualité des produits sont autant de paramètres de contrôle. Des capteurs d'humidité ayant des caractéristiques linéaires et à faibles interférences, qui au demeurant ont de longues durées de vie, sont nécessaires pour déterminer la teneur en humidité. Un ordinateur calcule ces mesures en temps réel et les compare à des valeurs cibles calculées à partir du modèle mathématique du procédé de séchage. À cette fin, il faut une connaissance exacte du procédé de séchage et du logiciel

approprié. Le régulateur modifie la variable de contrôle correspondante en comparant les valeurs cibles et les valeurs réelles.

Des exemples provenant de différentes usines montrent qu'il est possible de réaliser des économies de 5 à 10 % par rapport à l'utilisation de contrôleurs empiriques classiques.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune donnée communiquée.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Aucune donnée communiquée.

Applicabilité
Aucune donnée communiquée.

Aspects économiques
Aucune donnée communiquée.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Aucune donnée communiquée.

Exemples
Aucune donnée communiquée.

Références bibliographiques
[207, ADEME, 2000]

4 MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES

4.1 Introduction

Pour bien comprendre ce chapitre et son contenu, le lecteur est invité à se reporter à la préface du document et plus particulièrement au texte cité ci-après :

Extrait de la Section 3 de la Préface, « Obligations légales correspondantes de la directive IPPC et définition des MTD » :

La directive a pour objectif la prévention et la réduction intégrées de la pollution résultant des activités mentionnées à l'Annexe I, en vue d'aboutir à un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble incluant l'efficacité énergétique. La base légale de la directive a trait à la protection de l'environnement. Sa mise en œuvre devrait également tenir compte d'autres objectifs communautaires, tels que la compétitivité de l'industrie de la Communauté en contribuant ainsi au développement durable. Le Champ d'application apporte des informations supplémentaires sur le fondement légal de l'efficacité énergétique dans la directive.

La directive IPPC prévoit plus spécifiquement un système d'autorisation pour certaines catégories d'installations, exigeant tant des exploitants que des autorités réglementaires, qu'ils adoptent une vision globale intégrée du potentiel de consommation et de pollution de l'installation. L'objectif global d'une telle approche intégrée doit être l'amélioration de la conception et de la construction, ainsi que la gestion et du contrôle des procédés industriels, afin d'assurer un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble. Au cœur de cette approche, figure le principe général mentionné à l'article 3, selon lequel les exploitants devraient adopter toutes les mesures préventives appropriées contre la pollution, en particulier par l'application des « **meilleures techniques disponibles** » leur permettant d'améliorer leur performance environnementale, dont l'efficacité énergétique.

L'expression « meilleures techniques disponibles » est définie à l'article 2(11) de la directive.

En outre, l'Annexe IV de la directive contient une liste de « considérations à prendre en compte en général ou dans des cas particuliers lors de la détermination des meilleures techniques disponibles, compte tenu des coûts et des avantages pouvant résulter d'une action et des principes de précaution et de prévention ». Ces considérations incluent les informations publiées par la Commission en vertu de l'article 16(2).

Les autorités compétentes chargées de la délivrance des autorisations ont l'obligation de tenir compte des principes généraux stipulés à l'article 3 lors de la détermination des conditions d'obtention de l'autorisation. Ces conditions doivent inclure des valeurs limites d'émission, complétées ou remplacées, le cas échéant, par des paramètres équivalents ou des mesures techniques. Conformément à l'article 9(4) de la directive :

(sans préjudice de la conformité avec les normes de qualité de l'environnement) ces valeurs limites d'émission, les paramètres et les mesures techniques équivalents, doivent êtres fondés sur les meilleures techniques disponibles, sans prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie spécifique, et en prenant en considération les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions environnementales locales. Dans tous les

cas, les conditions d'autorisation doivent prévoir des dispositions relatives à la minimisation de la pollution à longue distance ou transfrontalière, et garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

Conformément à l'article 11 de la directive, les États membres ont l'obligation de veiller à ce que les autorités compétentes se tiennent informées ou soient informées de l'évolution des meilleures techniques disponibles.

Extrait de la Section 6 de la Préface, « Comment comprendre et utiliser ce document » :

Les informations contenues dans le présent document sont destinées à être utilisées au titre d'une contribution à la détermination des MTD applicables à l'efficacité énergétique dans des cas spécifiques. Lors de la détermination des MTD et des autorisations d'exploitation basées sur celles-ci, il convient, à tout moment, de tenir compte de l'objectif global d'obtention d'un haut niveau de protection de l'environnement dans son ensemble incluant l'efficacité énergétique.

Le présent chapitre (Chapitre 4) présente les techniques qui, au sens général, sont considérées comme étant compatibles avec les MTD. Il a donc pour objectif de fournir des indications générales sur les techniques d'efficacité énergétique, qui peuvent être considérées comme un point de référence apte à contribuer à la détermination des conditions d'autorisation basées sur les MTD ou à l'établissement de règles générales obligatoires selon l'article 9(8). Toutefois, il convient de souligner, que le présent document ne propose pas de valeurs d'efficacité énergétique pour les autorisations. La détermination des autorisations appropriées impliquera la prise en compte des facteurs locaux spécifiques au site, telles que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, sa situation géographique et les conditions environnementales locales. Dans le cas d'installations existantes, les faisabilités économique et technique de leur mise à niveau doivent également être prises en compte. En outre, le seul objectif de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera souvent de prendre des décisions de compromis entre les différents types d'impacts environnementaux, ces dernières étant souvent influencées par des considérations locales.

Les meilleures techniques disponibles présentées dans le présent chapitre ne sont pas nécessairement appropriées pour toutes les installations. En revanche, l'obligation d'assurer un niveau élevé de protection de l'environnement et notamment de réduire au minimum la pollution à longue distance ou transfrontière implique que les conditions d'autorisation ne peuvent être définies sur la base de considérations purement locales. Il est donc essentiel que les autorités qui délivrent les autorisations tiennent pleinement compte des informations contenues dans le présent document.

En conséquence de l'approche intégrée et de la nécessité de pondérer les effets croisés (comme résumé ci-dessus), l'efficacité énergétique doit en définitive être considérée pour l'installation dans son ensemble, c'est-à-dire :

- il n'est pas toujours possible d'optimiser en même temps l'efficacité énergétique de toutes les activités et/ou de tous les systèmes d'une installation
- il peut être impossible d'optimiser l'efficacité énergétique totale tout en réduisant au minimum les autres consommations et émissions (par exemple il peut être impossible de réduire les émissions dans l'air sans utiliser de l'énergie)

- l'efficacité énergétique est susceptible de ne pas être optimale pour un ou plusieurs systèmes afin d'atteindre une efficacité globale maximale au niveau d'une installation donnée. Voir les Sections 1.35 et 1.5.1.1
- il est nécessaire de maintenir l'équilibre entre l'optimisation de l'efficacité énergétique et d'autres facteurs comme la qualité du produit, la stabilité du procédé
- l'utilisation de sources d'énergie durables et/ou de chaleur «perdue» ou excédentaire peut s'avérer plus durable que l'utilisation de combustibles primaires, même si l'efficacité énergétique lors de l'utilisation est moindre.

Des techniques permettant une bonne efficacité énergétique sont donc proposées pour «optimiser l'efficacité énergétique»

Les techniques exposées dans ce chapitre ont été évaluées à travers un processus itératif comportant les étapes suivantes :

- recensement des éléments clés de l'efficacité énergétique dans le cadre de la directive IPPC (voir Préface et Champ d'application[1])
- étude des techniques les plus pertinentes pour appréhender ces questions clés.
- identification des meilleures efficacités énergétiques pouvant être atteintes, en se fondant sur les données disponibles dans l'Union européenne et de par le monde
- étude des conditions dans lesquelles ces niveaux de performance ont été atteints, tels que les coûts, les effets croisés, les principaux agents moteurs impliqués dans la mise en œuvre de ces techniques
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD), au sens général, conformément à l'article 2 (11) et à l'annexe IV de la directive.

L'avis des experts du Bureau européen de prévention et de réduction intégrées de la pollution et du groupe de travail technique (TWG) concerné a joué un rôle clé, dans chacune de ces étapes et dans la manière dont l'information est présentée ci-après.

Lorsqu'elles étaient disponibles, les données relatives aux coûts ont été indiquées dans les chapitres précédents, en même temps que la description des techniques. Elles permettent d'avoir une idée approximative de l'ampleur des coûts sous-jacents. Toutefois, le coût réel de l'application d'une technique dépend grandement de la situation spécifique eu égard, par exemple, aux taxes, impôts et caractéristiques techniques de l'installation considérée. Il n'est pas possible dans ce document d'évaluer ces facteurs qui sont spécifiques à chaque site. En l'absence de données relatives aux coûts, les conclusions sur la viabilité économique des techniques sont tirées des observations effectuées sur les installations existantes.

Les MTD générales de ce chapitre sont destinées à servir de référence pour l'évaluation des performances actuelles d'une installation existante ou pour l'évaluation des propositions de nouvelles installations. En ce sens, elles aideront à définir des conditions appropriées « basées sur les MTD » pour l'installation ou à établir des règles contraignantes générales en application de l'Article 9(8) de la directive IPPC. Il est prévu que les nouvelles installations peuvent être conçues pour fonctionner à des niveaux de performance équivalents voire meilleurs que les niveaux généraux des MTD présentées dans ce document. On considère également que des installations existantes

[1] L'efficacité énergétique dans la Directive IPPC et la portée du présent document, ainsi que l'interrelation avec d'autres engagements en matière politiques et juridiques sont abordés dans la Préface et le Champ d'application. La conclusion a été que le présent document ne traiterait pas les sujets tels que l'utilisation des sources d'énergie renouvelables.

pourraient évoluer pour atteindre les niveaux généraux des MTD voire être meilleures selon l'applicabilité technique et économique des techniques dans chacun des cas considérés.

Bien que les documents de référence pour les MTD ne fixent pas de normes juridiquement contraignantes, ils ont vocation à fournir des informations pour éclairer l'industrie, les États membres ou le public quant aux niveaux d'émission et de consommation pouvant être atteints moyennant l'utilisation de certaines techniques spécifiques (y compris les rendements énergétiques énoncés dans les BREF sectoriels verticaux), ou les mesures techniques et paramètres équivalents (Article 9(4)). Les valeurs limites adéquates pour chaque cas particulier devront être déterminées compte tenu des objectifs de la directive IPPC et des considérations locales.

Identification des MTD horizontales

L'approche horizontale de l'efficacité énergétique dans tous les secteurs IPPC se fonde sur le postulat que toutes les installations utilisent de l'énergie et que les systèmes et équipements sont communs à de nombreux secteurs IPPC. Il est donc possible d'identifier des options génériques d'efficacité énergétique indépendamment des activités spécifiques. Il en résulte que les MTD définies englobent les mesures les plus efficaces pour atteindre un niveau élevé d'efficacité énergétique en général. Parce qu'il s'agit ici d'un BREF horizontal, les MTD doivent être définies de façon plus générale que dans un BREF vertical, dans lequel on tient compte, par exemple, de l'interaction entre les procédés, les unités et les systèmes au sein d'un site.

Des MTD spécifiques des procédés en matière d'efficacité énergétique et des niveaux de consommation d'énergie associés sont présentés dans les BREF verticaux sectoriels appropriés. La première série de tous les BREF étant achevée, elles ont été largement synthétisées dans [283, EIPPCB].

Les MTD pour des installations spécifiques sont, donc, la combinaison d'éléments de MTD spécifiques cités dans les BREFS sectoriels, de MTD spécifiques pour les activités associées pouvant figurer dans d'autres BREF verticaux, et les MTD génériques énoncées dans le présent chapitre : les MTD générales applicables à toutes les installations se trouvent dans la Section 4.2 et les MTD propres à certains systèmes, procédés, activités ou équipements sont énoncées à la Section 4.3 (la Figure 4.1 en présente les relations).

Ni le présent chapitre, ni les chapitres 2 et 3 ne fournissent de listes exhaustives des techniques pouvant être considérées. C'est pourquoi d'autres techniques peuvent donc exister ou être développées et être également valables dans le cadre de l'IPPC et des MTD.

Mise en œuvre des MTD

La mise en œuvre des MTD dans des installations et procédés nouveaux ou considérablement améliorés ne pose habituellement pas de problèmes. Dans la plupart des cas, l'optimisation de l'efficacité énergétique présente un intérêt économique. La mise en œuvre des MTD dans une installation existante n'est en général pas si facile en raison de l'infrastructure existante et des circonstances locales : il y a lieu de tenir compte de la viabilité économique et technique de l'amélioration de ces installations (voir la Préface et les détails listés ci-dessous). Le REF ECM (Document de référence

sur les aspects économiques et les effets croisés) [167, EIPPCB, 2006] fait référence aux facteurs suivants :

- pour une nouvelle installation ou pour une modernisation majeure, niveau d'engagement eu égard aux choix des techniques (c'est-à-dire le point à partir duquel les changements apportés à la conception ne peuvent plus être réalisés avec un bon ratio coût/efficacité) ;
- âge et conception des équipements ;
- place de l'installation dans son cycle d'investissement ;
- complexité des procédés et choix des techniques actuellement utilisées dans l'installation ;
- capacité de production, volumes et mélange des produits fabriqués ;
- type de traitements appliqués et niveaux de qualité requis ;
- espace disponible ;
- coût, « disponibilité » et robustesse des techniques à l'échelle du temps requis par l'exploitant ;
- temps requis pour apporter des changements aux activités (y compris tous changements structuraux) à l'intérieur de l'installation et méthode d'optimisation par rapport aux impératifs de la production :
- coût/avantage de toutes mesures environnementales en cours ;
- techniques nouvelles et émergentes ;
- coûts financiers et imputables aux effets croisés.

Cependant, le présent document n'établit pas, en principe, de distinction entre les installations nouvelles et les installations existantes. Une telle distinction n'encouragerait pas les exploitants des sites industriels à progresser vers l'adoption des MTD. En règle générale, des mesures d'efficacité énergétique s'accompagnent d'un retour sur investissement et, du fait de la grande importance attachée à l'efficacité énergétique, de nombreuses mesures politiques de mise en œuvre sont disponibles, notamment des incitations financières. Des informations relatives aux plans d'action et réglementations des États membres sont disponibles dans l'Annexe 7.13.

Certaines des techniques sont appliquées en continu et d'autres périodiquement, en totalité ou en partie. Par exemple, certaines tâches de maintenance sont réalisées quotidiennement, tandis que d'autres sont effectuées conformément à un calendrier approprié, par exemple, entretien des équipements lors des mises à l'arrêt.

Certaines techniques sont très souhaitables et sont souvent appliquées mais peuvent requérir la disponibilité et la coopération d'une tierce partie (par exemple la cogénération), ce qui n'est pas pris en compte dans la directive IPPC.

Aides à la compréhension du présent chapitre

Pendant la préparation de ce document, on a pu voir se dessiner un ordre selon lequel il est utile de considérer l'application des techniques et donc des MTD, ordre qui se reflète dans la structure adoptée pour les sections portant sur les MTD, ci-dessous, et dans la Figure 4.1.

La première des priorités est la sélection et l'exploitation des procédés au cœur des activités couvertes par les installations. Cet aspect est traité dans les BREF sectoriels verticaux, qui constituent le premier point de référence.
Dans certains cas, les techniques qui peuvent être appliquées dans une installation à des activités associées sont traitées dans un BREF sectoriel vertical distinct, par ex. dans les

BREF LCP (Grandes installations de combustion), WI (Incinération des déchets) ou WT (Traitement des déchets).

Toutefois, l'efficacité énergétique est une question interdisciplinaire, et il existe des aspects qui ne sont pas traités dans les BREF sectoriels verticaux, ou qui doivent être traités de manière uniforme et intersectorielle. Ils sont abordés dans le présent document.

La première étape est un programme d'action reposant sur un Système de management de l'efficacité énergétique (SM2E), auquel il est fait référence dans la Section 4.2.1. Il peut être traité comme suit (i) par un EMS auquel il est fait référence dans le BREF sectoriel vertical, (ii) un tel EMS peut être modifié ou (iii) l'EMS peut être complété par un SM2E distinct. Des MTD spécifiques s'appliquent en cas de modernisation d'installations existantes ou de création de nouvelles installations.

Les Sections 4.2.2 à 4.2.9 concernent la mise en œuvre de certaines parties du SM2E. Elles contiennent des MTD qui apportent davantage de détails sur des techniques.

La Section 4.3 contient des MTD pour certains systèmes, procédés, activités associées ou équipements courants qui ont un impact sur l'efficacité énergétique de l'installation et qui ne sont pas traités de manière détaillée dans les BREF verticaux. Il est possible de les identifier au cours de l'évaluation d'une installation.

Dans de nombreux cas, des informations supplémentaires sont résumées et proviennent des sujets traités dans les chapitres précédents, dans la rubrique « *Applicabilité* ». On y trouve des informations, par exemple sur les installations auxquelles la MTD s'applique, sur la fréquence et la complexité de la mise en application de la MTD, etc.

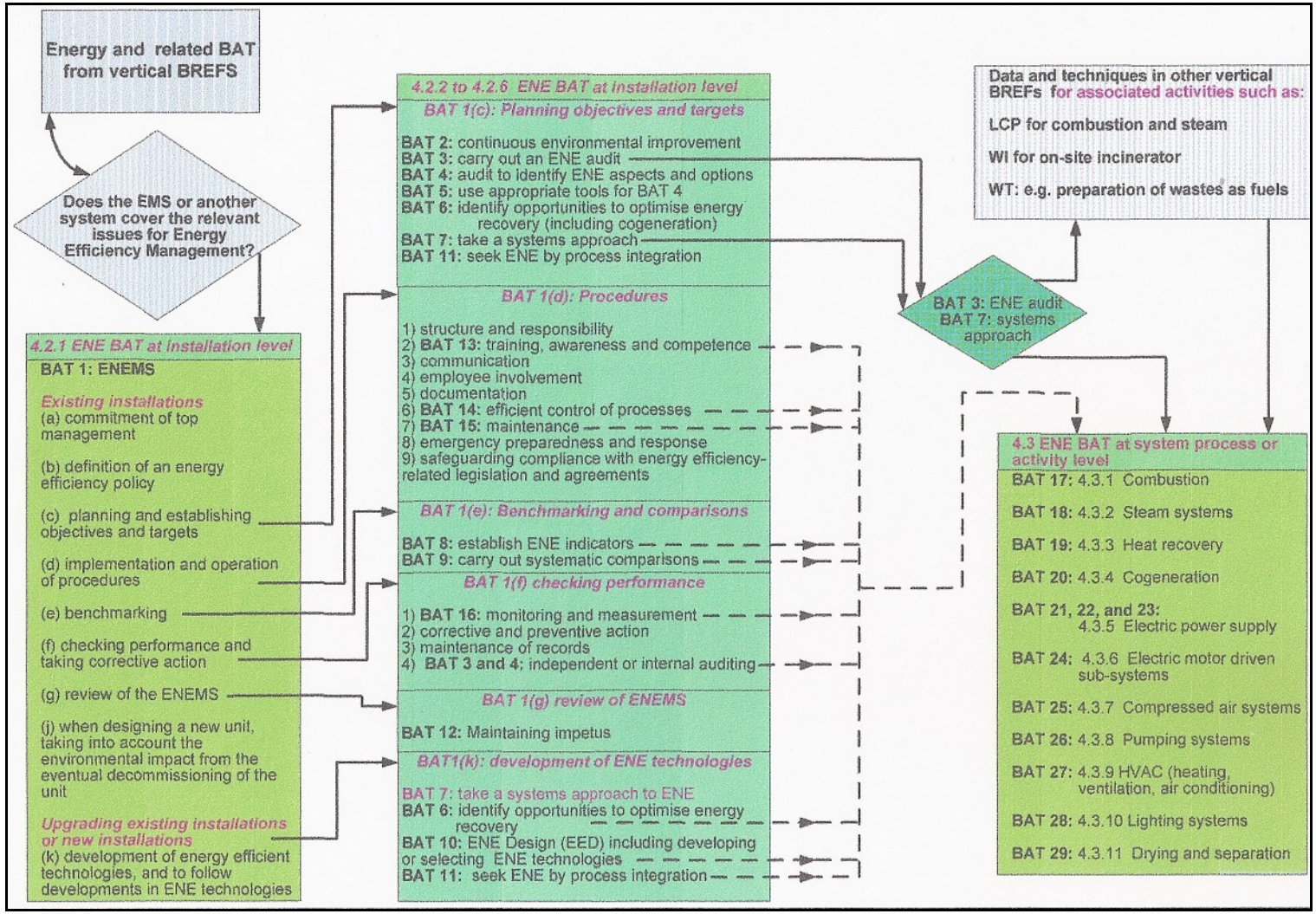


Figure 4.1 : Relations entre les MTD pour l'efficacité énergétique

4.2 Meilleures techniques disponibles pour parvenir à l'efficacité énergétique au niveau d'une installation

Un élément essentiel pour garantir l'efficacité énergétique au niveau d'une installation est une approche de management formalisé, décrite dans la MTD 1 et à l'appui des MTD des sections ci-après.

4.2.1 Management de l'efficacité énergétique

Un certain nombre de techniques de management de l'environnement sont définies en tant que MTD. Le champ d'application (par ex. le niveau de détail) et la nature du système de management de l'efficacité énergétique (SM2E) (par ex. normalisé ou non) sont généralement fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et systèmes qui la composent (voir Section 2.1) :

1. **Les MTD consistent à mettre en œuvre et à adhérer à un système de management de l'efficacité énergétique (SM2E) qui intègre, en s'adaptant aux circonstances particulières, la totalité des éléments ci-après (voir Section 2.1).** Les lettres (a), (b), etc. ci-dessous, correspondent à celles de la Section 2.1**) :**

   (a) engagement de la direction générale (l'engagement de la direction générale est considéré comme une condition préalable d'une application couronnée de succès).

   (b) définition par la direction générale d'une politique d'efficacité énergétique pour l'installation.

   (c) planification et élaboration des objectifs et des cibles (voir MTD 2, 3 et 8).

   (d) mise en œuvre des procédures en portant une attention particulière aux points suivants :
      i) structure et responsabilité,
      ii) formation, sensibilisation et compétence (voir MTD 13),
      iii) communication,
      iv) implication des employés,
      v) documentation,
      vi) efficacité du contrôle des procédés (voir MTD 14),
      vii) maintenance (voir MTD 15),
      viii) préparation aux situations d'urgence et moyens d'action,
      ix) maintien de la conformité avec la législation et les accords (lorsque de tels accords existent) relatifs à l'efficacité énergétique.

   (e) analyse comparative : identification et évaluation des indicateurs d'efficacité énergétique au fil du temps (voir MTD 8), réalisation de comparaisons systématiques et régulières par rapport à des référentiels sectoriels, nationaux ou régionaux en matière d'efficacité énergétique, lorsqu'il existe des données vérifiées (voir Sections 2.1 (e), 2.16 et MTD 9).

(f) Vérification des performances et mesures correctives en accordant une attention particulière aux points suivants :
   i) surveillance et de mesure (voir MTD 16),
   ii) actions correctives et préventives,
   iii) maintien d'enregistrements,
   iv) réalisations d'audits internes indépendants (si possible) afin de déterminer si le système de management de l'efficacité énergétique est conforme aux modalités prévues et s'il est correctement mis en œuvre et maintenu dans le temps (voir MTD 4 et 5)

(g) Révision du SM2E par la direction générale pour vérifier qu'il reste adapté, adéquat et efficace.

Pour les points (h) et (i), voir ci-dessous d'autres caractéristiques concernant le constat d'efficacité énergétique et la vérification externe.

(h) prise en compte lors de la conception d'une installation, de l'incidence environnementale de son démantèlement en fin de vie.

(i) développement de technologies d'efficacité énergétique, et suivi des progrès en matière de techniques d'efficacité énergétique.

Le SM2E peut être réalisé en s'assurant que ces éléments font partie de systèmes de management existants (tels que les SME) ou en mettant en œuvre un système de management de l'efficacité énergétique distinct.

Trois étapes supplémentaires sont à considérer comme des mesures de renfort. Bien qu'elles présentent indéniablement des avantages, les systèmes qui les omettent peuvent néanmoins être considérés comme MTD. Ces trois étapes supplémentaires sont les suivantes :

- (voir Section 2.1 (h)) préparation et publication à intervalles réguliers (si possible avec une validation externe), d'un relevé d'efficacité énergétique décrivant tous les aspects environnementaux importants de l'installation, permettant une comparaison annuelle avec les objectifs et les cibles en matière d'efficacité énergétique et avec les référentiels sectoriels, comme approprié
- (voir Section 2.1 (i)) examen et validation par un organisme de certification accrédité ou par un vérificateur externe du SM2E du système de management de l'efficacité énergétique et de la procédure d'audit
- (voir Section 2.1, Applicabilité, 2) mise en œuvre et adhésion à un système volontaire de gestion de l'efficacité énergétique reconnu au niveau national ou international tel que :
  - DS2403, IS 393, SS627750, VDI Richtlinie No. 46, etc.
  - (en cas d'inclusion d'un système de management de l'efficacité énergétique dans un SME) Système de management environnemental et d'audit (EMAS) et EN ISO 14001 : 1996. Cette étape volontaire pourrait conférer une crédibilité plus élevée au SM2E. Toutefois, des systèmes de gestion de l'énergie qui ne sont pas normalisés peuvent s'avérer tout aussi efficaces à condition d'être correctement conçus et mis en œuvre.

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de ce SM2E sont fonction du type, de la taille et de la

complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et des systèmes qui la composent.

4.2.2 Planification et définition d'objectifs et de cibles

4.2.2.1 Amélioration environnementale continue

Un aspect important des systèmes de management environnemental est l'amélioration continue de l'environnement. A cet effet, il convient au sein d'une installation, de maintenir un équilibre entre la consommation d'énergie, de matières premières et d'eau, et les émissions (voir Sections 1.16 et 2.2.1). Une amélioration continue planifiée permet aussi d'atteindre le meilleur rapport coûts-avantages pour réaliser des économies d'énergie (et obtenir d'autres avantages pour l'environnement).

2. Les MTD consistent à minimiser de manière continue l'impact sur l'environnement d'une installation, en programmant les actions et les investissements de manière intégrée et à court, moyen et long termes, tout en tenant compte du coût et des bénéfices et des effets croisés.

Applicabilité : À toutes les installations.
« Continue» signifie que les actions sont répétées dans le temps ; par exemple, l'objectif global à long terme de réduction de l'impact sur l'environnement est pris en compte pour toutes les décisions de planification et d'investissement. Cela signifie parfois qu'il faut éviter des actions à court terme afin de faire un meilleur usage des investissements disponibles sur une période plus longue, par exemple, des changements apportés au cœur du procédé peuvent nécessiter davantage d'investissements et être plus longs à mettre en œuvre mais engendrer des réductions plus importantes de la consommation d'énergie et des émissions (voir exemples dans la Section 2.2.1).

Les améliorations peuvent ne pas être linéaires par exemple 2 % d'économies d'énergie chaque année pendant 10 ans. Elles peuvent se faire par paliers et refléter les investissements dans des projets d'efficacité énergétique (ENE), etc. (voir Section 2.2.1). En outre, il peut y avoir des effets croisés à prendre en compte, par exemple la nécessité d'utiliser davantage d'énergie pour réduire des polluants atmosphériques.

Les impacts sur l'environnement ne peuvent jamais être ramenés à zéro, et parfois de nouvelles mesures présentent très peu d'intérêt, voire aucun, par rapport aux coûts. Toutefois, sur une période plus longue, avec des changements de technologie et de coûts (par exemple, prix de l'énergie), la viabilité peut également varier.

4.2.2.2 Identification des aspects pertinents d'une installation en matière d'efficacité énergétique et des opportunités d'économies d'énergie

Afin d'optimiser l'efficacité énergétique, il convient d'identifier et de quantifier les aspects de l'installation ayant une influence sur l'efficacité énergétique (voir Section 2.11). Il est ensuite possible d'identifier, d'évaluer, d'établir des priorités et de mettre en œuvre les économies d'énergie selon la MTD 2, ci-dessus (voir Section 2.1(c)).

3. Les MTD consistent à identifier, au moyen d'un audit, les aspects d'une installation qui ont une influence sur l'efficacité énergétique. Il importe que cet audit soit compatible avec l'approche par systèmes (voir MTD 7).

Applicabilité : À toutes les installations et avant de planifier une modernisation ou reconstruction. Un audit peut être interne ou externe.

Le champ d'application et la nature de l'audit (par exemple niveau de détail, l'intervalle entre les audits) sont fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que de la consommation d'énergie des procédés et des systèmes qui la composent. (Voir Section 2.8.), par ex.:

- *dans les grandes installations comportant de nombreux systèmes et des composants individuels consommateurs d'énergie comme les moteurs, il est nécessaire de donner la priorité à la collecte des informations nécessaires et aux utilisations importantes ;*
- *dans les petites installations, un audit de type « walk-through (examen général rapide) » peut être suffisant.*

Le premier audit énergétique d'une installation peut être dénommé un diagnostic énergétique.

4. Lors de la réalisation d'un audit, les MTD consistent à mettre en évidence les aspects d'une installation qui ont une influence sur l'efficacité énergétique (voir Section 2.11) :

a) type et quantité d'énergie utilisée dans l'installation, dans les systèmes qui la composent et par les différents procédés ;

b) équipements consommateurs d'énergie, et type et quantité d'énergie utilisée dans l'installation ;

c) possibilités de minimiser la consommation d'énergie, notamment :
   - contrôle/réduction des temps de fonctionnement, par exemple arrêt en dehors des périodes d'utilisation (par ex. voir Sections 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.11) ;
   - assurance d'une optimisation de l'isolation, par ex. voir Sections 3.1.7, 3.2.11 et 3.11.3.7 ;
   - optimisation des utilités, des systèmes, des procédés et des équipements associés (voir Chapitre 3**Error! Reference source not found.**)

d) possibilités d'utilisation d'autres sources d'énergie plus efficaces, en particulier l'énergie excédentaire provenant d'autres procédés et/ou systèmes, voir Section 3.3

e) possibilités d'application de l'énergie excédentaire à d'autres procédés et/ou systèmes, voir Section 3.3

f) possibilité d'améliorer la qualité de la chaleur (voir Section 3.3.2).

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de l'audit sont fonction du type, de la taille et de la

complexité de l'installation ainsi que de la consommation d'énergie des procédés et des systèmes qui la composent.

Des exemples de techniques d'optimisation des systèmes et des procédés sont présentés dans les sections concernées du Chapitre 3.

5. Les MTD consistent à utiliser des méthodes ou outils appropriés pour faciliter la mise en évidence et la quantification des possibilités d'économies d'énergie, notamment :

- des modèles, des bases de données et des bilans énergétiques (voir Section 2.15) ;
- une technique telle que la méthode de pincement (voir Section 2.12), l'analyse d'exergie ou d'enthalpie (voir Section 2.13), ou la thermoéconomie (voir Section 2.14) ;
- des estimations et des calculs (voir Sections 1.5 et 2.10.2).

Applicabilité : Applicable à chaque secteur. Le choix d'un ou de plusieurs outils appropriés est fonction du secteur ainsi que de la taille, de la complexité et de la consommation d'énergie du site. Le choix est spécifique à chaque site ; il est examiné dans les sections concernées.

6. Les MTD consistent à identifier les opportunités d'optimisation de la récupération d'énergie au sein de l'installation, entre les systèmes de l'installation (voir MTD 7) et/ou avec une ou plusieurs tierces parties, comme celles décrites dans les Sections 3.2, 3.3 et 3.4.

Applicabilité : La récupération d'énergie suppose l'existence d'un usage approprié de la chaleur excédentaire récupérable (type et quantité (voir Sections 3.3 et 3.4, et Annexes 7.10.2 et 7.10.3). Une approche systémique est présentée dans la Section 2.2.2 et dans la MTD 7). Des opportunités peuvent être identifiées à différents moments, notamment suite à des audits ou d'autres investigations, lorsqu'on envisage des modernisations ou la création de nouvelles unités ou lorsque la situation locale change (notamment si l'on découvre un usage pour le surplus de chaleur dans une activité voisine).

La coopération et l'accord de tierces parties peuvent échapper au contrôle de l'exploitant et ainsi ne pas tomber dans le cadre d'une autorisation IPPC. Dans de nombreux cas, les pouvoirs publics ont favorisé de tels accords ou sont eux-mêmes la tierce partie.

4.2.2.3 Approche systémique du management de l'énergie

Les gains les plus importants en termes d'efficacité énergétique sont obtenus en considérant l'installation dans son ensemble et en évaluant les besoins et la finalité des différents systèmes, leurs énergies associées et leurs interactions (voir Sections 1.3.5, 1.4.2 et 2.2.2).

7. Les MTD consistent à optimiser l'efficacité énergétique au moyen d'une approche systémique du management de l'énergie dans l'installation. Les

systèmes à prendre en considération en vue d'une optimisation globale sont notamment :

- les unités de procédés (voir BREF sectoriels)
- les systèmes de chauffage tels que :
  - vapeur (voir Section 3.2)
  - eau chaude
- le refroidissement et le vide (voir le BREF ICS relatif aux systèmes de refroidissement industriel)
- les systèmes entraînés par un moteur, tels que :
  - air comprimé (voir Section 3.7)
  - le pompage (voir Section 3.8)
- l'éclairage (voir Section 3.10)
- le séchage, la séparation et la concentration (voir Section 3.11).

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple le niveau de détail, la fréquence d'optimisation, les systèmes à prendre en considération à chaque instant) de cette technique sont fonction de facteurs tels que le type, la taille et la complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et des systèmes qui la composent et des techniques prises en compte pour l'application.

4.2.2.4 Fixation et réexamen d'objectifs et d'indicateurs d'efficacité énergétique

Il est indispensable de fixer des objectifs d'efficacité énergétique quantifiables, enregistrés, non seulement pour y parvenir mais aussi pour la conserver. Un audit permet d'identifier les domaines d'amélioration possibles (voir MTD 3). Les indicateurs servent quant à eux à évaluer l'efficacité réelle des mesures d'efficacité énergétique. Pour les industries de procédés, il s'agit de préférence d'indicateurs liés à la productivité ou au rendement de la production (par ex. GJ/t de produits, voir Section 1.3), dénommés consommation d'énergie spécifique (SEC). Lorsqu'il est impossible d'établir un seul objectif énergétique (par ex. la consommation d'énergie spécifique) ou lorsque cela s'avère utile, l'efficacité des procédés, unités ou systèmes individuels peut être évaluée. Les indicateurs de procédés figurent souvent dans les BREF sectoriels concernés (pour une présentation générale, [283, EIPPCB])

Les paramètres de production (tels que taux de production, type de produit) varient et ces variations sont susceptibles d'avoir une incidence sur la mesure de l'efficacité énergétique et doivent être enregistrés afin d'expliquer les variations et de garantir que l'efficacité énergétique est obtenue par les techniques appliquées (voir Sections 1.4 et 1.5). L'utilisation de l'énergie et ses transferts peuvent être compliqués : la limite de l'installation ou du système en cours d'évaluation doit donc être soigneusement définie en se référant à des systèmes entiers (voir Sections 1.3.5 et 1.4.2 et MTD 7). L'énergie doit être calculée en fonction de l'énergie primaire, ou des utilisations de l'énergie en tant qu'énergie secondaire pour les différentes utilités (par ex. chaleur du procédé utilisée sous forme de vapeur en GJ/t, voir Section 1.3.6.1).

8. Les MTD consistent à établir des indicateurs d'efficacité énergétique par la mise en œuvre de toutes les actions suivantes :

a) identification d'indicateurs d'efficacité énergétique appropriés pour l'installation et, si nécessaire, pour les différents procédés, systèmes et/ou unités, et mesure de leur évolution dans le temps ou après mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique (voir Sections 1.3 et 1.3.4) ;

b) identification et enregistrement de limites appropriées associées aux indicateurs (voir Sections 1.3.5 et 1.5.1) ;

c) identification et enregistrement de facteurs susceptibles d'entraîner une variation de l'efficacité énergétique des procédés, systèmes et/ou unités (voir Sections 1.3.6 et 1.5.2)

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de ces techniques sont fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que de la consommation d'énergie des procédés et des systèmes qui la composent.

L'énergie secondaire ou finale sert généralement à surveiller les situations en cours. Dans certains cas, il peut s'avérer très pratique d'utiliser *plusieurs indicateurs d'énergie secondaire ou finale par exemple pour l'industrie des pâtes et papiers où à la fois la vapeur et l'électricité sont donnés comme indicateurs conjoints de l'efficacité énergétique). Lors du choix (ou du changement) des vecteurs d'énergie et des utilités, l'indicateur peut aussi être l'énergie secondaire ou finale. Toutefois, il est possible d'utiliser d'autres indicateurs tels que l'énergie primaire ou le bilan carbone pour tenir compte de l'efficacité de la production de tout vecteur d'énergie secondaire et de ses effets croisés, en fonction des circonstances locales (voir Section1.3.6.1).*

4.2.2.5 Analyse comparative

L'analyse comparative est un outil puissant pour évaluer la performance d'une usine et les résultats obtenus grâce aux mesures d'efficacité énergétique mais aussi pour combattre l'aveuglement paradigmatique[2]. Il est possible de trouver certaines données dans les BREF sectoriels, la documentation des associations professionnelles, la documentation nationale établissant des recommandations, les calculs d'énergie théorique pour les procédés, etc. Les données doivent pouvoir être comparées et doivent parfois être corrigées, par exemple pour les types de charge d'alimentation. La confidentialité des données peut être un aspect important, notamment si la consommation d'énergie constitue une part importante du coût de production, bien qu'il soit possible de protéger les données (voir Section 2.16). Voir aussi la mise en place d'indicateurs énergétiques dans la MTD 8.

Il est possible d'appliquer une analyse comparative aux procédés et méthodes de travail (voir Sections 2.5 et 2.16).

9. Les MTD consistent à réaliser des comparaisons systématiques et régulières par rapport à des référentiels sectoriels, nationaux ou régionaux, lorsque des données validées sont disponibles.

[2] L'aveuglement paradigmatique est une expression utilisée pour décrire le phénomène survenant lorsque le paradigme (mode de pensée) dominant empêche de voir d'autres solutions viables et qui peut s'exprimer comme suit : « notre façon de faire est la meilleure parce que nous avons toujours fait comme ça »

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le niveau de détail est fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que de la consommation d'énergie des procédés et des systèmes qui la composent. Il est parfois nécessaire d'étudier les questions liées à la confidentialité des données (voir Section 2.16) : par exemple, il est des cas où les résultats d'une analyse comparative ne peuvent être divulgués. Les données validées sont les données contenues dans les BREF, ou celles vérifiées par une tierce partie. L'intervalle entre deux analyses comparatives est propre au secteur et généralement long (c'est-à-dire de plusieurs années), car il est rare que les données d'analyse comparative évoluent rapidement ou considérablement sur une courte période.

4.2.3 Prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED)

La phase de planification d'une nouvelle installation, unité ou système (ou d'une modernisation de grande ampleur), offre l'opportunité de considérer les coûts énergétiques des procédés, des équipements et des systèmes d'utilités, sur la durée de vie des procédés etc., et de sélectionner les options les plus efficaces au plan de l'énergie et ayant les meilleurs coûts sur le cycle de vie (voir Section 2.1(c)).

10. Les MTD consistent à optimiser l'efficacité énergétique lors de la planification d'une nouvelle installation, unité ou système ou d'une modernisation de grande ampleur (voir Section 2.3), selon les modalités suivantes :

a) l'efficacité énergétique doit être prise en compte dès les premiers stades de la conception, quelle soit théorique ou pratique, même si les besoins d'investissement ne sont pas encore bien définis, et elle doit être intégrée dans la procédure d'appel d'offres ;

b) mise au point et/ou sélection de techniques d'efficacité énergétique (voir Sections 2.1 (k) et 2.3.1) ;

c) il peut s'avérer nécessaire de rassembler des données supplémentaires, dans le cadre du projet de conception ou séparément, pour compléter les données existantes ou pour combler des lacunes dans les connaissances ;

d) les travaux associés à la prise en compte de l'efficacité énergétique au stade de la conception doivent être menés par un expert en énergie

e) la cartographie initiale de la consommation énergétique doit aussi permettre de déterminer quelles sont les parties intervenant dans l'organisation du projet qui influeront sur la consommation énergétique future, et d'optimiser, en concertation avec ces parties, l'intégration de l'efficacité énergétique au stade de la conception de la future installation. Il peut s'agir, par exemple, du personnel de l'installation existante chargé de déterminer les paramètres d'exploitation.

Applicabilité : à toutes les installations nouvelles, modernisations de grande ampleur, principaux procédés et systèmes. En l'absence de personnel qualifié, spécialiste de l'efficacité énergétique en interne, (par ex. dans les industries qui ne sont pas de

grandes consommatrices d'énergie), il est recommandé de recourir à un expert externe de l'efficacité énergétique (voir Section 2.3).

4.2.4 Intégration accrue des procédés

L'intégration accrue des procédés apporte des avantages supplémentaires, notamment l'optimisation de l'utilisation des matières premières.

11. Les MTD consistent à rechercher l'optimisation de l'utilisation de l'énergie par plusieurs procédés ou systèmes (voir Section 2.4), au sein de l'installation, ou avec une tierce partie.

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de cette technique sont fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et des systèmes qui la composent.

La coopération et l'accord de tierces parties peuvent échapper au contrôle de l'exploitant et ainsi ne pas tomber dans le cadre d'une autorisation IPPC. Dans de nombreux cas, les pouvoirs publics ont favorisé de tels accords ou sont eux-mêmes la tierce partie.

4.2.5 Maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique

Si l'on veut que les améliorations de l'efficacité énergétique auxquelles on est parvenu s'inscrivent dans la durée, il est nécessaire de maintenir la dynamique des programmes d'efficacité énergétique (voir Section 2.5).

12. Les MTD consistent à maintenir la dynamique du programme d'efficacité énergétique au moyen de diverses techniques, notamment :

a) mise en œuvre d'un système spécifique de management de l'énergie (voir Section 2.1 et MTD 1) ;

b) comptabilisation de l'énergie sur la base de valeurs réelles (mesurées); la responsabilité en matière d'efficacité énergétique incombe ainsi à l'utilisateur/celui qui paie la facture, et c'est également à lui qu'en revient le mérite (voir Sections 2.5, 2.10.3 et 2.15.2) ;

c) création de centres de profit en matière d'efficacité énergétique (voir Section 2.5) ;

d) analyse comparative (voir Section 2.16 et MTD 9) ;

e) nouvelle façon d'appréhender les systèmes de management existants, par exemple en ayant recours à l'excellence opérationnelle (voir Section 2.5) ;

f) recours à des techniques de gestion des changements organisationnels (une autre facette de l'Excellence opérationnelle, voir Section 2.5).

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Il convient selon le cas d'utiliser une seule technique ou plusieurs techniques conjointement. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de ces techniques sont fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que de la consommation d'énergie des procédés et des systèmes qui la composent. Les techniques (a), (b) et (c) sont appliquées conformément aux données figurant dans les sections correspondantes. Les techniques (d), (e) et (f) doivent être appliquées à intervalles suffisamment espacés (vraisemblablement de plusieurs années) pour permettre l'évaluation des progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique.

4.2.6 Maintien de l'expertise

La mise en œuvre et le contrôle du management de l'efficacité énergétique requièrent des ressources humaines, et le personnel dont le travail est susceptible d'avoir un impact sur l'énergie doit recevoir une formation (voir Section 2.1 (d) (i) et (ii), et Section 2.6.

13. Les MTD consistent à maintenir l'expertise en matière d'efficacité énergétique et de systèmes consommateurs d'énergie, notamment par les techniques suivantes :

a) recrutement de personnel qualifié et/ou formation du personnel. La formation peut être dispensée en interne, par des experts externes, au moyen de cours formels ou dans le cadre de l'autoformation/développement personnel (voir Section 2.6) ;

b) mise en disponibilité périodique du personnel pour effectuer des contrôles programmés ou spécifiques (sur leur installation d'origine ou sur d'autres, voir Section 2.5) ;

c) partage des ressources internes entre les sites (voir Section 2.5) ;

d) recours à des consultants dûment qualifiés pour les contrôles programmés (par ex. voir Section 2.11) ;

e) externalisation des systèmes et/ou fonctions spécialisés (par ex. voir Annexe 7.12).

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de ces techniques sont fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et des systèmes qui la composent.

4.2.7 Bonne maîtrise des procédés

14. Les MTD consistent à s'assurer la bonne maîtrise des procédés, notamment par les techniques suivantes :

a) mettre en place des systèmes pour faire en sorte que les procédures soient connues, bien comprises et respectées (voir Sections 2.1(d) (vi) et 2.5) ;

b) vérifier que les principaux paramètres de performance sont connus, ont été optimisés concernant l'efficacité énergétique, et font l'objet d'une surveillance (voir Sections 2.8 et 2.10) ;

c) documenter ou enregistrer ces paramètres (voir Sections 2.1(d) (vi), 2.5, 2.10 et 2.15).

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de ces techniques sont fonction du secteur, du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et des systèmes qui la composent.

4.2.8 Maintenance

La maintenance structurée et la réparation, dès que possible, des équipements qui utilisent de l'énergie et/ou contrôlent son utilisation sont indispensables pour atteindre et conserver l'efficacité (voir Sections 2.1(d) (vii), 2.9 et MTD 1).

15. Les MTD consistent à réaliser la maintenance des installations en vue d'optimiser l'efficacité énergétique par l'application de toutes les mesures suivantes :

a) définir clairement les responsabilités de chacun en matière de planification et d'exécution de la maintenance

b) établir un programme structuré de maintenance, basé sur les descriptions techniques des équipements, sur les normes, etc., ainsi que sur les éventuelles pannes des équipements et leurs conséquences. Il est préférable de programmer certaines activités de maintenance durant les périodes d'arrêt des installations

c) faciliter le programme de maintenance par des systèmes appropriés d'archivage des données et par des tests de diagnostic

d) mise en évidence, grâce à la maintenance de routine et en fonction des pannes et/ou des anomalies, d'éventuelles pertes d'efficacité énergétique ou de possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique

e) détecter les fuites, les équipements défectueux, les paliers usagés, etc., susceptibles d'influencer ou de contrôler la consommation d'énergie, et y remédier dès que possible.

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de ces techniques sont fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et des systèmes qui la composent. La nécessité de procéder rapidement aux réparations doit être pondérée par l'obligation de maintenir la qualité du produit et la stabilité du procédé, ainsi que par des considérations ayant trait à la santé et à la sécurité quant à

l'opportunité de réaliser des réparations sur des installations en fonctionnement (susceptibles de contenir des équipements mobiles, chauds, etc.).

4.2.9 Surveillance et mesurage

La surveillance et le mesurage sont une partie essentielle de la vérification que l'on trouve dans tout système de gestion de type « planifier – développer (réaliser) – contrôler (vérifier) - agir », comme dans un système de management de l'énergie (voir Section 2.1). Elles sont aussi une partie du contrôle des procédés efficace (voir MTD 14).

16. Les MTD consistent à établir et à maintenir des procédures documentées pour surveiller et mesurer régulièrement les principales caractéristiques des opérations et activités qui peuvent avoir un impact significatif sur l'efficacité énergétique. La Section 2.10 propose des techniques appropriées à cet effet.

Applicabilité : Applicable à toutes les installations. Le champ d'application et la nature (par exemple niveau de détail) de cette technique sont fonction du type, de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que des besoins en énergie des procédés et des systèmes qui la composent.

4.3 Meilleures techniques disponibles en matière d'efficacité énergétique pour les systèmes, les procédés, les activités ou les équipements consommateurs d'énergie

Introduction

La Section 4.2.2.3 insiste sur l'importance de considérer *l'installation dans son ensemble et d'évaluer les besoins et la finalité des différents systèmes, leurs énergies associées et leurs interactions.* La. MTD 7 donne des exemples de systèmes couramment rencontrés dans les installations.

La Section 4.2 comporte des MTD qui sont en principe applicables à tous les systèmes, procédés et activités associées. Elles comprennent :

- l'analyse comparative du système et de ses performances (MTD 1, 3, 4, 8 et 9)
- la planification des actions et des investissements destinés à optimiser l'efficacité énergétique, compte tenu du coût et des avantages et des effets croisés (MTD 2)
- pour les nouveaux systèmes, l'optimisation de l'efficacité énergétique dès la conception de l'installation, de l'unité ou du système, ainsi que lors du choix des procédés (MTD 10)
- pour les systèmes existants, l'optimisation de l'efficacité énergétique du système par son exploitation et sa gestion, y compris sa surveillance et sa maintenance régulières (voir MTD 14, 15 et 16).

Les MTD présentées dans la présente section sont applicables aux systèmes énumérés ci-dessous, étant entendu que les MTD générales de la Section 4.2 leur sont également appliquées, dans le cadre de l'optimisation de ces systèmes.

4.3.1 Combustion

La combustion est un procédé couramment utilisé à la fois pour le chauffage direct (comme dans l'industrie de la chaux et du ciment) et le chauffage indirect (comme dans les systèmes de chaudière à vapeur et la production d'électricité). Les techniques relatives à l'efficacité énergétique en matière de combustion sont donc traitées dans les BREF des secteurs concernés. Pour les autres cas, notamment en ce qui concerne les activités associées, le BREF LCP (Grandes installations de combustion) stipule que :

« ....les installations plus petites peuvent potentiellement être ajoutées à une autre installation afin de créer une installation plus grande dont la puissance thermique est supérieure à 50 MW. Cela signifie que tous les types de centrales électriques classiques (par exemple, chaudières collectives, centrales de production combinée d'électricité et de chaleur, installations de chauffage urbain, etc.) utilisés pour la production mécanique d'électricité et de chaleur, sont couverts par le présent ouvrage (BREF LCP). »

17. Les MTD consistent à optimiser le rendement énergétique de la combustion par des techniques appropriées, notamment :

- celles spécifiques aux secteurs énoncées dans les BREF verticaux
- celles présentées dans le tableau 4.1.

Techniques pour les secteurs et les activités associées où la combustion n'est pas traitée dans un BREF vertical					
Techniques par type de combustible et par section dans le BREF LCP de Juillet 2006					**Techniques dans le présent document par section**
	Charbon et lignite	**Biomasse et tourbe**	**Combustibles liquides**	**Combustibles gazeux**	
Préséchage du lignite	4.4.2				
Gazéification du charbon	4.1.9.1, 4.4.2 et 7.1.2				
Séchage du combustible		5.1.2, 5.4.2, 5.4.4			
Gazéification de la biomasse		5.4.2, 7.1.2			
Pressage de l'écorce		5.4.2, 5.4.4			
Utilisation d'une turbine de détente pour récupérer le contenu énergétique des gaz pressurisés				7.1.1, 7.1.2, 7.4.1, 7.5.1	
Cogénération	4.5.5, 6.1.8	5.3.3, 5.5.4	4.5.5, 6.1.8	7.1.6, 7.5.2	3.4 Cogénération
Systèmes de contrôle informatisés avancés des conditions de combustion pour réduction des émissions et augmentation des performances de la chaudière	4.2.1, 4.2.1.9, 4.4.3 4.5.4	5.5.3	6.2.1, 6.2.1.1, 6.4.2, 6.5.3.1	7.4.2 7.5.2	
Utilisation du contenu calorifique des gaz de combustion pour le chauffage urbain	4.4.3				

Techniques pour les secteurs et les activités associées où la combustion n'est pas traitée dans un BREF vertical					
Techniques par type de combustible et par section dans le BREF LCP de Juillet 2006					**Techniques dans le présent document par section**
	Charbon et lignite	**Biomasse et tourbe**	**Combustibles liquides**	**Combustibles gazeux**	
Excès d'air faible	4.4.3 4.4.6	5.4.7	6.4.2 6.4.5	7.4.3	3.1.3 Réduction du débit massique des gaz de combustion par une réduction de l'excès d'air
Diminution des températures des gaz d'exhaure	4.4.3		6.4.2		3.1.1 Réduction de la température des gaz de combustion grâce à • dimensionnement pour obtenir les performances maximales plus un facteur de sécurité calculé pour les surcharges • augmentation du transfert de chaleur vers le procédé soit par une augmentation du taux de transfert de chaleur, soit par agrandissement ou amélioration des surfaces de transfert de chaleur • récupération de chaleur avec l'association d'un procédé supplémentaire (par ex. génération de vapeur en utilisant des économiseurs), pour récupérer la chaleur perdue dans les gaz de combustion • installation d'un préchauffeur d'air ou d'eau (voir Section 3.1.1.1) ou préchauffage du combustible par échange de chaleur avec les gaz de combustion (voir Section 3.1.1). Remarque : le procédé peut parfois nécessiter un préchauffage de l'air lorsqu'une température de flamme élevée est requise (verre, ciment, etc.) • nettoyage des surfaces de transfert de chaleur qui sont progressivement recouvertes de cendres ou de particules carbonées, afin de conserver une efficacité élevée pour le transfert de chaleur. Des souffleurs de suie fonctionnant périodiquement peuvent garder les zones de convection propres. Le nettoyage des surfaces de transfert de chaleur dans la zone de combustion est généralement effectué au cours des arrêts pour inspection et maintenance, mais un nettoyage en ligne peut être appliqué dans certains cas (par exemple pour les réchauffeurs de raffinerie)
Faible concentration de CO dans les gaz de combustion	4.4.3		6.4.2		
Accumulation de chaleur			6.4.2	7.4.2	
Rejet de la tour de refroidissement	4.4.3		6.4.2		

Techniques pour les secteurs et les activités associées où la combustion n'est pas traitée dans un BREF vertical					
Techniques par type de combustible et par section dans le BREF LCP de Juillet 2006					**Techniques dans le présent document par section**
	Charbon et lignite	**Biomasse et tourbe**	**Combustibles liquides**	**Combustibles gazeux**	
Différentes techniques pour système de refroidissement (voir BREF CV)	4.4.3		6.4.2		
Préchauffage du gaz combustible par utilisation de la chaleur perdue				7.4.2	3.1.1 Réduction de la température des effluents gazeux • préchauffage de l'air par échange de chaleur avec les gaz de combustion (voir Section 3.1.1.1). Remarque : le procédé nécessite parfois un préchauffage de l'air lorsqu'une température de flamme élevée est requise (verre, ciment, etc.)
Préchauffage de l'air de combustion				7.4.2	3.1.1 Réduction de la température des effluents gazeux • installation d'un préchauffeur d'air par échange de chaleur avec les gaz de combustion (voir Section 3.1.1.1). Remarque : le procédé nécessite parfois un préchauffage de l'air lorsqu'une température de flamme élevée est requise (verre, ciment, etc.)
Brûleurs récupératifs et régénératifs					3.1.2
Régulation et contrôle-commande des brûleurs					3.1.4
Choix du combustible					3.1.5
Oxy-combustion (oxy-combustible)					3.1.6
Réduction des pertes thermiques grâce à l'isolation					3.1.7
Réduction des pertes par les portes du four					3.1.8
Combustion en lit fluidisé	4.1.4.2	5.2.3			

Tableau4.1 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes de combustion

4.3.2 Systèmes à vapeur

La vapeur est couramment utilisée comme fluide de transport de la chaleur en raison de sa nature non toxique, de sa stabilité, de son faible coût, de sa capacité thermique élevée et de sa souplesse d'emploi. L'efficacité de l'utilisation de la vapeur est souvent négligée, car il n'est pas facile de la mesurer, à l'instar du rendement thermique d'une chaudière. On peut toutefois le faire en utilisant des outils comme ceux de la MTD 5, conjointement à une surveillance appropriée (voir Section 2.10).

18. Les MTD pour les systèmes à vapeur consistent à optimiser l'efficacité énergétique, en ayant recours à des techniques telles que :

- celles spécifiques aux secteurs énoncés dans les BREF verticaux
- celles énoncées dans le tableau 4.2.

Techniques pour les secteurs et activités associées où les systèmes à vapeur ne sont pas traités dans un BREF vertical		
Techniques par section du BREF ENE (Efficacité énergétique)		
	Avantages	***Section du présent document***
CONCEPTION		
Prise en compte de l'efficacité énergétique au niveau de la conception et de l'installation du réseau de canalisations vapeur	Optimisation des économies d'énergie	2.3
Dispositifs d'étranglement et utilisation des turbines à contre-pression. (Utilisation des turbines à contre-pression à la place des soupapes de détente)	Fournit une méthode plus efficace de réduction de la pression vapeur pour les services basse pression. Applicable lorsque la taille et les aspects économiques justifient l'emploi d'une turbine	
FONCTIONNEMENT ET CONTROLE		
Amélioration des procédures d'exploitation et des contrôles des chaudières	Optimisation des économies d'énergie	3.2.4
Contrôle séquentiel des chaudières (applicable uniquement aux sites comportant plusieurs chaudières)	Optimisation des économies d'énergie	3.2.4
Installation de registres d'isolement des gaz de combustion (applicable uniquement aux sites comportant plusieurs chaudières)	Optimisation des économies d'énergie	3.2.4
GÉNÉRATION		
Préchauffage de l'eau d'alimentation en utilisant : • la chaleur perdue émanant par ex. d'un procédé, • des économiseurs qui utilisent l'air de combustion, • l'eau d'alimentation désaérée pour chauffer le condensat ; et • en condensant la vapeur utilisée pour le strippage et en chauffant l'eau alimentant le désaérateur au moyen d'un échangeur de chaleur.	Récupération de la chaleur disponible dans les gaz d'échappement et renvoi de cette chaleur dans le système en préchauffant l'eau d'alimentation.	3.2.5 3.1.1
Prévention et élimination des dépôts de tartre sur les surfaces de transfert de chaleur. (Surfaces de transfert de chaleur de la chaudière propres)	Transfert efficace de la chaleur émanant des gaz de combustion à la vapeur	3.2.6
Minimisation des purges de la chaudière en améliorant le traitement de l'eau. Installation d'un contrôle automatique des matières solides dissoutes totales	Réduction de la quantité de matières solides dissoutes totales contenue dans l'eau de la chaudière, ce qui se traduit par une diminution du nombre de purges et donc par une réduction des pertes d'énergie	3.2.7
Ajout/réparation des réfractaires de la chaudière	Réduction des pertes d'énergie et restauration du rendement de la chaudière	2.10.1 2.9
Optimisation du taux de mise à l'air libre du désaérateur	Minimisation des pertes de vapeur pouvant être évitées	3.2.8
Minimisation des pertes dues aux cycles courts des chaudières	Optimisation des économies d'énergie	3.2.9
Maintenance de la chaudière		2.9
DISTRIBUTION		

Techniques pour les secteurs et activités associées où les systèmes à vapeur ne sont pas traités dans un BREF vertical		
Techniques par section du BREF ENE (Efficacité énergétique)		
Optimisation du système de distribution vapeur, (en particulier pour couvrir les points ci-dessous)		2.9 et 3.2.10
Isolement des canalisations vapeur inutilisées	Minimisation des pertes de vapeur pouvant être évitées et réduction de pertes d'énergie liées aux canalisations et aux surfaces des équipements	3.2.10
Isolation des canalisations vapeur et des tuyaux de retour du condensat. (Vérifier que les canalisations du système de vapeur, les vannes, les raccords et les cuves sont bien isolés)	Réduction de pertes d'énergie liées aux canalisations et aux surfaces des équipements	3.2.11
Mise en place d'un programme de contrôle et de réparation pour les purgeurs de vapeur	Réduction du passage de la vapeur vive dans le système du condensat et optimisation du fonctionnement des équipements de transfert de chaleur pour utilisation finale. Minimise les pertes de chaleur évitables.	3.2.12
RÉCUPÉRATION		
Collecte et retour du condensat à la chaudière en vue de son réemploi. (Optimisation de la récupération du condensat)	Récupération de l'énergie thermique contenue dans le condensat et réduction de la quantité d'eau d'appoint ajoutée au système, économies d'énergie et sur le coût du traitement de l'eau par des produits chimiques	3.2.13
Réemploi de la vapeur de détente. (Utilisation d'un condensat haute pression pour obtenir de la vapeur basse pression)	Exploitation de l'énergie disponible dans le retour du condensat	3.2.14
Récupération de l'énergie provenant des purges	Transfert de l'énergie disponible dans la purge de vapeur au système réduisant ainsi les pertes d'énergie	3.2.15

Techniques par type de combustible et par section dans le BREF LCP Juillet 2006				
	Charbon et lignite	***Biomasse et tourbe***	***Combustibles liquides***	***Combustibles gazeux***
Utilisation d'une turbine de détente pour récupérer le contenu énergétique des gaz pressurisés				7.4.1et 7.5.1
Changement des aubes de la turbine	4.4.3	5.4.4	6.4.2	
Utilisation de matériaux avancés pour atteindre des paramètres de vapeur élevés	4.4.3		6.4.2	7.4.2
Paramètres de vapeur supercritique	4.4.3, 4.5.5		6.4.2	7.1.4
Double réchauffage	4.4.3, 4.5.5		6.4.2, 6.5.3.1	7.1.4, 7.4.2, 7.5.2
Chauffage de l'eau d'alimentation régénérative	4.2.3, 4.4.3	5.4.4	6.4.2	7.4.2
Utilisation du contenu calorifique des gaz de combustion pour le chauffage urbain	4.4.3			
Accumulation de chaleur			6.4.2	7.4.2
Systèmes de contrôle informatisés avancés de la turbine à gaz et des chaudières de récupération suivantes				7.4.2

Tableau 4.2 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes à vapeur

4.3.3 Récupération de chaleur

Les principaux types de systèmes de récupération de chaleur sont décrits dans la Section 3.3 :

- échangeurs de chaleur
- pompes à chaleur.

Les systèmes d'échange de chaleur sont couramment utilisés avec de bons résultats dans de nombreux secteurs industriels et systèmes ainsi que pour mettre en œuvre les MTD 5 et 11. L'utilisation des pompes à chaleur ne cesse d'augmenter.

L'utilisation de la « chaleur perdue » ou surplus de chaleur est une solution davantage durable que l'utilisation des combustibles primaires, en dépit de son moindre rendement énergétique.

La récupération de chaleur suppose obligatoirement l'existence d'une demande correspondant à la courbe de production. Toutefois, elle est appliquée dans un nombre croissant de cas, dont la plupart sont situés à l'extérieur de l'installation, voir Section 3.4 et Annexe 7.10.

Les techniques de refroidissement et les MTD qui leur sont associées sont décrites dans le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels), ainsi que les techniques de maintenance des échangeurs de chaleur.

19. Les MTD consistent à maintenir l'efficacité des échangeurs de chaleur par :

a) une surveillance périodique de l'efficacité, et

b) la prévention de l'encrassement ou le nettoyage

Voir Section 3.3.1.1.

4.3.4 Cogénération

Il existe un intérêt considérable pour la cogénération, qui au niveau européen bénéficie du soutien de la Communauté européenne avec l'adoption de la Directive 2004/8/CE sur la promotion de la cogénération et de la Directive 2003/96/CE sur la taxation de l'énergie ainsi que par la mise en place de diverses politiques et mesures d'incitation nationales. Des installations à relativement petite échelle sont maintenant économiquement réalisables et des mesures d'incitations sont disponibles. Dans de nombreux cas, la cogénération s'est soldée par une réussite grâce à l'assistance des autorités locales. Voir Section 3.4 et Annexe 7.10.3 et 7.10.4.

La modélisation des utilités décrite à la Section 2.15.2 peut faciliter l'optimisation des systèmes de génération et de récupération de chaleur, ainsi que la gestion des achats et vente des surplus d'énergie.

20. Les MTD consistent à rechercher les possibilités de cogénération, au sein de l'installation et/ou en dehors de celle-ci (avec une tierce partie).

Applicabilité : la coopération et l'accord de tierces parties peuvent échapper au contrôle de l'exploitant et ainsi ne pas tomber dans le cadre d'une autorisation IPPC.

La cogénération dépend vraisemblablement autant des conditions économiques que de l'optimisation de l'efficacité énergétique. Les opportunités de cogénération doivent être recherchées, au regard de l'identification des possibilités, de l'investissement du côté producteur ou du côté consommateur potentiel, de l'identification de partenaires potentiels ou par rapport à des changements de conditions économiques (chaleur, combustible, prix, etc.).

En règle générale, la cogénération peut être envisagée lorsque :

- *les demandes en chaleur et en énergie électrique sont concomitantes ;*
- *la demande en chaleur (sur site et/ou hors site), en termes de quantité (durée de fonctionnement annuel), température, etc. peut être satisfaite en utilisant la chaleur de la centrale CHP(Production combinée de chaleur et d'électricité), et s'il n'y a pas lieu de s'attendre à des baisses importantes de la demande en chaleur.*

La Section 3.4 étudie l'application de cogénération, les différents types de centrales de cogénération (CHP) et leur applicabilité à des cas individuels.

La réussite de la mise en œuvre peut dépendre d'un prix adéquat du combustible et/ou de la chaleur rapportée au prix de l'électricité. Dans de nombreux cas, les pouvoirs publics (au niveau local, régional ou national) ont favorisé de tels accords ou sont eux-mêmes la tierce partie

4.3.5 Alimentation électrique

La qualité de l'alimentation électrique et la manière dont l'électricité est utilisée ont une incidence sur l'efficacité énergétique, voir Section 3.5. Il s'agit d'un aspect difficile à comprendre et qui est souvent négligé. Les pertes d'énergie se manifestent souvent sous forme d'électricité improductive à l'intérieur de l'installation et dans le réseau d'alimentation externe. Il faut également citer les pertes de capacité dans le système de distribution électrique de l'installation, entraînant des chutes de tension, occasionnant une surchauffe et des pannes prématurées des moteurs et autres équipements. Il peut s'ensuivre une surfacturation lorsque l'électricité est achetée.

21. Les MTD consistent à augmenter le facteur de puissance suivant les exigences du distributeur d'électricité local, en ayant recours à des techniques telles que celles décrites dans le Tableau 4.3, en fonction de leur applicabilité (voir Section 3.5.1).

Technique	Applicabilité
Installer des condensateurs sur les circuits de courant alternatif pour réduire l'ampleur de la puissance réactive	À tous les cas. Mesure à faible coût et de longue durée, mais dont l'application nécessite une compétence certaine
Réduire au minimum le fonctionnement des moteurs au ralenti ou à faible charge	À tous les cas.
Éviter le fonctionnement des équipements à des tensions supérieures à leur tension nominale	À tous les cas.
Le cas échéant, remplacer les moteurs par des moteurs à haut rendement énergétique (voir Section 3.6.1)	Au moment du remplacement

Tableau 4.3 : Techniques de correction du facteur de puissance électrique pour améliorer l'efficacité énergétique

22. Les MTD consistent à contrôler l'alimentation électrique pour vérifier la présence d'harmoniques et à appliquer des filtres le cas échéant (voir 3.5.1).

23. Les MTD consistent à optimiser l'efficacité de l'alimentation électrique en ayant recours à des techniques telles que celles décrites dans le Tableau 4.4, en fonction de leur applicabilité :

Technique	Applicabilité	Section du présent document
Vérifier que les câbles d'alimentation sont correctement dimensionnés en fonction de la demande	Lorsque l'équipement n'est pas utilisé, par ex. en cas d'implantation ou de réimplantation d'un équipement	3.5.3
Maintenir en ligne les transformateurs fonctionnant à une charge de plus de 40 à 50 % de la puissance nominale	• Pour les installations existantes : lorsque le facteur de charge actuel est inférieur à 40 % et qu'il existe plusieurs transformateurs. • En cas de remplacement, utiliser un transformateur à faible perte et avec une charge de 40 à 75 %	3.5.4
Utiliser des transformateurs à haut rendement / faibles pertes	En cas de remplacement, ou lorsqu'il existe une meilleure rentabilité sur le cycle de vie	3.5.4
Placer les équipements pour lesquels la demande en courant est élevée, aussi près que possible de la source d'alimentation (par ex. transformateur)	En cas d'implantation ou de réimplantation des équipements	3.5.4

Table 4.4 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les alimentations électriques

4.3.6 Sous-systèmes [3] entraînés par moteur électrique

L'utilisation des moteurs électriques est très répandue dans l'industrie. Le remplacement par des moteurs à haut rendement (EEM) et des variateurs de vitesse est une des mesures les plus simples pour améliorer l'efficacité énergétique. Cependant, il importe de prendre en considération l'ensemble du système dans lequel s'intègre le moteur, faute de quoi on s'expose aux risques suivants :

- perte des avantages potentiels liés à l'optimisation de l'utilisation et de la taille des systèmes, et à l'optimisation consécutive des exigences applicables à l'entraînement par moteur
- perte d'énergie si un entraînement à vitesse variable est utilisé dans un contexte qui ne s'y prête pas.

[3] Dans le présent document le terme « système » fait référence à un ensemble d'éléments ou de dispositifs connectés qui fonctionnent conjointement dans un but spécifique, par ex. ventilation, SAC. Voir les Sections 1.3.5 et 1.5.1 sur les limites des systèmes. Ces systèmes comportent généralement des sous-systèmes moteurs (ou des systèmes qui les composent).

Les principaux systèmes utilisant des moteurs électriques sont les suivants :

- les systèmes à air comprimé (SAC, voir Section 3.7),
- les systèmes de pompage (voir Section 3.8),
- les systèmes de chauffage, ventilation, climatisation (voir Section 3.9),
- les systèmes de refroidissement (voir le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriel)).

24. Les MTD consistent à optimiser les moteurs électriques en respectant l'ordre suivant (voir Section 3.6) :

1) optimiser l'ensemble du système dans lequel le ou les moteurs s'intègrent (par exemple système de refroidissement, voir Section 1.5.1)

2) optimiser ensuite le ou les moteurs du système en fonction des impératifs de charge nouvellement définis, par une ou plusieurs des techniques décrites dans le Tableau 4.5 en fonction de leur applicabilité

Mesures d'économies d'énergie pour les systèmes d'entraînement	Applicabilité	Section du présent document[1]
INSTALLATION ou MODERNISATION DU SYSTÈME		
Utilisation de moteurs à haut rendement (EEM)	Avantage en termes de coût sur la durée de vie	3.6.1
Dimensionnement correct des moteurs	Avantage en termes de coût sur la durée de vie	3.6.2
Installation d'entraînements à vitesse variable (EVV)	• L'utilisation des EVV se heurte parfois à des exigences de sécurité et de sûreté. • En fonction de la charge. Remarque : dans les systèmes à plusieurs machines équipées de systèmes de charge variable (par ex. SAC) il est optimal de n'utiliser qu'un seul moteur à vitesse variable	3.6.3
Installation de transmission/réducteurs à haut rendement	Avantage en termes de coût sur la durée de vie	3.6.4
Utilisation : • accouplement direct si possible • courroies synchrones ou courroies trapézoïdales dentées à la place des courroies trapézoïdales classiques • d'engrenages hélicoïdaux à la place des engrenages à vis sans fin	Tout	3.6.4
Réparation des moteurs à haut rendement (EEMR) ou remplacement avec un moteur à haut rendement (EEM)	Au moment de la réparation	3.6.5
Rebobinage : éviter de procéder à un rebobinage du moteur et procéder à son remplacement par un moteur EEM, ou faire appel à un réparateur agréé (EEMR) pour le rebobinage	Au moment de la réparation.	3.6.6

Contrôle de la qualité de puissance	Avantage en termes de coût sur la durée de vie	3.5
OPÉRATION et MAINTENANCE DU SYSTÈME		
Lubrification, ajustements, réglages	À tous les cas	2.9
Remarque [1] : les effets croisés, l'applicabilité et les aspects économiques sont présentés dans la Section 3.6.7.		

Tableau 4.5 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les moteurs électriques

3) une fois les systèmes consommateurs d'énergie optimisés, optimiser alors les moteurs restants (non optimisés) en fonction du Tableau 4.5 et de critères tels que ceux définis ci-après

   i. remplacer en priorité les moteurs tournant plus de 2 000 heures par an par des moteurs à hauts rendements ;
   ii. les moteurs électriques commandant une charge variable qui fonctionnent à moins de 50 % de leur capacité plus de 20 % de leur temps de fonctionnement et qui sont utilisés plus de 2 000 heures par an devraient être considérés pour être équipés d'un entraînement à vitesse variable.

4.3.7 Systèmes d'air comprimé (SAC)

L'air comprimé est couramment utilisé en tant que partie intégrante d'un procédé ou pour fournir de l'énergie mécanique. Il est couramment utilisé lorsqu'il existe un risque d'explosion, d'incendie, etc. Dans de nombreux cas, il fait intégralement partie du procédé (notamment pour fournir de l'azote de faible pureté afin d'obtenir une atmosphère inerte et pour les opérations de nettoyage, moulage ou mélangeage), et l'évaluation de son rendement mécanique est difficile. Dans certains cas, par exemple pour l'entraînement des outils pneumatiques, son rendement global est faible, et lorsqu'il n'existe aucune contrainte de santé ou de sécurité, il y a lieu d'envisager son remplacement par d'autres entraînements (voir Section 3.7).

25. Les MTD consistent à optimiser les systèmes d'air comprimé (SAC) en ayant recours à des techniques telles que celles décrites dans le Tableau 4.6, en fonction de leur applicabilité :

Technique	Applicabilité	Section du présent document
CONCEPTION, INSTALLATION ou MODERNISATION DU SYSTÈME		
Conception globale du système, incluant des systèmes multi-pressions	Nouvelle installation ou modernisation de grande ampleur	3.7.1
Modernisation du compresseur	Nouvelle installation ou modernisation de grande ampleur	3.7.1
Amélioration du refroidissement, séchage et filtration	À l'exclusion du remplacement plus fréquent des filtres (voir ci-dessous)	3.7.1
Réduire les pertes de charge par frottement (par exemple en augmentant la section des tuyaux)	Nouvelle installation ou modernisation de grande ampleur	3.7.1
Amélioration des entraînements (moteurs à haut rendement)	De très bons rapports coût efficacité dans les petits systèmes (<10 kW)	3.7.2, 3.7.3, 3.6.4
Amélioration des entraînements (régulation de la vitesse)	Applicable aux systèmes à charge variable. Dans les installations avec	3.7.2

	plusieurs machines, une seule machine doit être équipée d'un entraînement à vitesse variable.	
Utilisation de systèmes de régulation élaborés		3.7.4
Récupération de la chaleur perdue en vue de son utilisation dans d'autres fonctions	Remarque : le gain est en termes d'énergie, et non de consommation électrique, étant donné que l'électricité est convertie en chaleur utile.	3.7.5
Utilisation d'air froid externe comme air d'admission	S'il existe un accès	3.7.8
Stockage de l'air comprimé à proximité des utilisations à fortes fluctuations	À tous les cas	3.7.10
OPÉRATION ET MAINTENANCE DU SYSTÈME		
Optimisation de certains dispositifs d'utilisation finale	À tous les cas	3.7.1
Réduction des fuites d'air	À tous les cas. Gains potentiels les plus grands.	3.7.6
Remplacement plus fréquent des filtres	Révision dans tous les cas	3.7.7
Optimisation de la pression de service	À tous les cas	3.7.9

Tableau 4.6 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes d'air comprimé

4.3.8 Systèmes de pompage

Environ 30 à 50 % de l'énergie consommée par les systèmes de pompage pourraient être économisés grâce à des changements d'équipements ou des modifications du système de régulation (voir Section 3.8).

Il convient de remarquer pour les moteurs électriques servant à entraîner les pompes, les MTD sont énoncées au point MTD 24. Toutefois, l'utilisation d'entraînements à vitesse variable (EVV) (une technique clé) est également mentionnée dans le Tableau 4.7.

26. Les MTD consistent à optimiser les systèmes de pompage en ayant recours à des techniques telles que celles décrites dans le Tableau 4.7, en fonction de leur applicabilité (voir Section 3.8) :

Technique	Applicabilité	Section du présent document	Informations supplémentaires
CONCEPTION			
Lors du choix d'une pompe, ne pas la surdimensionner et remplacer les pompes surdimensionnées	Pour les nouvelles pompes : à tous les cas Pour les pompes existantes : rapport coûts-avantages sur la durée de vie	3.8.1 3.8.2	À elle seule, la plus grande source de gaspillage d'énergie
Choisir une pompe en adéquation avec un moteur correct pour le service requis	Pour les nouvelles pompes : à tous les cas Pour les pompes existantes : rapport coûts-avantages sur la durée de vie	3.8.2 3.8.6	
Conception du système de canalisation (voir Système de distribution		3.8.3	

ci-dessous)			
CONTRÔLE et MAINTENANCE			
Système de contrôle et de régulation	À tous les cas	3.8.5	
Arrêter les pompes inutiles	À tous les cas	3.8.5	
Utiliser des entraînements à vitesse variable (EVV) pour les moteurs électriques	Rapport coûts-avantages sur la durée de vie. Non applicable avec des flux constants	3.8.5	Voir MTD 24, Section 4.3.6
Installer plusieurs pompes en parallèle (réduction étagée)	Si la charge de pompage est inférieure à la moitié de la capacité unitaire maximale	3.8.5	
Maintenance régulière. En cas de maintenance non planifiée excessive, vérifier la présence éventuelle : • De phénomènes de cavitation • D'usure excessive des pompes, • D'inadéquation des pompes à l'usage qui en est fait	À tous les cas. Réparer ou remplacer selon le cas	3.8.4	
SYSTÈME DE DISTRIBUTION			
Éviter d'employer un trop grand nombre de vannes et de coudes pour faciliter l'exploitation et la maintenance	À tous les cas : au stade de la conception et de l'installation (y compris de modifications). L'avis d'un conseiller technique qualifié est parfois requis.	3.8.3	
éviter les coudes (en particulier les changements de direction intempestifs) dans le réseau de canalisation	À tous les cas : au stade de la conception et de l'installation (y compris de modifications). L'avis d'un conseiller technique qualifié est parfois requis.	3.8.3	
vérifier et augmenter le cas échéant la section des tuyaux.	À tous les cas : au stade de la conception et de l'installation (y compris de modifications). L'avis d'un conseiller technique qualifié est parfois requis.	3.8.3	

Tableau 4.7 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes de pompage

Remarque : La régulation d'une pompe au moyen d'une vanne engendre un gaspillage d'énergie moins grand que l'absence de régulation ou la régulation par bypass. Toutefois ces trois modes de régulations sont source de gaspillage et il y a lieu d'envisager d'en changer en fonction de la taille de la pompe et de sa fréquence d'utilisation.

4.3.9 Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)

Un système CVC type comprend les équipements qui assurent en partie ou en totalité les fonctions suivantes :

- chauffage (chaudières, voir Section 3.2 ; pompes à chaleur, voir Section 3.3.2, etc.),
- refroidissement (voir Section 3.3),

- pompes (voir Section 3.8),
- échangeurs de chaleur (voir Section 3.31) qui transfèrent ou absorbent de la chaleur provenant d'un espace ou d'un procédé,
- chauffage ou refroidissement des locaux (Section 3.9.1)
- ventilateurs qui extraient ou apportent de l'air par l'intermédiaire de gaines, à destination ou en provenance des échangeurs de chaleur et /ou de l'air extérieur (voir Section 3.9.2)

Des études ont montré qu'environ 60 % de l'énergie d'un système CVC est consommée par le refroidisseur/la pompe à chaleur tandis que les 40 % restants sont consommés par les machines périphériques. En Europe, l'utilisation de la climatisation ne cesse d'augmenter, en particulier dans le Sud.

Un système de ventilation est indispensable au bon fonctionnement de nombreuses installations industrielles. Il assure de nombreuses fonctions, notamment :

- la protection du personnel contre les émissions de polluants et de chaleur à l'intérieur des locaux,
- la protection de la qualité des produits grâce à une atmosphère de travail propre.

Des considérations de santé, sécurité ou relatives au procédé dictent les besoins en ventilation (voir Section 3.9).

27. Les MTD consistent à optimiser les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation en ayant recours à des techniques appropriées, notamment :

- pour la ventilation, le chauffage et la climatisation des locaux, les techniques du Tableau 4.8 en fonction de leur applicabilité ;
- pour le chauffage, voir les Sections 3.2 et 3.3.1, et les MTD 18 et 19
- pour le pompage, voir la Section 3.8 et les MTD 26
- pour le refroidissement, la réfrigération et les échangeurs de chaleur, voir le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriels), ainsi que la Section 3.3 (du présent document) et les MTD 19

Mesures d'économies d'énergie	Applicabilité	Section du présent document
CONCEPTION et CONTRÔLE		
Conception globale du système. Identifier et équiper les zones séparément pour : • la ventilation générale • la ventilation spécifique • la ventilation des procédés	Nouvelle installation ou modernisation de grande ampleur. Considérer lors de la modernisation les coûts-avantages sur la durée de vie.	3.9.1 3.9.2.1
Optimiser le nombre, la forme et la taille des admissions	Nouvelle installation ou modernisation	3.9.2.1
Utiliser des ventilateurs : • à haut rendement • conçus pour fonctionner à son régime optimal	Bon rapport coût-efficacité dans tous les cas	3.9.2.1 3.9.2.2
Envisager une ventilation à double flux pour la gestion du débit d'air	Nouvelle installation ou modernisation de grande ampleur	3.9.2.1
Conception du réseau aéraulique : • gaines de taille suffisante • gaines circulaires • « tracé » le plus court possible et éviter les obstacles (coudes,	Nouvelle installation ou modernisation de grande ampleur	3.9.2.1

rétrécissements, etc.)		
Optimiser les moteurs électriques, envisager d'installer un entraînement à vitesse variable.	À tous les cas. Modernisation de bon rapport coût-efficacité	3.9.2.1, 3.9.2.2, 3.6, 3.6.3, 3.6.7 et MTD 24
Utiliser des systèmes de régulation automatique Intégration à des systèmes de gestion technique centralisée	Toutes les installations nouvelles et modernisations de grande ampleur Bon rapport coût-efficacité et modernisation facile dans tous les cas	3.9.2.1 3.9.2.2
Intégration des filtres à air au réseau aéraulique et récupération de la chaleur émanant de l'air échappement (échangeurs de chaleur),	Nouvelle installation ou modernisation de grande ampleur Considérer lors de la modernisation les coûts-avantages sur la durée de vie. Points à prendre en compte : rendement thermique, pertes de charges, et nécessité d'un nettoyage régulier	3.9.2.1 3.9.2.2
Réduction des besoins en chauffage/refroidissement par : • isolation des bâtiments, • pose de vitrage efficace, • réduction des infiltrations d'air, • fermeture automatique des portes, • déstratification, • baisse des réglages de la température pendant les périodes de non production (régulation programmable) • baisse /augmentation des points de consigne pour le chauffage/la climatisation	À envisager dans tous les cas et à mettre en œuvre en fonction des coûts et des avantages.	3.9.1
Amélioration de l'efficacité des systèmes de chauffage par : • récupération ou utilisation de la chaleur perdue (voir Section 3.3), • pompes à chaleur, • système de chauffage radiatif et local couplés à une réduction des points de consigne de la température dans les zones des bâtiments non occupées.	À envisager dans tous les cas et à mettre en œuvre en fonction des coûts et des avantages.	3.9.1
Améliorer l'efficacité des systèmes de refroidissement par l'emploi du free cooling	Applicable dans des circonstances spécifiques	3.9.3
MAINTENANCE		
Arrêter ou réduire la ventilation dès que possible	À tous les cas	3.9.2.2
S'assurer de l'étanchéité du système, vérifier les raccords	À tous les cas	3.9.2.2
Vérifier que le système est équilibré	À tous les cas	3.9.2.2
Gestion du débit d'air : optimisation	À tous les cas	3.9.2.2
Optimiser la filtration de l'air : • efficacité du recyclage • pertes de charge • nettoyage/remplacement régulier des filtres • nettoyage régulier du système	À tous les cas	3.9.2.2

Tableau 4.8 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation

4.3.10 Éclairage

La santé et la sécurité sur les lieux de travail sont les principaux critères régissant les caractéristiques exigées des systèmes d'éclairage. Il est possible d'optimiser la consommation d'énergie des systèmes d'éclairage en fonction des impératifs d'utilisation spécifiques, voir Section 3.10

28. Les MTD consistent à optimiser les systèmes d'éclairage artificiel en ayant recours à des techniques telles que celles décrites dans le Tableau 4.9, en fonction de leur applicabilité (voir Section 3.10) :

Technique	Applicabilité
ANALYSE et CONCEPTION DE L'ÉCLAIRAGE SELON LES BESOINS	
Identifier les besoins d'éclairage en termes d'intensité et de spectre requis pour la tâche prévue	À tous les cas
Planifier l'espace et les activités afin d'optimiser l'utilisation de la lumière naturelle	À envisager dans tous cas si cela est faisable par des réaménagements opérationnels ou de maintenance normaux. Obligatoire en cas de modifications structurelles, par ex. construction d'un atelier ; Nouvelles installations ou modernisation des installations
Choisir des modèles d'appareils et de lampes en fonction des impératifs propres à l'utilisation prévue	Coûts-avantages sur la durée de vie
FONCTIONNEMENT, CONTRÔLE et MAINTENANCE	
Utiliser des systèmes de contrôle de gestion de l'éclairage notamment des minuteries, détecteurs de présence, etc.	À tous les cas
Former les occupants des immeubles à utiliser les éclairages de la manière la plus efficace	À tous les cas

Tableau 4.9 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les systèmes d'éclairage

4.3.11 Procédés de séchage, séparation et concentration

La séparation consiste à extraire (en principe) un solide d'un liquide en une ou plusieurs étapes. L'optimisation des étapes du procédé qui sont nécessaires pour obtenir le produit requis permet de réaliser d'importantes économies d'énergie. L'optimisation de l'efficacité énergétique se fait quant à elle en utilisant plusieurs techniques en associant (voir Section 3.11).

29. Les MTD consistent à optimiser les procédés de séchage, séparation et concentration en ayant recours à des techniques telles que celles décrites dans le Tableau 4.10, en fonction de leur applicabilité et à rechercher les possibilités d'utilisation de la séparation mécanique, en association avec les procédés thermiques.

Technique	Applicabilité	Informations supplémentaires	Section du présent document
CONCEPTION			
Choix de la technologie de séparation optimale ou d'une combinaison de techniques (ci-dessous) en adéquation avec les équipements du procédé	À tous les cas.		3.11.1
FONCTIONNEMENT			
Utilisation du surplus de chaleur provenant d'autres procédés	En fonction de la disponibilité d'un surplus de chaleur dans l'installation (ou émanant d'une tierce partie)	Le séchage est un bon débouché pour l'utilisation du surplus de chaleur	3.11.1
Utilisation d'une	À envisager dans tous les cas	Avantages possibles au	3.11.1

combinaison de techniques		plan de la production, par ex. amélioration de la qualité des produits, augmentation de la productivité	
Procédés mécaniques, par ex. filtration, filtration sur membrane	En fonction du procédé. À envisager en association avec d'autres techniques pour obtenir un degré élevé de siccité avec la consommation d'énergie la plus faible	La consommation d'énergie peut être réduite de plusieurs ordres de grandeur mais ne permet pas d'obtenir un niveau (%) de siccité élevé	3.11.2
Procédés thermiques, par ex. • sécheurs à chauffage direct • sécheurs à chauffage indirect • sécheurs à effet multiple	Utilisation très fréquente mais il devrait être possible d'en améliorer le rendement en étudiant les autres options présentées dans ce tableau	Les sécheurs à convection (chauffage direct) peuvent être l'option ayant le plus faible rendement énergétique	3.11.3 3.11.3.1 3.11.3.2 3.11.3.3 3.11.3.6
Séchage direct	Voir techniques thermiques et radiantes, ci-dessus, et vapeur surchauffée	Les sécheurs à convection (chauffage direct) peuvent être l'option ayant le plus faible rendement énergétique	3.11.3.2
Vapeur surchauffée	Tous les sécheurs à chauffage direct peuvent être modernisés et utiliser de la valeur surchauffée. Coût élevé : nécessité d'une analyse des coûts-avantages sur la durée de vie. Risque de détérioration des produits thermosensibles en raison de température élevée	Possibilité de récupération de la chaleur à partir de ce procédé	3.11.3.4
Récupération de chaleur (y compris recompression mécanique de vapeur et pompes à chaleur)	À envisager pour la presque totalité des sécheurs convectifs à air chaud continu.		3.11.1 3.11.3.5 3.11.3.6
Optimisation de l'isolation du système de séchage	À envisager pour tous les systèmes. Modernisation des installations aisée.		3.11.3.7
Procédés radiatifs, par ex. • IR (infrarouge) • Hautes fréquences (HF) • Micro-ondes (MW)	Modernisation des installations possible Application directe d'énergie au composant à sécher. Ils sont compacts et réduisent les besoins en extraction d'air. Les IR sont limités par les dimensions des substrats. Coût élevé : nécessité d'une analyse des coûts-avantages sur la durée de vie	Meilleure efficacité de chauffage. Permet de doper la productivité en association avec la convection ou la conduction	3.11.4
CONTRÔLE			
Automatisation pour les procédés de séchage thermique	À tous les cas	Les économies réalisées sont comprises entre 5 et 10 % par comparaison avec à une régulation traditionnelle empirique	3.11.5

Tableau 4.10 : Techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les procédés de séchage, séparation et concentration

5 TECHNIQUES ÉMERGENTES POUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

5.1 Combustion sans flamme (oxydation sans flamme)

Description
Les brûleurs récupératifs et régénératifs sont utilisés dans un nouveau mode de combustion à température de flamme homogène (technologie de combustion avec de l'air à haute température (HiTAC) ou combustion sans flamme), sans les « points chauds » de température d'une combustion classique, dans une zone de combustion substantiellement élargie.

La combustion sans flamme correspond à un mode de combustion où les techniques de combustion étagée et de recirculation interne dans la chambre thermique ont été poussées à l'extrême.

La figure 5.1 illustre le principe de fonctionnement des brûleurs régénératifs.

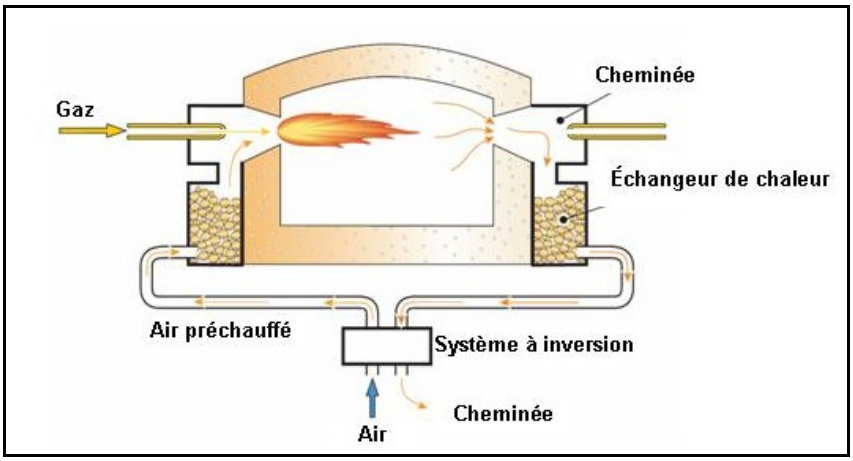


Figure 5.1. : Principe de fonctionnement des brûleurs régénératifs
[277, ADEME]

Il existe deux types de brûleurs HiTAC : les brûleurs à une flamme et les brûleurs à deux flammes. Un brûleur HiTAC à une flamme est caractérisé par une seule flamme créée par un injecteur de combustible entouré d'entrées d'air et de sorties de gaz de combustion. La flamme unique se développe le long de l'axe de l'injecteur de combustible pendant les périodes de refroidissement et de chauffage. Le combustible est alimenté en continu par le même injecteur et de cette manière une seule flamme peut être formée avec une position permanente. La position de la flamme reste presque inchangée entre les périodes de chauffage et de refroidissement, car les régénérateurs sont situés autour de l'injecteur de combustible.

Dans un brûleur HiTAC à deux flammes, il existe deux brûleurs régénératifs distincts à cycle élevé. Les deux brûleurs se trouvent dans les parois du four et fonctionnent par paires. Un jeu de vannes modifie la direction de l'air et des gaz de combustion en fonction du temps de commutation requis. Normalement, plusieurs paires de brûleurs

fonctionnent ensemble. Dans ce type de combustion HiTAC, la flamme est transférée d'un brûleur à l'autre en fonction d'un temps de commutation entre les périodes de chauffage et de refroidissement du régénérateur.

L'air préchauffé par les produits de combustion (>1 000 ºC) alimente le four (Figure 5.1). Dans les systèmes classiques, un tel préchauffage de l'air conduit à des températures locales très élevées dans la flamme, et par conséquent à des niveaux d'émission de NO_x élevés. Dans les systèmes à oxydation sans flamme, au contraire, l'entrée d'air et les entrées d'alimentation en gaz sont réalisées séparément (combustion étagée à l'extrême) à des vitesses d'injection élevées. Les géométries du brûleur et de la chambre de combustion, ainsi que la vitesse élevée des gaz en circulation créent la recirculation des produits de combustion vers le brûleur. Il s'ensuit une diminution de la concentration locale en O_2 et une dilution thermique de la flamme (deux sources de formation de NO_x).

La température élevée de l'air (>1 000 °C) préchauffé par le système régénératif récupératif de chaleur initie l'ignition et la pérennité de ce mode de combustion.

C'est pourquoi, la combustion est répartie sur l'ensemble du volume de la chambre. La flamme est invisible à l'œil nu. L'homogénéité relative de la température et de la composition à l'intérieur de la chambre est l'une des principales caractéristiques de ce procédé.

Le principe d'une oxydation sans flamme peut également être mis en œuvre avec une combustion avec de l'air non préchauffé, mais à une température de procédé élevée (800 °C). Dans ce cas, le procédé doit être initié.

Avantages obtenus pour l'environnement

Selon des essais, le brûleur HiTAC a atteint une efficacité de 35 % supérieure à celle d'un brûleur à injection classique. Outre l'efficacité plus élevée, le grand volume de flamme d'un brûleur HiTAC s'est traduit par une augmentation du coefficient de transfert de chaleur. Le combustible utilisé pour l'essai était du GPL (propane). Le bilan énergétique à la fois pour le brûleur HiTAC et le brûleur conventionnel est représenté sur la Figure 5.2.

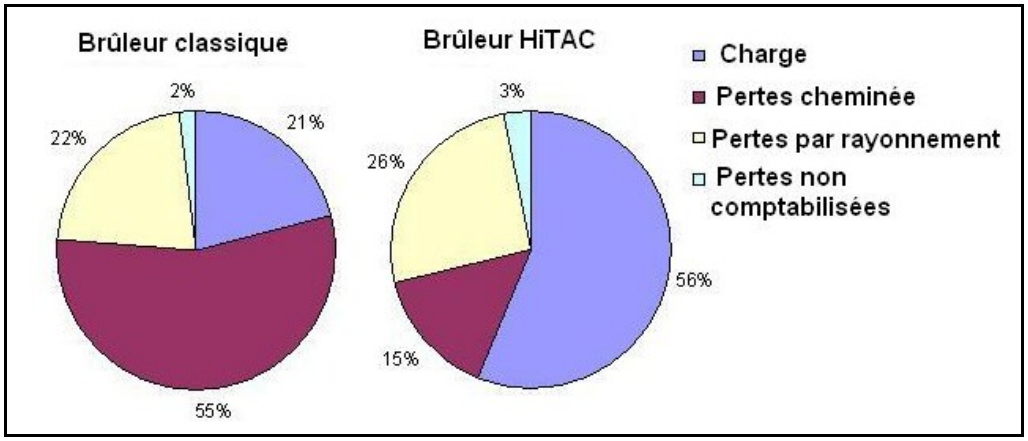


Figure 5.2 : Puissance calorifique nette obtenue lors des essais d'un brûleur classique et d'un brûleur HiTAC
[17, Åsbland, 2005]

La combustion sans flamme est une technique qui permet d'obtenir une importante réduction des émissions de NO_x grâce à une forte recirculation des produits de la combustion (<200 mg/Nm^3 à 3 % O_2). Cette technique évite les pics de température, comme représenté sur la Figure 5.3. Sur cette figure, on peut voir une comparaison entre les différents types de combustion en fonction de la température de combustion et de la concentration en O_2.

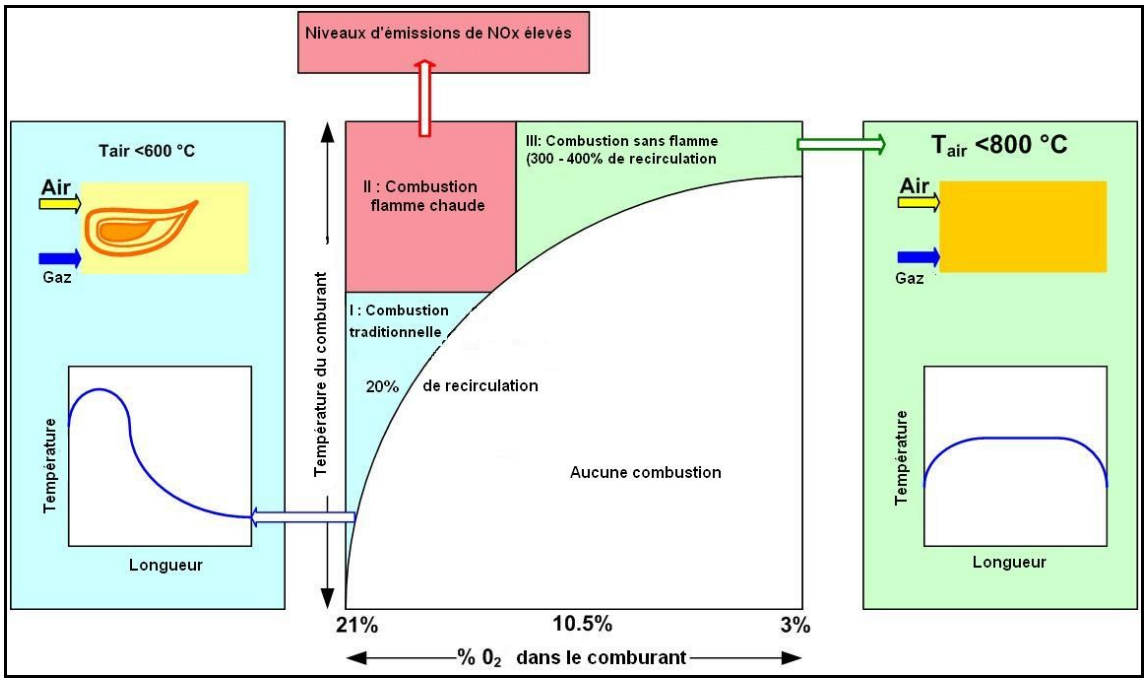


Figure 5.3 : Conditions de la combustion sans flamme

Dans le mode d'oxydation sans flamme, en raison de la réduction des pics de température, le niveau de température moyen au niveau du four peut être augmenté, sans surchauffe locale à proximité des brûleurs (avec un impact moyen sur les réfractaires). Le transfert de chaleur vers le produit peut être considérablement augmenté, tandis que le bruit est fortement réduit. Ces conditions conduisent à :

- des économies d'énergie comprises entre 9 et 40 %
- une réduction des émissions de NO_x comprise entre 6 et 80 %.

Effets croisés
Aucune donnée communiquée.

Données opérationnelles
Un four HiTAC permet d'obtenir :

- une efficacité élevée en termes d'utilisation de l'énergie, ou une réduction des émissions de CO_2 ;
- un profil de température plus uniforme ;
- un faible taux d'émissions de NOx et de CO ;
- une diminution du bruit de combustion ;
- il n'est pas nécessaire d'avoir des dispositifs supplémentaires d'économie d'énergie ;

- une diminution de la taille des tuyaux d'évacuation des gaz de combustion ;
- une répartition uniforme de la température ;
- une amélioration du transfert de chaleur ;
- une augmentation de la productivité et de la qualité du produit ;
- un allongement de la durée de vie du four et des tubes.

Dans la technologie HiTAC, l'air de combustion est préchauffé à une température très élevée avant d'être injecté à grande vitesse dans les fours. Dans le mode de combustion sans flamme, le combustible peut brûler complètement à des niveaux d'oxygène très bas. Ce procédé allonge la flamme, ralentit les vitesses de combustion, et maintient les températures de combustion plus faibles que celles des fours de combustion classiques à température élevée, ce qui se traduit par une réduction des émissions de NO_x ainsi que par une répartition plus uniforme de la température de flamme. La flamme devient très nettement vert pâle au cours de ce procédé.

Cette technique de combustion utilise également le concept d'une séparation entre l'injection de combustible et l'injection d'air chaud dans le four. Les performances du four s'en trouvent améliorées et les économies de combustibles sont plus élevées.

En ce qui concerne l'application industrielle de la combustion HiTAC, les injecteurs de combustible et les injecteurs d'air de combustion sont disposés sur le brûleur à une certaine distance les uns des autres. Le combustible et l'air à température élevée sont injectés à grande vitesse, directement dans le four. De ce fait, le gaz dans la zone à proximité du brûleur est totalement mélangé et sa pression partielle d'oxygène est réduite. La stabilisation de la combustion du combustible qui est injecté directement dans cette zone avec de l'oxygène à faible pression partielle est possible si la température de l'air préchauffé dépasse la température d'auto-inflammation du combustible.

Dans le four industriel, l'air de combustion peut atteindre une température de 800 – 1 350 °C grâce à un échangeur de chaleur à performance élevée. Par exemple, un échangeur de chaleur régénératif moderne commuté à une fréquence élevée peut récupérer une quantité égale à 90 % de la chaleur rejetée. Ainsi, une économie d'énergie importante est obtenue.

Applicabilité

Les fours de chauffage, dans lesquels des brûleurs régénératifs utilisant une technologie de combustion sans flamme pourraient être appliqués, sont très répandus dans plusieurs secteurs à travers l'Europe ; ces secteurs sont notamment la sidérurgie, l'industrie des briques et des céramiques, des métaux non ferreux, les fonderies et au moment de la rédaction du présent document vraisemblablement dans quelques applications dans les fours verriers. Par exemple, 5,7 % de l'énergie primaire requise dans l'UE est utilisée dans l'industrie sidérurgique. L'énergie constitue également une proportion élevée des coûts de production de ces industries.

Cette technique n'est pas toujours applicable aux lignes de procédé existantes, parce que les fours doivent être conçus de manière à permettre le montage des brûleurs. Les brûleurs HiTAC ont également des demandes très élevées concernant la pureté de l'atmosphère : si un gaz du procédé est utilisé, il y a trop de poussière dans le four pour utiliser des brûleurs HiTAC.

Aspects économiques

Un inconvénient de cette technique est le coût d'investissement des brûleurs. Toutefois, les retours sur investissement sont souvent inférieurs à 3 à 5 ans. C'est pourquoi, l'augmentation de la productivité dans le four et la réduction des émissions d'oxydes d'azote sont des facteurs importants à inclure dans l'analyse coût-avantage.

Agents moteurs pour la mise en œuvre
L'augmentation de la productivité dans le four et la réduction des émissions d'oxydes d'azote sont des facteurs importants.

Exemples
L'aciérie SSAB Tunnplåt AB à Borlänge, Suède a installé une paire de brûleurs régénératifs utilisant la technologie HiTAC dans un four à longerons mobiles. Ce four, dont la capacité totale est de 300 tonnes/h, sert à préchauffer les brames d'acier. Le combustible alimentant les brûleurs est du fioul lourd. L'installation comporte deux brûleurs, qui en mode régénératif brûlent chacun selon une séquence d'intervalles de 60 secondes (transition entre la combustion du combustible et l'aspiration des gaz brûlés chaque minute).

Les brûleurs HiTAC sont installés dans la zone de préchauffage du four, là où aucun brûleur n'était précédemment installé. Après la zone de préchauffage, on trouve une zone de chauffage (zone 2). La capacité de cette nouvelle installation est d'environ 10 % de la capacité de la zone 2. Chaque brûleur HiTAC a une capacité d'approximativement 2 MW. Le nombre total de brûleurs dans le four est de 119.

Cet essai de longue durée d'une paire de brûleurs régénératifs dans un four chauffé au fioul a montré une très bonne fiabilité mais aussi que la maintenance nécessaire sur l'installation était faible.

Une comparaison avec un système à brûleur récupératif ordinaire a montré approximativement 12 % d'économie de combustible en raison du taux de récupération de chaleur plus élevé. La paire de brûleurs régénératifs a été dimensionnée afin d'augmenter la productivité du four de 2 %. Les mesures de la teneur en NO_x des gaz de combustion au voisinage des brûleurs HiTAC ont également montré que la paire de brûleurs HiTAC n'apportait aucune contribution supplémentaire à la quantité totale en concentration de NO_x d'approximativement 150 ppm (teneur O_2 4 %).

Références bibliographiques
[17, Åsbland, 2005], [26, Neisecke, 2003], [277, ADEME].

5.2 Stockage d'énergie par air comprimé

Description
Le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) est une technique complexe de stockage de l'énergie dans laquelle l'air est comprimé en utilisant de l'énergie (habituellement de l'électivité provenant du réseau électrique hors période de pointe) et restitue cette énergie ultérieurement pour générer un surplus d'énergie comme nécessaire. L'air comprimé est souvent stocké dans des mines souterraines appropriées ou dans des cavernes creusées dans le halite.

Avantages obtenus pour l'environnement

En fonction de l'application. Le stockage d'énergie par air comprimé peut faciliter l'injection dans le réseau électrique de grosses quantités d'énergie éolienne ou peut permettre de réduire le nombre de mises en marche et de mises à l'arrêt des centrales électriques.

Effets croisés
Si la caverne utilisée pour stocker l'air doit être creusée, il peut y avoir des inconvénients pour l'environnement.

Données opérationnelles
Le surplus d'électricité provenant du réseau dans les usines citées à titre d'exemple ci-dessous sert à alimenter un moteur électrique afin d'entraîner un compresseur. L'air comprimé est refroidi et utilisé pour remplir une grande caverne, puis chauffé avant d'alimenter une turbine à gaz modifiée. L'énergie issue de l'air comprimé, conjointement à celle fournie par les procédés de combustion entraîne l'étage de la turbine : elle est donc convertie par un générateur électrique et réinjectée dans le réseau.

Applicabilité
Il existe deux usines en fonctionnement. Le stockage d'énergie par air comprimé est davantage une technique de management énergétique qu'une technique d'efficacité énergétique, car il est utilisé pour décaler les périodes de génération et de consommation d'énergie électrique. Toutefois, une partie de l'énergie est perdue car l'efficacité du stockage est inférieure à 80 %

Cette technique peut être appropriée lorsqu'il est possible d'accéder à un stockage d'air comprimé approprié et à un surplus d'énergie hors période de pointe pour générer de l'air comprimé.

Aspects économiques
Les trois scénarios de mise en œuvre possibles économiquement viables sont :

- dispositif central (300 MW, meilleures perspectives au plan commercial)
- dispositif décentralisé (50 MW)
- île isolée (30 MW).

Agents moteurs pour la mise en œuvre
Besoins importants en stockage d'énergie afin de pouvoir la restituer lorsque nécessaire.

Usines à titre d'exemple
Une unité de 290 MW à Hundorf (Allemagne) en 1978, et une unité de 110 MW à McIntosh, Alabama (États-Unis) en 1991. Il est prévu de construire une troisième usine commerciale CAES (2 700 MW) à Norton, Ohio (États-Unis).

Références bibliographiques
[281, EWEC, 2004] [282, Association]

6 CONCLUSIONS

6.1 Chronologie des travaux

Le coup d'envoi des travaux pour l'élaboration de ce document de référence a été donné lors d'une réunion du groupe de travail technique (TWG) en mai 2005 et le premier projet de document a été soumis pour consultation en avril 2006. Le second projet de document, qui comportait des propositions concernant les meilleures techniques disponibles (MTD), a été soumis pour consultation en juillet 2007. La dernière réunion du TWG s'est tenue en novembre 2007.

6.2 Sources de l'information

L'énergie est utilisée de façon variée dans la société moderne et ses industries. L'importance de l'efficacité énergétique a été reconnue lorsque les premiers moteurs à vapeur ont été mis au point pendant la révolution industrielle. L'étude de l'énergie et de ses transformations s'appelle la thermodynamique, et les lois fondamentales de la thermodynamique qui sont exposées brièvement dans le présent document remontent à cette époque. Plus récemment, les impacts du changement climatique dus à la combustion (la voie principale globalement pour fournir divers types d'énergie) et le coût et la sécurité de l'approvisionnement énergétique sont devenus des questions de première importance, suscitant beaucoup d'intérêt et un grand volume de publications. La plupart des données utilisées, qui proviennent des échanges d'informations, ont été extraites des études datant de 2000 à 2007, mais certaines données provenant des années 1990 sont également incluses, car les principaux concepts clés n'ont pas évolué.

La multitude de données disponibles sur l'efficacité énergétique concerne un large éventail de sujets, qui ne sont pas tous en rapport avec l'IPPC. Il est également habituel de constater que le champ d'application des BREF horizontaux peut être très étendu, et ces deux éléments sont venus s'ajouter au défi que constitue la gestion des échanges d'informations. C'est pourquoi, lors de l'élaboration du présent document, on a choisi de traiter l'efficacité énergétique comme l'un des éléments clés de la directive IPPC, en fournissant des informations sur les meilleures techniques disponibles (MTD) pour appuyer la mise en œuvre de l'IPPC au niveau européen et au niveau des installations.

Les données couvrent un large éventail et sont ventilées par type d'information, principalement :

- données spécifiques provenant essentiellement des industries grandes consommatrices d'énergie (par exemple, industries du verre, des produits chimiques, métallurgie)
- données sur les technologies interdisciplinaires (par exemple, combustion, vapeur, entraînements des moteurs, pompes, air comprimé, etc.)
- données générales produites sur l'efficacité énergétique pour toutes les industries et les activités – et non pas seulement celles ayant la taille IPPC.

Les sources d'informations utilisées ont été elles aussi très étendues, à savoir projets financés par l'UE, programmes d'efficacité énergétique dans les États membres et dans d'autres pays (principalement les États-Unis et le Japon), publications et revues des industries et autres manuels. Pour faire en sorte qu'un large public se sente concerné par l'efficacité énergétique,

bon nombre de ces documents donnent des exemples d'une ou (habituellement) de plusieurs techniques utilisées en combinaison par des installations ou des sociétés. En conséquence, le défi que constitue la présentation des données a pris une dimension nouvelle car il est alors devenu nécessaire d'identifier et de décrire chaque technique selon le modèle d'élaboration des BREFS (BREF Outline and Guide). Afin de faciliter la compréhension de ces techniques et de la manière dont elles peuvent être utilisées conjointement, bon nombre d'exemples sont présentés dans les annexes et font l'objet de références croisées.

Des guides de bonne pratique ou de meilleures techniques disponibles (MTD) pour l'efficacité énergétique ont été communiqués par les États membres suivants : Autriche, Allemagne, Pays-Bas et Royaume-Uni. Alors qu'ils présentaient un bon exposé général, des données plus détaillées ont été communiquées par des sources propres aux technologies ou à l'industrie : par exemple, la France a fourni plus de 100 documents portant sur des technologies individuelles, des problématiques et des exemples, et la Finlande a communiqué quant à elle 11 documents supplémentaires. L'Espagne a fourni un exposé des principes fondamentaux de la thermodynamique, inclus à titre d'annexe, pour faciliter la compréhension scientifique du présent document.

Les données provenant directement de l'industrie ont été communiquées par quelques unes des principales industries consommatrices d'énergie (industries chimiques et pétrochimiques, incinération des déchets, industrie sidérurgique, production d'électricité et industrie du verre), ainsi que par les fabricants de systèmes à air comprimé. Les données sur les systèmes utilisant de l'énergie, ainsi que des techniques et des exemples concernant les industries qui ne sont pas de grandes consommatrices d'énergie sont extraites de programmes financés par l'UE ou communiquées par des États Membres.

Les commentaires du groupe de travail technique (TWG) sur les deux projets de document ont constitué une source majeure de données, de même que les informations supplémentaires les accompagnant : approximativement 2300 commentaires au total. D'autres informations ont été recherchées et échangées afin de clarifier et de vérifier certaines techniques individuelles et certains commentaires. Parmi les nombreuses autres sources, l'encyclopédie en ligne Wikipedia a servi à clarifier certains termes mais les avis concernant son utilité ne font pas l'unanimité. Certains membres du groupe de travail technique (TWG) préfèrent avoir recours à des sources et des références traditionnelles qui ont été évalués par des pairs, tandis que d'autres membres l'ont acceptée pour sa facilité d'accès par comparaison avec les sources traditionnelles. Les définitions de l'encyclopédie Wikipedia n'ont pas été utilisées pour les domaines critiques, comme les conclusions sur les MTD.

Il n'a été fourni que peu d'informations sur les rendements énergétiques obtenus par les techniques individuelles et seulement des données limitées indicatives des économies d'énergie générales dans certaines techniques interdisciplinaires et dans certains exemples. Il n'a donc pas été possible de conclure sur des valeurs d'efficacité énergétique pour les techniques individuelles, bien que certaines valeurs indicatives aient été communiquées avec certaines des techniques des Chapitres 2 et 3, et dans les exemples des Annexes. Ces chiffres sont censés apporter une information utile sur l'amplitude des économies d'énergie possibles lorsque la sélection des techniques est réalisée au niveau d'un site.

Les informations proviennent également des visites de sites et de réunions bilatérales dans les États membres et avec les industries.

Une source de difficultés supplémentaires pour évaluer et utiliser les données a résidé dans le fait que bon nombre de documents (ou approches adoptées par des sources différentes) ont suivi des cheminements différents pour arriver au même but et que des techniques identiques ont souvent reçu des appellations sans rapport entre elles. En d'autres termes, il est possible que des données n'aient pas été trouvées dans les documents dans lesquels on s'attendait à les voir figurer ou n'aient pas été faciles à identifier dans les recherches électroniques ou manuelles. Les sources ne concernaient pas toujours directement des installations de type IPPC, et/ou les sujets se recoupaient. Par exemple, dans une installation, de nombreuses zones sont chauffées, ventilées et/ou refroidies. Dans la technologie du bâtiment, ce domaine est dénommé CVC (chauffage, ventilation et climatisation). Toutefois, la plupart des données semblaient concerner des bureaux et des bâtiments commerciaux, et il n'a pas été clairement établi si elles sont applicables à des situations industrielles, telles que la ventilation des fumées provenant des procédés industriels, ou s'il convient d'y ajouter des données supplémentaires.

6.3 Degré de consensus

Lors de la réunion finale du TWG en novembre 2007, un haut niveau de consensus a été atteint sur le format du document et sur les techniques à prendre en considération. Plus important encore, il y a eu un accord complet sur le fait que toutes les conclusions pouvaient être exprimées sous forme de MTD horizontales pour toutes les industries et les installations relevant du champ d'application de la directive IPPC. Aucun avis divergent n'a été enregistré.

Dans le présent document horizontal (couvrant largement différentes industries et applications), il n'a pas été possible d'identifier des données chiffrées sur l'efficacité énergétique pour chaque technique. Toutefois, il convient de noter deux points :

- une MTD clé a fait l'unanimité, à savoir que chaque installation devrait fixer ses propres marqueurs d'efficacité énergétique et mesurer ses propres performances par rapport auxdits marqueurs, en utilisant une sélection de techniques d'efficacité énergétique
- les techniques et les données d'efficacité énergétique clés pour la première série de BREF « verticaux » spécifiques à un procédé sont résumés dans le document [283, EIPPCB].

6.4 Lacunes et recouvrements des connaissances et recommandations concernant la collecte et la recherche d'information future

6.4.1 Lacunes et recouvrements des données

Données sur les techniques
On note un manque (ou un manque apparent) de données communiquées ou de clarté sur les questions suivantes :

- Prise en compte de l'efficacité énergétique lors de la conception (EED) : les données communiquées indiquent des gains d'efficacité énergétique émanant du recours à des spécialistes externes de l'efficacité énergétique ainsi que de l'identification (et du rejet) des appels d'offres et/ou des fabricants qui ne tirent pas partie de l'optimisation de

l'efficacité énergétique (par exemple, où le coût en capital initial le plus faible a été présenté plutôt que le coût en termes de durée de vie). Toutefois, les industries grandes consommatrices d'énergie disposent d'une bonne expertise en interne et ont trouvé que ces questions sont suffisamment bien traitées en interne ; aucune conclusion n'a été formulée concernant l'inclusion de ces techniques dans les MTD. D'autres informations détaillées concernant des exemples d'application de ces deux techniques de prise en compte de l'efficacité énergétique à la conception sont nécessaires.

- Contrôle efficace des procédés : les techniques spécifiques ainsi que les paramètres de contrôle doivent faire l'objet d'une étude pour les secteurs verticaux lors de la mise à jour des BREF.

- La surveillance et la mesure sont toutes deux vitales pour atteindre l'efficacité énergétique. Bien que les données reçues et utilisées dans la Section 2.10 soient utiles, elles ne reflètent pas complètement l'éventail des techniques pouvant être utilisées dans tous les secteurs. Cet état de fait peut traduire le manque d'attention accordé au sujet dans les documents sources. Il serait utile pour les BREF des secteurs verticaux de décrire des techniques appropriées, soit directement ou soit en référence au présent document. D'autres informations sur la surveillance et la mesure sont également nécessaires pour la révision du présent document.

- Combustion et vapeur : il existe un grand volume d'informations sur ces sujets. Ces derniers sont tous deux longuement traités dans le BREF LCP (Grandes installations de combustion), où il est stipulé que le travail d'échange d'informations sur les LCP a couvert tous les types et toutes les tailles de centrales électriques classiques (par exemple, chaudières de centrale, centrales de cogénération d'électricité et de chaleur, systèmes de chauffage urbain) utilisées pour la production de chaleur et de puissance mécanique, au-dessus et au-dessous du seuil IPPC de 50 MW pour les grandes installations de combustion. Toutefois, bon nombre de techniques supplémentaires absentes du BREF LCP ont été fournies au cours de l'échange d'informations sur l'efficacité énergétique. Il en est ressorti en conclusion que le présent document doit énumérer les techniques contenues dans le BREF LCP et y faire référence, mais aussi comporter les techniques supplémentaires absentes du BREF. Un complément d'informations est nécessaire pour :
    - les techniques sur la combustion et/ou les systèmes à vapeur qui ne sont pas actuellement utilisés dans les installations à grande échelle. Par exemple, bien que la combustion en lit fluidisé (FBC) soit décrite dans le BREF LCP, son utilisation est beaucoup plus répandue et il serait utile d'inclure dans le présent document un exposé général sur son applicabilité à d'autres secteurs et sur ses avantages et inconvénients. Voir également la combustion sans flamme à température élevée (Section 5.1).
    - vapeur : des données sont nécessaires afin d'identifier les cas où la vapeur constitue une MTD pour une utilisation dans le chauffage et dans les procédés.

- Récupération de chaleur : il manque des données pour permettre l'identification d'une MTD afin d'utiliser des échangeurs de chaleur et des pompes à chaleur.

- Chauffage, ventilation et climatisation (CVC) : la Section 3.9 est construite autour des données sur les systèmes de ventilation. Toutefois, alors qu'il est fait référence à d'autres composants pour les systèmes CVC (tels que les pompes ou les échangeurs de chaleur), aucune donnée n'est communiquée sur les CVC en tant que système cohérent (y compris

sur le site Internet de l'UE cité). Des données supplémentaires peuvent également être requises sur les techniques d'extraction industrielle émanant des procédés (analogues à celles contenues dans le BREF STM (Gestion des résidus et des stériles des activités minières) : ces données pourraient être rassemblées pour être utilisées dans le présent BREF horizontal ou dans les BREF des secteurs verticaux.

- Système de refroidissement : il était prévu de les traiter dans la section CVC. Toutefois, le refroidissement à grande échelle des zones permettant de stocker des matières premières et des produits (en particulier des produits alimentaires) périssables consomme une quantité importante d'énergie dans les secteurs industriels de l'UE, et d'autres informations sont nécessaires pour cette étude. Les données du programme environnemental de l'Organisation des Nations Unies (UNEP) sur les récents débats concernant le Protocole de Montréal sont arrivées trop tard pour être incluses dans le présent document. Il semble qu'une technique importante consiste à utiliser les bons réfrigérants (et par conséquent, les bons systèmes d'équipement) dans les refroidisseurs industriels. Les points importants semblent être les suivants :
  - les réfrigérants doivent non seulement avoir un potentiel d'appauvrissement de l'ozone égal à zéro, mais aussi un faible potentiel de réchauffement par les gaz à effet de serre et une plus faible demande énergétique en utilisation ;
  - il est nécessaire de disposer d'équipements et de techniques de manutention pour gérer le risque de rejets en cours de fonctionnement mais aussi en cas de remplacement ou de cessation d'utilisation.

Davantage d'informations sont requises.

- Systèmes de refroidissement : ce sujet est couvert dans le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriel). La principale conclusion sur les MTD concernant le refroidissement dans le BREF ICS consiste à utiliser le surplus de chaleur émanant d'une source pour satisfaire en totalité ou en partie les demandes de chaleur d'un autre système (qui peut faire partie du même procédé ou de la même installation, ou être externe à l'installation). Cette constatation ainsi que d'autres constatations de principe relevant des MTD du BREF ICS sont résumées dans le présent document pour faciliter la tâche aux utilisateurs.
- Facteurs de correction pour les alimentations électriques : deux sources indiquent 0,95 comme facteur de puissance à atteindre. Toutefois, pour certaines activités telles que les fours à arc, il est impossible au plan économique de réaliser une correction pour atteindre ce facteur. D'autres industries ne savent pas avec certitude quels sont les facteurs de puissance appropriés à leurs activités, aussi n'y a-t-il eu aucun consensus sur la valeur à atteindre, et sur le fait de savoir si cette valeur était spécifique à une industrie. D'autres données sont nécessaires à ce sujet. Lors de la mise à jour des BREF des secteurs verticaux, il serait souhaitable d'avoir levé les incertitudes concernant les facteurs appropriés spécifiques de chaque industrie.

- Systèmes à air comprimé (CAS) : on note un manque d'informations permettant de savoir à quel moment l'utilisation de l'air comprimé est une MTD. Il est évident que lorsqu'il est intégré à des activités d'un procédé majeur (par exemple, production d'azote de faible qualité en tant que gaz de procédé, soufflage du verre), il ne peut être facilement remplacé. Toutefois, pour certaines activités associées horizontales, notamment en tant que moyen de transport, dans les outils d'assemblage, etc., d'autres données sont nécessaires afin de formuler un avis sur l'opportunité d'utiliser un système à air

comprimé (CAS), comme MTD. Une analyse comparative des bonnes pratiques de l'efficacité énergétique a été fournie, mais elle est trop générale pour être utilisée avec les MTD. D'autres informations sont nécessaires pour en extraire des analyses comparatives par type de compresseur, etc.

- Technique de séchage et de séparation : ces deux techniques ont été regroupées ; en effet, lorsque ceci est réalisable techniquement, une conclusion fondamentale sur les MTD consiste à utiliser plus d'une étape au cours du séchage des produits, par exemple à utiliser une séparation mécanique suivie par une étape de séchage avec apport de chaleur. Toutefois, il existe encore des domaines et des techniques de séchage et de séparation qui ne sont pas décrits dans le présent document.

- Aucune donnée n'a été communiquée concernant :

  - les systèmes à vide,
  - l'isolation des bâtiments : aucune donnée fournie sous une forme facilement exploitable,
  - contrôle des pertes/gains de chaleur aux points d'entrée des bâtiments, tels que les portes et les fenêtres
  - systèmes de transport internes, tels que les convoyeurs, transport pneumatique des poudres, etc.

Recommandations
Les lacunes identifiées ci-dessus doivent être traitées avec d'autres informations lors de la révision du présent document ou d'autres documents horizontaux apparentés de la série des BREF (tels que le BREF ICS (Systèmes de refroidissement industriel) et le BREF CWW (Systèmes communs de traitement et de gestion des eaux et des gaz résiduels dans l'industrie chimique), etc.).

Données concernant les coûts
Comme dans bon nombre d'autres BREF, il manque des données concernant les coûts et les coûts-avantages pour la plupart des techniques. Il s'agit d'un sujet difficile à traiter dans un BREF horizontal, car la taille et les applications diffèrent d'une industrie à l'autre. Dans certains cas, ce sujet est abordé dans les exemples cités dans les annexes.

6.4.2 Données opérationnelles spécifiques

Lors de l'élaboration du présent document, on a cherché des données sur l'efficacité énergétique qui pourraient être utiles pour évaluer les diverses techniques décrites dans différents types d'installations. Certaines données indicatives sont incluses, en particulier dans le chapitre 3 et dans les exemples des annexes. Toutefois, il n'a pas été possible de fournir des données opérationnelles plus spécifiques, en raison du large éventail d'applications possibles dans les différentes installations et procédés couverts par un BREF horizontal (voir également, Section 6.4.3, ci-dessous).

Par ailleurs, il a souvent été difficile d'établir des données de coût, comme par exemple des fourchettes de coûts pour les équipements et les techniques.

Recommandations
Lors de la révision du présent document, il conviendra une fois encore de rechercher toutes les données génériques sur la consommation et/ou l'efficacité énergétique, notamment celles en provenance des fournisseurs d'équipements

Lors de la révision des BREF verticaux, il faudra accorder une attention spéciale à la mise à jour des données énergétiques spécifiques aux procédés (ou à leur mise à disposition lorsqu'il n'y en a pas actuellement) pour faciliter l'évaluation de l'efficacité énergétique de certains procédés spécifiques. Ces données devraient être fournies à titre de mesures déterminantes pour le secteur concerné (voir Section 1.4). Les données doivent également faire une distinction entre les installations nouvelles et les installations existantes, et le cas échéant, d'autres distinctions entre installations et/ou procédés, des distinctions régionales, etc.

Par ailleurs, des données génériques sur les coûts de l'application des technique décrites, notamment émanant des utilisateurs, des fabricants et des fournisseurs de techniques, d'équipements et d'installations doivent être recherchées en vue de la révision du présent document.

6.4.3 Thèmes suggérés pour la recherche et les travaux futurs

En règle générale, il existe un grand nombre de travaux de recherche en cours sur l'efficacité énergétique, et aucun nouveau domaine générique n'a été identifié pour la recherche future. La recherche sur les nouvelles technologies de procédé sera plus vraisemblablement conduite par secteur ou par produit que de manière générique. Toutefois, il est important de remarquer que la recherche dans certains domaines peut être envisagée comme conduisant à des évolutions qui améliorent l'efficacité énergétique. Ces évolutions peuvent avoir des avantages inhérents (comme une augmentation de rendement des produits et/ou de la qualité et/ou une réduction des émissions) par exemple :

- technologie de base des procédés (par exemple, catalyse, biotechnologie, biocatalyse) ;
- utilisation d'un chauffage radiatif de longueur d'onde spécifique plutôt qu'un chauffage par convection ou par conduction (par exemple micro-ondes pour initier des réactions, emploi des technologies de durcissement dans les systèmes de revêtement de préférence au séchage) ;
- utilisation de la récupération de chaleur dans les nouvelles applications (par exemple, récupération de chaleur dans les unités d'élevage intensif), utilisation de pompes à chaleur.
- intensification des procédés.

Il a été identifié pour les travaux futurs dans deux domaines un fort besoin de :

- davantage de données, notamment pour les domaines énoncés dans la Section 6.4.1, ci-dessus
- davantage de projets et de programmes de démonstration pour favoriser l'utilisation des techniques avancées existantes, lorsque :
  - les données font défaut, et/ou lorsque
  - ces techniques ne sont actuellement utilisées couramment que dans une industrie ou n'ont suscité qu'un intérêt limité.

Les raisons sous-jacentes au peu d'intérêt suscité par les techniques nouvelles pour un secteur sont le risque encouru par un exploitant par exemple lorsqu'il modifie les conditions d'un procédé continu, et le risque de perte de qualité du produit/de délai effectif de fabrication.

Un exemple spécifique est la combustion sans flamme à température élevée. Elle est appliquée commercialement au Japon dans l'industrie sidérurgique. Elle est également utilisée aux États-Unis et ailleurs pour la fabrication de l'acier, des briques et des céramiques, des métaux non ferreux, dans les fonderies, et potentiellement dans les petits fours de verrerie. Un projet pilote pour une application dans la fabrication de l'acier a été couronné de succès dans l'UE, mais il n'y a aucune mise en œuvre commerciale connue, bien que cette technique puisse permettre d'économiser environ 30 % de la consommation d'énergie dans les cas étudiés (voir Section 6.1).

La communauté européenne lance et soutient, par le biais de ses programmes de recherche et développement technologique (RTD), une série de projets concernant des technologies propres, des technologies émergentes de traitement et de recyclage des effluents et des stratégies de management. Potentiellement, ces projets devraient pouvoir fournir une contribution utile aux révisions futures des documents. Les lecteurs sont donc invités à informer l'EIPPCB de tous les résultats des recherches qui concernent le champ d'application du présent document (voir également la préface de ce document).

Les projets concernant l'efficacité énergétique actuellement financés par l'UE dans le cadre du programme CORDIS peuvent être consultés sur la base de données des projets à l'adresse suivante http:/cordis.europa.eu.

Ce programme évolue au fil du temps, et certains exemples actuels sont les suivants :

- protection contre l'écaillage (phénomène dit de rumpling ou accentuation de la rugosité interfaciale) :
  - développement de revêtements céramiques minces pour assurer une protection contre la température et les contrainres induites des surfaces métalliques des ailettes de turbine
- SRS NET et EEE
  - système de référence scientifique sur les nouvelles technologies énergétiques, l'efficacité énergétique côté utilisateur et recherche et développement technologique (RTD) en matière d'énergie
- ECOTARGET :
  - procédés novateurs en faveur de changements radicaux pour l'industrie de la pâte à papier européenne
- FENCO-ERA
  - initiative en faveur des technologies concernant l'énergie fossile afin d'obtenir des centrales électriques avec émission zéro

- divers systèmes d'évaluation des technologies énergétiques nouvelles et propres.

6.5 Révision de ce document

Les données relatives aux techniques pour l'efficacité énergétique sont en grande partie récentes (2000 à 2007), et il est peu probable qu'elles changent de manière significative dans

un futur proche. La structure du document a été considérablement modifiée dans le second projet, qui a réuni beaucoup d'informations supplémentaires et a permis de mettre en évidence de nouvelles lacunes dans ce document (voir 6.4.1, ci-dessus). Il serait très avantageux pour les industries européennes de pouvoir combler ces lacunes et une révision en la matière peut être envisagée pour 2013, avec des conclusions pour approximativement 2015.

RÉFÉRENCES

2 Valero-Capilla, A., Valero-Delgado A. (2005). "Fundamentals of energy thermodynamics".

3 FEAD and Industry, E. W. T. (2005). "Plug-ins to the Introduction to energy".

4 Cefic (2005). "How to define energy efficiency?"

5 Hardell, R. and Fors, J. (2005). "How should energy efficiency be defined?"

6 Cefic (2005). "Key Aspects of Energy Management".

7 Lytras, K., Caspar, C. (2005). "Energy Audit Models".

9 Bolder, T. (2003). "Dutch initial document on Generic Energy Efficiency Techniques".

10 Layer, G., Matula, F., Saller, A., Rahn, R. (1999). "Determination of energy indicators for plants, manufacturing methods and products (abridged version)".

11 Franco, N. D. (2005). "Energy models".

12 Pini, A. a. U., A. and Casula, A. and Tornatore, G. and Vecchi, S. (2005). "Energy saving evaluation using pinch analysis tool".

13 Dijkstra, A. "Definition of benchmarking".

16 CIPEC (2002). "Energy Efficiency Planning and Management Guide".

17 Åsbland, A. (2005). "High temperatur air combustion".

18 Åsbland, A. (2005). "Mechanical Vapour Recompression".

20 Åsbland, A. (2005). "Surplus heat recovery at board mill".

21 RVF, T. S. A. o. W. M. (2002). "Energy recovery by condensation and heat pumps at Waste-to-Energy to plants in Sweden".

26 Neisecke, P. (2003). "Masnahmen zur Verminderung des Energiverbrauchs bei ausgewählten Einzeltechniken".

28 Berger, H. (2005). "Energiefficiencte Technologien umd efficiensteigernde Massnahmen".

29 Maes, D., Vrancen, K. (2005). "Energy efficiency in steam systems".

31 Despretz, H., Mayer, B. "Auditor'Tools. SAVE-project AUDIT II".

32 ADENE (2005). "Steam production".

33 ADENE (2005). "Steam netwokrs".

34 ADENE (2005). "Heat recovery systems".

36 ADENE (2005). "Process control systems".

40 ADENE (2005). "Transport energy management".

48 Teodosi, A. (2005). "Operating procedure of heat exhcangers with flashed steam in an alumina refinery".

51 Pini, A., Casula, A., Tornatore, G., Vecchi, S. (2005). "Energy saving evaluation using pinch analysis tools".

55 Best practice programme (1998). "Monitoring and Targeting in large companies. Good Practice Guide 112. Best Practice Programme. SAVE".

56 Best practice programme (1996). "Monitoring and targeting in small and medium-sized companies. Good practice guide 125".

62 UK_House_of_Lords (2005). "Energy Efficiency, Volume I:".

63 UK_House_of_Lords (2005). "Energy Efficiency. Volume II: Evidence".

64 Linde, E. (2005). "Energy efficienct stationary reciprocating engine solutions".

65 Nuutila, M. (2005). "Energy Efficiency in Energy Production".

67 Marttila, M. (2005). "Pinch Technology for Energy Analysis".

89 European Commission (2004). "EMAS Energy Efficiency Toolkit for Small and Mmedium sizwd Enterprises".

91 CEFIC (2005). "Guidelines for Energy Efficiency in Combustion installation".

92 Motiva Oy (2005). "Benchmarking and Energy Mangement Schemes in SMEs, Draft".

93 Tolonen, R. (2005). "Improving the eco-efficiency in the ditrsict heating and district cooling in Helsinki".

94 ADEME (2005). "Energy efficiency in transport".

95 Savolainen, A. (2005). "Electric motors and drives".

96 Honskus, P. (2006). "An approach to ENE BREF content".

97 Kreith, F. a. R. E. W. (1997). "CRC Handbook of Energy efficiency", 0-8493-2514-5.

98 Sitny, P., Dobes, V. (2006). "Monitoring and targeting".

107 Good Practice Guide (2004). "A strategic approach to energy and environmental mangement".

108 Intelligent Energy - Europe (2005). "Benchmarking and energy mangement schemes in SMEs (BESS), Draft".

113 Best practice programme (1996). "Developing an effective energy policy. Good practice guide 186".

114 Caddet Analysis Series No. 28 (2001). "Energy Conservation in the Pulp and Paper Industry".

115 Caddet Analysis Series No. 23 "Industrial Heat Pumps".

116 IEA Heat Pump Centre "IEA Heat Pump Centre", http://www.heatpumpcentre.org.

117 Linnhoff March "Pinch methodology", www.linnhoffmarch.com.

118 KBC "Pinch methodology", www.kbcat.com.

119 Neste Jacobs Oy "Pinch methodology", www.nestejacobs.com.

120 Helsinki Energy (2004). "What is District Cooling?" www.helsinginenergia.fi/kaukojaahdytys/en/index.html.

121 Caddet Energy Efficiency (1999). "Pressured air production and distribution. Caddet Energy Efficiency Newsletter No 3".

122 Wikipedia_Combustion (2007). http://en.wikipedia.org/wiki/Combustion.

123 US_DOE "Improving steam system performance. A source book for industry." Best Practices activity for the U.S. Department of Energy's (DOE) Industrial Technologies Program.

125 EIPPCB "LCP BREF".

126 EIPPCB "C&L BREF".

127 TWG "TWG comments D1", personal communication.

128 EIPPCB "LVIC-S BREF".

130 US_DOE_PowerFactor "Motor Challenge Fact sheet, Reducing Power Factor Cost".

131 ZVEI "Position Paper on the Green Paper on Energy Efficiency: Improving Energy Efficiency by Power Factor Correction".

132 Wikipedia_Harmonics, http://en.wikipedia.org/wiki/Harmonics.

133 AENOR (2004). "EN 12953-10".

134 Amalfi, X. (2006). "Boiler Audit House".

135 EUROELECTRICS "Harmonics", personal communication.

136 CDA "Harmonics", http://www.copper.org/homepage.html.

137 EC "EURODEEM", http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/eurodeem/index.htm.

139 US_DOE "Motor Master Plus", http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/software.html.

140 CE (2005). "Green Paper on Energy Efficiency COM(2005)265 final of 22 June 2005".

141 UE (2007). "Déclaration de Berlin ".

142 CE (2007). "Energy Efficiency Action Plan October 2007 COM (2006) 545 FINAL".

145 CE (2000). "Green Paper: Towards a European Strategy for the security of Energy Supply COM (2000) 769 FINAL Nov 2000".

146 CE (2004). “Directive 2004/8/EC of the EP and Council on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC".

147 CE (2006). “Council Directive 2006/32/EC of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC".

148 CE (2005). “Framework Directive 2005/32/EC for the setting of eco-design requirements for energy using products (EuP)".

152 CE (2003). "Guidance on Interpretation of "Installation" and "Operator" for the Purposes of the IPPC Directive amended 2007".

153 Wikipedia "thermodynamics: laws, definitions, etc".

154 Columbia_Encyclopedia "Enthalpy".

156 Beerkens, R. G. C., van Limpt H.A.C., Jacobs, G (2004). “Energy Efficiency benchmarking of glass furnaces", Glass Science Technology, pp. 11.

157 Beerkens R.G.C. , v. L., H. (2006). "Analysis of Energy Consumption and Energy Savings Measures for Glass Furnaces".

158 Szabo, L., Dr (2007). "Energy efficiency indicators", personal communication.

159 EIPPCB (2006). "STS BREF: Surface treatment using organic solvents".

160 Aguado, M. (2007). "Site visit, Outokumpo Tornio steel works, Finland", personal communication.

161 SEI (2006). "Certified energy management systems".

162 SEI (2006). "The New Irish Energy Managament Standard- Aughinish Alumina Experience".

163 Dow (2005). "ENE TWG kick off meeting presentation".

164 OCDE (2001). "The application of biotechnology to industrial sustainability:".

165 BESS_EIS "Energy savings in design".

166 DEFRA, U. (2003). "Delivering energy efficiency savings".

167 EIPPCB (2006). "Economics and cross-media BREF".

168 PNEUROP (2007). "Proposed new text for compressed air Section (CAS)".

169 EC (1993). "SAVE programmes - set up to implement directive 93/76/EEC to limit carbon dioxide emissions by improving energy efficiency".

170 EC (2003). "European motor challange programme - Pumping systems programme", European motor challange programme.

171 de Smedt P. Petela E., M., I., Brodkorb M. (2006). "Model-based utilities management optimisation and management".

172 Maagøe Petersen, P. (2006). "Energy Efficient Design".

173 EIPPCB (2003). "BREF Élevage intensif de volailles et de porcins ".

174 CE (2007). "Novel potato process - LIFE project LIFE04ENV/DK/67", LIFE, LIFE04ENV/DK/67.

175 Saunders_R. (2006). “Electron Beam: One Way to Mitigate Rising Energy Costs", RADTECH report.

176 Boden_M. (2007). "Confirmation: EEFIN report results still valid", personal communication.

177 Beacock, S. (2007). "EUREM project", personal communication.

179 Stijns, P. H. (2005). “Energy management system - Atrium Hospital, Heerlen. NL", Euro Heat and Power.

180 Ankirchner, T. (2007). "European energy manger training project", personal communication.

181 Wikipedia "Process control engineering".

182 Wikipedia "Discussion and information on quality assurance and quality management:" http://en.wikipedia.org/wiki/ISO_9000.

183 Bovankovich (2007). "Energy management: what you need to know", personal communication.

186 UBA_AT "Energieeffiziente Technologien und effizienzsteigernde Massnahmen".

188 Carbon_Trust_(UK) (2005). "Energy use in Pig Farming ECG089", Energy Consumption Guide.

189 Radgen&Blaustein (2001). "Compressed Air Systems in the European Union", LOG-X, 3-932298-16-0.

190 Druckluft "System optimisation in CAS", http://www.druckluft-effizient.de/e/facts/08-system-optimisation.pdf.

191 Druckluft "Compressed Air Distribution", http://www.druckluft-effizient.de/e/facts/07-air-distribution.pdf.

193 Druckluft "Compressed Air-Example plants", http://www.druckluft-effizient.de/e/links/downloads.php?m=link.

194 ADEME (2007). "Compressed Air".

195 DETR "Air compressors with integral variable speed control", Best Practice Programme, Energy Efficiency, http://www.druckluft-effizient.de/links/demoprojekte/uk-vsd.pdf.

196 Wikipedia "Compressed Air".

197 Wikipedia "Drying".

199 TWG "Annex 1622 Front Ends Pump Systems".

200 TWG "Annex 1612 Front Ends Pump Systems".

201 Dresch, M. (2006). "DRYING-Proposal for "Energy Efficiency Techniques" BREF".

202 IFTS, C. I. (1999). "Contribution à l'élaboration de la stratégie de l'ADEME pour la maîtrise de l'énergie dans les procédés de séparation/concentration".

203 ADEME (2000). "Les procédés de séchage dans l'industrie".

204 CETIAT (2002). "Gains énergétiques induits par l'utilisation des énergies radiantes dans l'industrie: bilans thermiques sur site et retours d'expérience".

205 ADEME "Optimisation énergétique du séchage du latex naturel", www.ademe.fr.

206 ADEME (2002). "Les énergies radiantes et leurs applications industrielles".

207 ADEME (2000). "Mesure de l'humidité des solides dans l'industrie".

208 Ali, B. (1996). "Séchage à la vapeur d'eau saturée - Etat de l'art", Cahiers de l'AFSIA.

209 Wikipedia "Lighting".

210 CE (2000). "The European Motor Green Light Programme", http://sunbird.jrc.it/GreenLight/.

211 ADEME (1997). "Financer des travaux d'economie d'energie en hotellerie restauration".

212 BRE_UK (1995). "Financial aspects of energy management in buildings - Good practice guide 165".

213 CE "Guide to Energy Efficiency Bankable Proposals".

214 CE (1996). "Shared energy saving and supply agreement for UK buildings".

215 Initiatives, I. C. f. L. E. (1993). "Profitting from energy efficiency! A financing handbook for municipalities".

216 Initiatives, I. C. f. L. E. (1995). "Energy Smart Cities, Energy Efficiency Financing Directory".

217 Piemonte, R. (2001). "Gestione del servizio di illuminazione pubblica e realizzazione di interventi di efficienza energetica e di adeguamento normativo sugli impianti comunali, con l'opzione del finanziamento tramite terzi - Capitolato tipo d'appalto per le amministrazioni comunali".

218 Association, W. E. E. (1997). "Manual on financing energy efficiency projects".

219 IDAE "Propuesta de Modelo de Ordenanza Municipal de Alumbrado Exterior".

220 Blasiak W., Y., W., Rafidi N., (2004). “Physical properties of a LPG flame with high-temperature air on a regenerative burner," Combustion and Flame, pp. 567-569.

221 Yang W., B. W. (25 May 2005,). “Mathematical modelling of NO emissions from High Temperature Air Combustion with Nitrous Oxide Mechanism", Fuel Processing Technology,, pp. 943-957.

222 Yang W., B. W. (2005). “ Flame Entrainments Induced by a Turbulent Reacting Jet Using High-Temperature and Oxygen Deficient Oxidizers", Energy and Fuels, pp. 1473-1483.

223 Rafidi N., B. W. (2005). “Thermal performance analysis on a two composite material honeycomb heat regenerators used for HiTAC burners," Applied Thermal Engineering, pp. 2966-2982.

224 Mörtberg M., B. W., Gupta A.K (2005). “Combustion of Low Calorific Fuels in High Temperature and Oxygen Deficient Environment." Combustion Science and Technology.

225 Rafidi N., B. W., Jewartowski M., Szewczyk D. (June 2005). “Increase of the Effective Energy from the Radiant Tube Equipped with Regenerative System in Comparison with Conventional Recuperative System", IFRF Combustion Journal, article No 200503.

226 CADDET (2003, March). “"High-performance Industrial Furnace Based on High-temperature Air Combustion Technology - Application to a Heat Treatment Furnace"".

227 TWG “Comments to Draft 2 ENE BREF".

228 Petrecca, G. (1992). "Industrial Energy Management".

229 Di Franco, N. “ Energy diagnose in semi-conductors mill".

230 Association, C. D. (2007). "Harmonics", http://www.copper.org/applications/electrical/pq/issues.html.

231 The motor challenge programme "The motor challenge programme," http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/motorchallenge/index.htm.

232 60034-30, I. "Rotating electrical machines - Part 30: efficiency classes of single speed, three-phase, cage induction motors (IE code)".

233 Petrecca, G. (1992). " Industrial Energy Management".

234 PROMOT "PROMOT", http://promot.cres.gr/promot_plone.

236 Fernández-Ramos, C. (2007). "Energy efficient techniques LCP BREF", personal communication.

237 Fernández-Ramos, C. (2007). "Cooling in CV BREF", personal communication.

238 Hawken, P. (2000). "Natural Capitalism", ISBN 0-316-35300-0.

240 Hardy, M. "A Practical Guide to Free Cooling, Alternative Cooling, Night Cooling and Low Energy Systems," http://www.ambthair.com.

241 Coolmation “Free Cooling".

242 DiLouie, C. (2006). "Advanced Lighting Controls: Energy Savings, Productivity, Technology and Applications," ISBN 0-88173-510-8.

243 R&D, E. (2002). "Waste water concentration by mechanical vapour recompression (MVR) or heat pump (HP)".

244 Best practice programme "Compressed air costs reduced by automatic control system", http://www.druckluft-effizient.de/links/demoprojekte/gpcs137.pdf.

245 Di Franco, N. (2008). "Energy efficient management of transformers".

246 ISPRA, D. J. I. (2008). "Figure-Comparison of energy efficient and conventional pumping system", personal communication.

248 ADEME (2007). "Drying systems-Proposal for ENE BREF_Annex 5MDDrying".

249 TWG (2007). “TWG Final ENE BREF Meeting Nov 2007".

250 ADEME (2006). "Energy Diagnosis Reference Frame for Industry", personal communication.

251 Eurostat (2007). "Panorama of Energy".

252 EEA (2005). "Atmospheric greenhouse gas concentrations", CSI 013.

254 EIPPCB (2005). "Waste Incineration BREF", BREF.

255 CE; Waste, P. f. a. D. o. t. E. P. a. t. C. o. and COM_(2005)_667 (2005). "Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council on Waste COM (2005) 667".

256 Tempany, P. (2007). "Continuing environmental improvement", personal communication.

257 Clark, J. H. (2006). “Green Chemistry: today (and tomorrow)", Green Chemistry.

258 Tsatsaris, G. and Valero, A. (1989). “Thermodynamics meets economics - Combining thermodynamics and economics in energy systems", Mechanical Engineering.

259 IEA (2006). "Scenarios and strategies to 2050".

260 TWG (2008). “Comments on Draft 3: BAT Chapter, etc".

261 Carbon_Trust_UK (2005). "Energy use in Pig Farming".

262 UK_Treasury (2006). "(The Stern report): The economics of climate change".

263 Tempany, P. (2008). "Directly heated drying".

264 Tempany, P. (2008). "Indirectly heated drying".

265 Tempany, P. (2008). "Insulation and drying".

266 Ullmann's (2000). "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 6th edition electronic release".

267 EIPPCB (2006). "STM: Surface treatment of Metals and Plastics".

268 Whittaker, G. (2003). "Specifying for industrial Insulation Systems", Steam Digest Volume 4.

269 Valero, A. (2007). "Introduction to Thermodynamics for the ENE BREF".

270 Tempany, P. (2008). "Estimations and calculations", personal communication.

271 US_DOE (2004). "Waste Heat Reduction and recovery for improving furnace effciency, productivity and emissions performance", DOE/GO-102004-1975.

272 Finland, M. O.-. (2007). "Energy audit for transport chains".

276 Agency, S. E. P. (1997). "Energy Conservation in the Pulp and Paper Industry", 4712/4.

277 ADEME "Recuperation de chaleur par prechauffage de l'air".

278 ADEME "Space heating - Annex 8".

279 Czech_Republic (2006). "Energy Performance Contracting - The ESCO concept".

280 UBA_DE (2006). "Energy Services Company (ESCO) concept".

281 EWEC (2004). "Proceedings of the European Wind Energy Conference".

282 Association, E. S., http://www.electricitystorage.org/tech/technologies_technologies_caes.htm.

283 EIPPCB “Summary on energy Efficiency Issues in the BREF series"

284 Valero, A Torres C “Thermoeconomic analysis”

285 Valero, A 1989).”Thermoeconomics Anew chapter of physics”

286 Frangopoulos, http:ww.eolss.net/E3-19-toc.aspx.

GLOSSAIRE

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
Symboles	
µm	Micromètre (1 µm = 10^{-6} m)
~	approximativement ; plus ou moins
°C	Degré Celsius
$_0$	Conditions ambiantes
ΔT	Différence de température (augmentation)
ε	Efficacité exergétique
σ	Production d'entropie J/K
ŋ	Rendement thermique
A	
A	Amp (ampère). Symbole SI du courant électrique
AC	Courant alternatif
AEA	Agence autrichienne de l'énergie, également AEA Technology (un cabinet de conseil, Royaume-Uni)
aka	aussi connu sous
AN	Nitrate d'ammonium (NH_4NO_3)
APH	Préchauffeur d'air
IAP	Institut américain du pétrole
APQP ou PAQP	La planification avancée de la qualité du produit est une méthode structurée permettant de définir et de planifier les étapes nécessaires pour garantir qu'un produit répond aux attentes des clients. Elle facilite la communication entre tous les acteurs impliqués et permet d'avoir l'assurance que toutes les étapes nécessaires sont achevées en temps.
ASTM	Organisme international de normalisation. À sa création, il fut dénommé American Society for Testing and Methods et porte aujourd'hui le nom de : ASTM International
AT	Autriche
atm	Atmosphère (1 atm = 101325 N/m^2)
av	Moyenne
B	
bar	Bar (1.013 bar = 1 atm)
Bar a	Bar absolu
Bar g	Bar lu au manomètre (bar relatif), à savoir la différence entre la pression atmosphérique et la pression du gaz. Au niveau de la mer, la pression atmosphérique est de 0 bar relatif ou de 101 325 bar absolus.
MTD	Meilleure technique disponible
BOOS	Brûleur hors service
Bq	Becquerel (s^{-1}) – activité d'un radionucléide
BREF	Document de référence sur les meilleures techniques disponibles
BTEX	Benzène, toluène, éthyl-benzène, xylène
C	
C	Vitesse m/s
C	Chaleur spécifique d'une substance incompressible J/(kgK)
Flux C_4	Mélange de molécules ayant toutes quatre atomes de carbone. Habituellement : • butadiène (C_4H_6) • butène-1, butène-2 et isobutylène (C_4H_8) • N-butanes et isobutène (C_4H_{10})
CAES	Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé
CAS	Système à air comprimé

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
Cavitation	Formation puis implosion de bulles (ou cavités gazeuses) lorsqu'un volume de liquide est soumis à une pression suffisamment basse. Ce phénomène, dénommé « début de cavitation » peut se produire derrière la pale d'une hélice ou d'une turbine qui tourne rapidement ou sur toute surface qui vibre sous l'eau (ou dans des fluides en général) avec une amplitude et une accélération suffisantes. La cavitation est, en principe, un phénomène à éviter. Dans les dispositifs tels que les turbines et les pompes, la cavitation s'accompagne de percussions sonores, d'une détérioration des composants, de vibrations et une perte de rendement. Bien que l'éclatement des bulles soit un événement à relativement faible énergie, il est très localisé et peut même entraîner l'érosion des métaux tels que l'acier. Les piqûres provoquées par l'éclatement des bulles provoquent une grande usure des composants et peuvent raccourcir considérablement la durée de vie d'une turbine ou d'une pompe (Wikipedia).
CC	Cycle combiné
CCGT	Cycle combiné gaz turbine
CCP	Produits de la combustion du charbon
CDM ou MDP	Mécanisme de développement propre
CEM	Surveillance en continu des émissions
CEMS	Système de surveillance en continu des émissions
CEN	Comité européen de normalisation
CENELEC	Comité européen de normalisation électrotechnique
CFB	Lit fluidisé circulant
CFBC	Combustion à lit fluidisé circulant
CFC	Le chlorofluorocarbure est un composé constitué de chlore, de fluor et de carbone. Les CFC sont très stables dans la troposphère. Ils se déplacent jusqu'à la stratosphère où ils sont décomposés par le rayonnement UV de forte intensité et libèrent des atomes de chlore qui s'attaquent ensuite à la couche d'ozone et participent à son appauvrissement.
CHP	Chaleur et électricité combinées (cogénération)
CIP ou NEP	Système de nettoyage en place
cm	Centimètre
DCO	Demande chimique en oxygène : quantité de dichromate de potassium, exprimée sous forme d'oxygène, nécessaire pour oxyder par voie chimique les substances contenues dans les eaux résiduaires (à approx. 150 °C).
COP	Coefficient de performance (par ex. pour les pompes à chaleur)
COPHP	Coefficient de performance du cycle d'une pompe à chaleur
COPR	Coefficient de performance du cycle de réfrigération
c_p	Chaleur spécifique à pression constante J/(kgK)
Amélioration continue	Procédé d'amélioration année par année des résultats du management de l'énergie, par une augmentation de l'efficacité et en évitant les consommations inutiles
CP	Débit massique x chaleur massique
Effets croisés	Calcul des impacts sur l'environnement des émissions dans l'eau/l'air/le sol, de la consommation d'énergie, de la consommation de matières premières, du bruit et du captage des eaux (c'est-à-dire, tout ce qui est prévu par la Directive IPPC)
CTM	Gestion technique centralisée
c_v	Chaleur spécifique à volume constant J/(kgK)
cv	Volume de référence
D	
d	Jour
DBB	Chaudière à cendres sèches. Le type le plus courant de foyer à charbon dans l'industrie de production d'électricité est la chaudière à charbon pulvérisé à cendres sèches. Lorsque le charbon pulvérisé est brûlé dans une chaudière à cendres sèches, environ 80 pour cent des matières non brûlées ou cendres sont entraînés dans les gaz de combustion et sont captés et récupérés sous forme de cendres volantes. Les 20 pour cent de cendres restant sont des cendres sèches, une matière gris noir, poreuse, granulaire, essentiellement de la taille du sable, qui est récupérée dans de l'eau.
CC (DC)	Courant continu
DC	Climatisation urbaine
DCS	Systèmes de commande répartis
DDCC	Contrôle-commande numérique direct de la combustion

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
DE	Allemagne
DH	Chauffage urbain
DK	Danemark
E	
E	Exergie J
E	Flux spécifique
e	Exergie par masse unitaire J/kg
EA	Audit énergétique
EAM	Modèle d'audit énergétique
EDTA	Acide éthylène diamine tétra-acétique
EEI	Indicateur d'efficacité énergétique
EFF	Schéma de classement des rendements moteur créé par la Commission européenne et les fabricants de moteurs de l'UE (CEMEP). Il existe trois niveaux de catégories de rendements, à savoir EFF1 (moteurs à haut rendement énergétique), EFF2 (moteurs à rendement standard) et EFF3 (moteurs à rendement médiocre), qui s'appliquent aux moteurs bipôles et quadripôles basse tension ayant des caractéristiques nominales comprises entre 1,1 et 90 kW.
EGR	Recirculation des gaz d'échappement
EIF	Facteur d'intensité énergétique
EII	Indice d'intensité énergétique : indice d'analyse comparative de Solomon Associate pour les raffineries de pétrole
EIPPCB	Bureau européen de l'IPPC
ELV	Valeur limite d'émission. Masse, exprimée en fonction de certains paramètres spécifiques, la concentration et/ou le niveau d'une émission à ne pas dépasser au cours d'une ou de plusieurs périodes données.
EMAS	Système de management environnemental et d'audit de la Communauté européenne
Émission	Rejet direct ou indirect, à partir de sources ponctuelles ou diffuses de l'installation, de substances, de vibrations, de chaleur ou de bruit dans l'air, l'eau ou le sol.
EMS, SME	Système de management environnemental
EN	Norme européenne (standard)
ENE, EE	Efficacité énergétique
ENEMS	Système de management de l'efficacité énergétique
Audit énergétique	Processus d'identification des consommations d'énergie, des potentiels d'économie et des méthodes d'efficacité appropriées
Performance énergétique	Quantité d'énergie consommée par rapport aux résultats obtenus. Plus la consommation d'énergie spécifique est faible, plus la performance énergétique est élevée.
EO	Sortie d'énergie, Énergie en sortie
EOP, EoP	Bout de chaîne
EPC	Contrat de performance énergétique
EPER	Registre européen des émissions de polluants
ESCO/ESCo	Société de services d'efficacité énergétique
E_T	Énergie totale J
EU-15	15 États membres de l'Union européenne
EU-25	25 États membres de l'Union européenne
EVO	Efficiency valuation organisation, organisme non gouvernemental d'évaluation des projets en efficacité énergétique.
F	
f	Liquide saturé
FAD	Fourniture d'air gratuite
FBC	Combustion en lit fluidisé
FBCB	Chaudière à combustion en lit fluidisé
f_g	Différence de propriété pour la vapeur saturée et le liquide saturé
FI	Finlande
FMEA	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets. Méthode analytique systématique pour identifier les défaillances potentielles (et de conception) dans un processus, avant qu'elles ne surviennent, avec l'intention de les éliminer ou de minimiser les risques s'y rapportant.
FR	France

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
G	
g	Accélération de la gravité m/s^2
g	Gramme
g	Gaz saturé
G	Énergie libre de Gibbs
G	giga 10^9
GJ	Gigajoule
OGN	Organisme génétiquement modifié
GPM	Gallon par minute
Certificat vert	Instrument de marché pour favoriser l'utilisation des énergies renouvelables. Les certificats verts représentent la valeur environnementale d'une production d'énergie renouvelable. Ils peuvent être négociés séparément de l'énergie produite.
GT	Turbine à gaz
GTCC	Cycle combiné gaz-turbine
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattheure
GWh_e	Gigawattheure électriques
GWP	Potentiel de réchauffement climatique
H	
H	Enthalpie J
H	Enthalpie spécifique J/kg
h	Heure
Marteau	Marteau liquide, voir Coup de bélier (marteau d'eau)
Harmoniques	Composante sinusoïdale d'une onde périodique ou grandeur sinusoïdale dont la fréquence est un multiple entier d'une fréquence fondamentale. Il s'agit d'une perturbation de la puissance propre (clean power).
HCV	Valeur calorifique supérieure, valeur de combustion supérieure
HCFC	Hydrochlorofluorocarbones. Classe d'halogénoalcanes où la totalité de l'hydrogène n'a pas été remplacé par du chlore et du fluor
HDPE	Polyéthylène haute densité
HF	Rayonnement haute fréquence. Rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'ondes sont dans la plage des ondes radioélectriques, entre 3 et 30 MHz.
HFO	Mazout lourd
HiTAC	Technologie de combustion à air préchauffé à haute température
HMI	Interface homme machine
HP	Haute pression
HPS	Vapeur haute pression : vapeur ayant une pression supérieure à la pression atmosphérique
HRSG	Générateur de vapeur à récupération de chaleur
HV	Haute tension. Selon la Commission électrotechnique internationale et ses homologues nationaux (IEE, IEEE, VDE, etc.) les circuits haute tension sont des circuits dont les tensions sont supérieures à 1 000 V en courant alternatif et d'au moins 1 500 V en courant continu, et se distinguent des circuits basse tension (50 – 1000 V C.A. ou 120 – 1 500 V C.C.) et des circuits très basse tension (<50 V C.A. ou <120 V C.C.). Applicable dans le contexte de la sécurité des appareils électriques.
HVAC ou CVC	Chauffage, ventilation et climatisation
Appareil d'hydrogénation	Unité d'hydrodésulfuration catalytique (HDS), couramment utilisée dans l'industrie du raffinage du pétrole, souvent dénommée appareil d'hydrogénation. Elle utilise un procédé chimique catalytique pour éliminer le soufre (S) du gaz naturel et des produits pétroliers raffinés tels que l'essence ou distillat de pétrole, les carburéacteurs, le kérosène, le diesel et les fiouls.
Hz	Hertz
I	
DI	Diamètre interne
IE	Irlande
AIE	Agence internationale de l'énergie
CEI	Commission électrotechnique internationale
IEF	Forum d'échange d'informations (organisme de consultation informelle dans le cadre de la Directive IPPC)

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
IGCC ou CCGI	Cycle combiné à gazéification intégrée
Installation	Unité technique stationnaire dans laquelle une ou plusieurs activités mentionnées à l'Annexe I de la Directive IPPC sont réalisées, et toute autre activité directement associée ayant un lien technique avec les activités réalisées sur le site et qui pourraient avoir un effet sur les émissions et la pollution
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IPPC ou PRIP	Prévention et réduction intégrées de la pollution
IR	Rayonnement infrarouge. Rayonnement électromagnétique dont la longueur d'ondes est plus longue que celle de la lumière visible mais plus courte que celle d'un rayonnement térahertz et micro-ondes, c'est-à-dire entre 750 nm et 1 nm
IRR ou TRI	Taux de rentabilité interne
ISO	Organisation internationale de normalisation
ISO 14001	Norme de management environnemental de l'Organisation internationale de normalisation
IT	Italie
J	
J	Joule
JRC	Centre commun de recherche
K	
K	Kelvin (0 °C = 273,15 K)
kcal	kilocalorie (1 kcal = 4,19 kJ)
kg	Kilogramme
kJ	kilojoule (1 kJ = 0,24 jkcal)
KN	Énergie cinétique J
kPa	Kilopascal
kt	Kilotonne
kWh	Kilowattheure (1 kWh = 3600 kJ = 3,6 MJ)
L	
l	Litre
LCP	Grande installation de combustion
LCV	Valeur calorifique inférieure, valeur de combustion inférieure
Production allégée, allègement, « Lean »	Philosophie de gestion de procédé générique inspirée principalement du Système de production Toyota (TPS) mais également d'autres sources. Elle est connue dans le monde entier pour s'employer à réduire les « sept sources de gaspillage » identifiées à l'origine par Toyota afin d'améliorer la valeur client globale. Cette méthode est aussi souvent associée à la méthode Six Sigma parce qu'elle met en exergue la réduction des variations au sein des procédés (ou leur lissage réciproque).
LDPE	Polyéthylène basse densité
LFO	Fioul léger (plus léger que le HFO – fioul lourd)
BP	Basse pression
Vapeur basse pression (BP)	Vapeur basse pression : vapeur dont la pression est inférieure ou égale à, mais non fortement supérieure à la pression atmosphérique.
GPL	Gaz de pétrole liquide
LPS	Vapeur basse pression
lux	(symbole : lx) Unité SI d'éclairement, utilisée en photométrie, pour mesurer l'intensité de la lumière, avec des longueurs d'ondes pondérées selon la fonction de luminosité, un modèle normalisé de la perception humaine de la luminosité. En anglais, « lux » s'utilise la fois au singulier et au pluriel
LVOC	Composés organiques à grand volume de production (BREF)
M	
m	Masse
m	Mètre
M	méga 10^6
m/min	Mètres par minute
m^2	Mètre carré
m^3	Mètre cube
MBPC	Commande prédictive par modèle
mg	Milligramme (1 mg = 10^{-3} gramme)
MIMO	Multi-entrées multi-sorties

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
MJ	Mégajoule (1 MJ = 1000 kJ = 10^6 joule)
mm	Millimètre (1 mm = 10^{-3} m)
Surveillance	Processus destiné à évaluer ou à déterminer la valeur réelle et les variations d'une émission ou d'un autre paramètre, reposant sur des procédures de surveillance, d'inspection, d'échantillonnage et de mesure systématiques, périodiques ou ponctuelles ou sur d'autres méthodes d'évaluation destinées à fournir des informations sur les volumes d'émission et/ou les tendances des polluants émis.
MP	Moyenne pression
MPS	Vapeur moyenne pression
MS	État membre
MSA	Analyses des systèmes de mesure. Méthode faisant appel à l'expérimentation et aux mathématiques pour quantifier les variations au sein du processus de mesure qui contribuent à la variabilité du procédé dans son ensemble.
Mt	Mégatonne (1 Mt = 10^6 tonne)
mV	Millivolt (mV), 10^{-3} volt, 1/1000 d'un volt
MV	Mégavolt (MV) 10^6volts, 1 000 000 volts
MVR	Système de recompression mécanique de la vapeur. Un type de pompe à chaleur
MW_e	Mégawatts électrique (énergie)
MWh_e	Mégawattheure électrique (puissance)
MWh_h	Mégawattheure chaleur (puissance)
MW_{th}	Mégawatt thermique (énergie)
N	
N	Buse
n.a.	Non applicable OU indisponible (en fonction du contexte)
n.d.	Aucune donnée
ng	Nanogramme (1 ng = 10^{-9} gram)
NG	Gaz naturel
Nm^3	Mètre cube normal (101325 kPa, 273 K)
NMHC	Hydrocarbures non méthaniques
COVNM	Composés organiques volatils non méthaniques
NPSH	Hauteur nette d'aspiration. Elle indique la différence dans toute coupe transversale d'un circuit hydraulique générique, entre la pression et la pression vapeur du liquide dans cette coupe. En ce qui concerne le fonctionnement des pompes, deux aspects de ce paramètre sont dénommés respectivement NPSH (d) ou Hauteur nette positive à l'aspiration (disponible) et NPSH (r) ou Hauteur nette positive à l'aspiration (requise) : la NPSH (d) est calculée à l'orifice d'entrée de la pompe, et la NPSH (r) est la NPSH limite que la pompe peut supporter sans caviter. Extrait de « http://en.wikipedia.org/wiki/NPSH »
O	
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OFA	Étagement d'air
Exploitant	Toute personne physique ou légale qui exploite ou dirige l'installation ou, en cas de disposition prévue dans la législation nationale, à laquelle il a été conféré un pouvoir économique décisif sur le fonctionnement technique de l'installation.
ºR	Degré Rankin
Cycle Otto	Moteur à quatre temps, moteur à explosion
P	
P	péta 10^{15}
P, p	Pression
Pa	pascal
PCB	PolyChloroByphényl
PCDD	PolyChloroDibenzoDioxines
PCDF	PolyChloroDibenzoFurannes
PDCA	Roue de Deming - Cycle planifier – développer (réaliser) – contrôler (vérifier) - agir
PFBC	Combustion en lit fluidisé pressurisé
PI	Intégré au procédé
PID	Régulation de type PID (à action proportionnelle à l'erreur, à son intégrale et à sa dérivée)
PLC	Automate programmable

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
polluant	Substance individuelle ou groupe de substances qui peuvent nuire ou avoir une incidence sur l'environnement.
ppb	Parties par milliard
ppm	Parties par million (en poids)
ppmvd	Parties par million en volume pour les gaz secs
PRV	Vanne de réduction de pression
PT	Énergie potentielle
Q	
Q	Chaleur J
$\dot{Q}$	Taux de chaleur
QFD	Déploiement d'une fonction de qualité
QMS ou SGQ	Système de gestion de la qualité
R	
R	Constante de gaz J/(gK)
R&D	Recherche et développement
R_u	Constante de gaz universelle J/(molK)
Right first time (Bon du premier coup)	Système de gestion de la qualité. Concept intégré à une gestion de la qualité totale, où il existe un engagement vis-à-vis des clients à ne pas effectuer d'erreurs. Cette méthode implique de la part de tous les employés à tous les niveaux, un engagement et une prise de responsabilités en vue d'atteindre cet objectif. Des cercles de qualité sont parfois utilisés à titre de méthode complémentaire.
ROI	Retour sur investissement
S	
S	Entropie J/K
s	Entropie spécifique J/(kgK)
s	Seconde
Vapeur saturée	Vapeur à la température du point d'ébullition qui correspond à sa pression
Programme SAVE	Programme d'efficacité énergétique de la Communauté européenne, maintenant achevé
SCADA	Système de contrôle et d'acquisition de données
SE	Suède
SEC	Consommation d'énergie spécifique
SEI	Le SEI ou Sustainable energy in Ireland est un organisme chargé de la promotion et du développement des énergies renouvelables en Irlande.
Chaleur sensible	Énergie calorifique pouvant être transférée par un corps dont la température est supérieure à celle de son environnement, par conduction, convection ou les deux. La chaleur sensible est le produit de la masse du corps par son pouvoir calorifique spécifique et par son écart de température positif par rapport à une température de référence (supposée) (Wikipedia)
SG	Générateur de vapeur
Six Sigma, 6 sigma, 6-σ	Système de qualité dans lequel la probabilité d'une défaillance inattendue se limite à six écarts types (où sigma est l'écart type et 6-σ est égal à 3,4 défaillances par million).
SME	Petites et moyennes entreprises
SPC ou MSP	Maîtrise statistique des procédés
Consommation spécifique	Consommation liée à une base de référence, telle qu'une capacité de production ou une production effective (par ex. masse par tonne ou par unité produite).
SPOT	Outil d'optimisation des centrales à vapeur
Passivité, manque de dynamisme	Qui a perdu de son allant par suite d'un excès de travail, de lassitude et / ou du vieillissement. Manque d'originalité parce que sans intérêt et galvaudé.
Vapeur surchauffée	Vapeur chauffée à une température supérieure au point d'ébullition correspondant à sa pression. Elle ne peut exister en contact avec l'eau ni contenir de l'eau ; et ressemble à un gaz parfait ; également dénommée vapeur surchargée, vapeur anhydre et vapeur gazeuse.
État d'équilibre	Situation dans laquelle toutes les variables d'état sont constantes malgré des processus en cours qui s'efforcent de les modifier.
T	
t	Temps
t	Tonne métrique (1 000 kg ou 10^6 gram)

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
T	Température
T	Téra 10^{12}
t/an	Tonne(s) par an
TAC	Concentration totale admise
TDS	Matières solides dissoutes totales
TEE	Abréviation pour certificat blanc en Italie, voir certificat blanc.
TOC (COT)	Carbone organique total
TQM	La gestion de la qualité totale (d'un produit) est une approche globale et structurée du management organisationnel qui recherche l'amélioration de la qualité des produits et des services, par une mobilisation permanente et des améliorations continues en réponse à un retour d'information continu. Les processus de gestion de la qualité totale sont divisés en quatre catégories séquentielles : planifier, développer, contrôler et agir (cycle PDCA)
Entraînement à thyristor	Ensemble moteur et commande comprenant l'arbre d'entraînement où l'alimentation en courant alternatif est régulée par une commande de phase à thyristor pour fournir une tension variable à un moteur à courant continu.
Direction générale, cadres dirigeants, cadres supérieurs	Personnes ou groupes de personnes détenant l'autorité suprême qui dirigent l'entreprise ou une partie de cette dernière
TWG	Groupe de travail technique
U	
U	Énergie interne J
u	Énergie interne par unité de masse J/kg
UHC	Hydrocarbures non brûlés
UPS	Alimentation sans coupure. Dispositif assurant une alimentation électrique continue aux équipements qui lui sont raccordés, à partir d'une source d'électricité distincte, en cas de panne de secteur.
V	
V	Volume
v	Volume spécifique m^3/kg
V	Volt. Unité SI de différence de potentiel électrique ou force électromotrice
VA	Volt-ampère. En électricité : quantité de puissance apparente dans un circuit à courant alternatif qui est celle d'un courant de un ampère sous une force électromotrice de un volt. Le volt-ampère est équivalent au watt pour les circuits non-réactifs (qui sont généralement exprimés dans l'industrie en kV : 10 kVA = capacité de 10 000 watts (où le préfixe k du SI signifie kilo) ; 10 MVA = capacité de 10 000 000 watts (où M signifie méga)
VAM	Monomère d'acétate de vinyle
COV	Composé organique volatil. Composés ayant une pression vapeur suffisamment élevée pour permettre leur vaporisation significative dans des conditions ambiantes. Ils comprennent un large éventail de molécules telles que les aldéhydes, les cétones et les hydrocarbures. On les trouve fréquemment dans les solvants pour peinture, les encres d'impression, les adhésifs, certains carburants, etc. Voir le BREF STS (Traitement de surface utilisant des solvants).
vol-%	Pourcentage en volume. (également % v/v)
Volute	Boîtier en spirale abritant le rotor dans une pompe centrifuge.
W	
W	Travail J

Termes et abréviations	SIGNIFICATION
Coup de bélier	(ou, plus généralement, marteau liquide). Surpression ou onde provoquée par l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement à la suite d'un arrêt brusque ou d'un changement brutal de direction. Il est fonction de la compressibilité du fluide dans lequel se produisent les brusques variations de pression. Par exemple, la fermeture brutale d'une vanne à l'extrémité d'un système de canalisation provoque la propagation d'une onde de coup de bélier dans la canalisation. Les systèmes de chauffage des bâtiments sont également vulnérables au coup de bélier. Dans un système vapeur, le coup de bélier se produit souvent lorsqu'une partie de la vapeur se condense en eau dans une section horizontale de la canalisation vapeur. En conséquence, la vapeur capte l'eau et il se forme une sorte de « bouchon d'eau » qui est propulsé à grande vitesse dans un coude de la canalisation, ce qui crée un fort bruit de coup de bélier et entraîne une forte contrainte sur la canalisation. Cette situation est habituellement due à une mauvaise stratégie de drainage des condensats (Wikipedia).
Vapeur humide	Vapeur saturée renfermant des gouttelettes d'eau maintenues en suspension par voie mécanique ; également appelée vapeur brumeuse.
WBB	Chaudière à cendres humides. Type de chaudière comportant un foyer à cendres humides, utilisé pour la combustion à charbon pulvérisé. Dans une chaudière à cendres humides, les cendres sont maintenues à l'état de fusion et évacuées en tant que liquide. La trémie à cendres des foyers à cendres humides contient de l'eau de trempe. Lorsque le laitier en fusion entre en contact avec l'eau de trempe, il se brise instantanément, se cristallise et forme des granulés. Les chaudières à cendres humides s'utilisent de préférence pour les charbons faiblement volatils qui produisent une grande quantité de cendres. Toutefois, leurs coûts d'investissement étant plus élevés, de même que leurs coûts de maintenance, elles sont donc fabriquées moins souvent. (Wikipedia)
Certificat blanc	Instrument de marché ayant pour objectif de promouvoir les économies d'énergie auprès d'une certaine catégorie d'exploitants (distributeurs, consommateurs, etc.) associé à un système d'échange pour les mesures d'efficacité énergétique se traduisant par des économies d'énergie. Les économies sont ensuite vérifiées et certifiées par les dénommés certificats « blancs ».
WI	Incinération des déchets
wt-%	Pourcentage en poids (également % en poids/poids)
W-t-E	Déchets convertis en énergie
X	
x	Fraction molaire, qualité
X	qualité
Y	
Yr ou an	Année
Z	
Z	Facteur de compressibilité
z	Élévation, position m

7 ANNEXES

7.1 Énergie et lois de la thermodynamique

[269, Valero, 2007]

Les procédés d'audit pour établir un diagnostic énergétique dans les installations industrielles sont capitaux afin de comprendre où l'énergie est utilisée, et de s'assurer qu'elle est utilisée et contrôlée de manière efficace. Pour un audit, les bilans massiques, énergétiques et exergétiques des équipements et des procédés correspondants doivent être effectués. Il est ensuite possible d'émettre des recommandations pour améliorer les rendements et/ou minimiser les énergies dissipées obtenues. La science fondamentale qui traite de l'énergie ainsi que des divers concepts et lois décrivant la conservation d'une forme d'énergie transformée en une autre, et les divers systèmes employés avec des systèmes à l'équilibre est la thermodynamique. Les concepts fondamentaux de la thermodynamique sont résumés dans le présent chapitre, en insistant sur les domaines ayant une importance particulière pour l'optimisation de l'utilisation de l'énergie et de l'efficacité énergétique dans l'industrie. Pour des explications détaillées, consulter les manuels universitaires (voir Bibliographie de la section 7.1.4.1).

7.1.1 Principes généraux

7.1.1.1 Caractérisation des systèmes et des procédés

(Remarque : si les symboles ou les formules comportent des grandeurs mesurées, ces dernières sont indiquées en unités du système international (SI)).
Un système thermodynamique est la quantité de matière prise en considération à l'intérieur d'une limite prescrite ; tout ce qui est extérieur au système est dénommé milieu extérieur. Les systèmes sont soit fermés soit ouverts. Un système est considéré comme fermé s'il n'existe aucun échange de matière entre le système et le milieu extérieur. S'il existe un échange, le système est considéré comme étant ouvert.

Les systèmes à écoulement constant constituent une catégorie de systèmes très importante, fréquemment rencontrée par les ingénieurs. Un système à écoulement constant peut être défini comme un quelconque système spatial fixe à travers lequel s'écoule un fluide dont les propriétés soit internes au système soit aux limites du système, ne varient pas avec le temps. Des exemples types sont les compresseurs d'air, les turbines à gaz, les turbines à vapeur, les chaudières, les pompes, les échangeurs de chaleur, etc. Tous ces équipements ont en commun de posséder chacun un ou plusieurs flux de fluide entrants et sortants. Les équipements dotés de telles caractéristiques sont également connus en tant que systèmes à état constant ou à écoulement constant, systèmes à débits ou volumes constants.

Toute caractéristique d'un système est dénommée propriété. La température, le volume, la pression ou la masse en sont des exemples les plus courants. Les propriétés sont considérées comme étant intensives si elles sont indépendantes de la taille du système (température, pression, densité) ou extensives si leurs valeurs dépendent de la taille ou de l'étendue du système (masse, volume, énergie totale). Lorsqu'une propriété extensive est divisée par la masse totale d'un système, la propriété obtenue est dénommée propriété spécifique. L'état d'un système est l'état du système tel que décrit par ces

propriétés. Une équation d'état est une quelconque équation ayant trait aux propriétés d'une substance.

Un système à l'équilibre ne subit aucune variation lorsqu'il est isolé de son milieu extérieur. Tout changement que le système est susceptible de subir est dénommé processus. Un système est dit constant si aucune de ses propriétés ne change dans le temps. Si le système retourne à sa condition ou son état d'origine à la fin du processus, le système a alors subi un cycle. Les processus réversibles sont ceux dans lesquels tout élément impliqué avec le processus (systèmes et environnement) peut être ramené à son état d'origine après exécution du processus. À l'issue d'un processus irréversible, ceci n'est pas possible. Aucun processus impliquant un frottement ou un potentiel déséquilibré ne peut être réversible. Bien qu'en réalité tous les processus réels soient irréversibles, l'étude des processus réversibles est très utile pour comprendre les limites de comportement des systèmes et des processus.

7.1.1.2 Formes de stockage et de transfert énergétique

7.1.1.2.1 Stockage d'énergie

L'énergie peut être stockée sous de nombreuses formes. Les formes les plus importantes rencontrées dans les applications de thermodynamique sont : l'énergie interne, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. D'autres formes d'énergie, telles que l'énergie magnétique, l'énergie électrique, et les effets de tension de surface sont importantes uniquement dans certains cas spécialisés et ne seront pas étudiés ici. L'énergie se mesure en Joules (J) ou en d'autres unités telles que le kilowattheure (kWh).

L'énergie interne (U) est associée aux formes microscopiques d'énergie, c'est-à-dire au déplacement, à la position et à l'état interne des atomes ou des molécules de la substance.

L'énergie associée au déplacement du système en tant que tout par rapport à un certain cadre de référence est dénommée énergie cinétique (KN). L'énergie cinétique est exprimée comme suit :

$$KN = \frac{mC^2}{2} \text{ (J)}$$ **Équation 7.1**

Où : C = vitesse du système par rapport à un certain cadre de référence fixe
m = masse du corps en mouvement.

La variation d'énergie potentielle gravitationnelle, PT est associée à la position (hauteur) du système dans son ensemble dans le champ gravitationnel de la terre et peut être exprimée comme suit :

$$PT = mgz \text{ (J)}$$ **Équation 7.2**

Où : g = accélération de la gravité et
z = élévation du centre de gravité d'un système par rapport à un certain plan de référence choisi arbitrairement.

L'énergie d'un système qui est constitué d'énergies cinétique, potentielle et interne est exprimé comme suit :

$$U_{K,P} = U + KN + PT = U + \frac{mC^2}{2} + mgz \text{ (J)}$$ **Équation 7.3**

7.1.1.2.2 Transfert d'énergie

Les formes d'énergie présentées ci-dessus, qui constituent l'énergie totale d'un système sont des formes statiques de l'énergie et peuvent être stockées dans un système. Toutefois, l'énergie peut également être transformée d'une forme en une autre et entre systèmes. Pour les systèmes fermés, l'énergie peut être transférée par le biais du travail et du transfert de chaleur. La chaleur et le travail ne sont pas des propriétés parce qu'ils dépendent des détails d'un processus et n'ont pas seulement des états finaux. Le taux de transfert énergétique est exprimé en Watts (1 Watt = 1 Joule/1 seconde).

Chaleur
La chaleur (Q) peut être définie comme de l'énergie en transit d'une masse à une autre, en raison d'une différence de température entre elles. Elle tient compte de la quantité d'énergie transférée à un système fermé pendant un processus par des moyens autres que le travail. Le transfert d'énergie se produit uniquement dans le sens d'une température décroissante.

La chaleur peut être transférée de trois manière différentes : par conduction, par convection et par rayonnement. La conduction est le transfert d'énergie à partir des particules les plus énergétiques d'une substance vers les particules adjacentes qui sont moins énergétiques, par suite d'interactions entre les particules. La conduction peut avoir lieu dans des solides, des liquides et des gaz. La convection est le transfert d'énergie entre une surface solide à une certaine température et un gaz ou un liquide adjacent en déplacement à une autre température. Le rayonnement thermique est émis par la matière, par suite de changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules qu'elle contient. L'énergie est transportée par ondes électromagnétiques et ne nécessite aucune interaction avec un support pour se propager et peut même se propager dans le vide.

Travail
La définition du travail (W) en thermodynamique est la suivante : un travail est fourni par un système à son environnement si le seul effet sur tout ce qui est extérieur au système peut se traduire par l'élévation d'un poids. À l'instar de la chaleur, le travail est aussi une énergie en transit. Le taux de transfert d'énergie par le travail est dénommé puissance ; il est exprimé en unités du système international (SI) par W.

7.1.2 Première et seconde lois de la thermodynamique

Les deux lois fondamentales et générales de la thermodynamique sont : (1) l'énergie est conservée et (2) il est impossible d'apporter un quelconque changement ou une quelconque série de changements dont le seul résultat net serait le transfert d'énergie sous forme de chaleur à partir d'une température basse vers une température élevée. En d'autres termes, la chaleur ne s'écoule pas spontanément du froid vers le chaud.

Un processus ne se produit que s'il satisfait à la fois à la première et à la seconde loi de la thermodynamique.

7.1.2.1 Première loi de la thermodynamique : équilibre énergétique

La première loi de la thermodynamique est le principe général de la physique et énonce que l'énergie est conservée. Bien que cette loi ait été formulée de bien des manières différentes, elles ont toutes essentiellement la même signification. Des exemples d'énoncés types sont présentés ci-après :

- chaque fois que l'énergie est transformée d'une forme en une autre, l'énergie est toujours conservée
- l'énergie ne peut être ni créée, ni détruite
- la somme totale de toutes les énergies reste constante pour un système donné
- l'énergie nette sous forme de chaleur ajoutée ou soustraite à ou d'un système qui fonctionne de manière cyclique est égale à l'énergie nette sous forme de travail fourni ou consommé par le système
- la valeur du travail net fourni par un système fermé ou sur un système fermé subissant un processus adiabatique entre deux états donnés dépend uniquement des états finaux et non des détails du processus adiabatique.

7.1.2.1.1 Bilan énergétique pour un système fermé

Pour un système fermé, la première loi implique que la transformation d'énergie du système est égale au transfert d'énergie nette vers le système au moyen de chaleur et de travail. À savoir :

$$U_2 - U_1 = Q - W \text{ (J)}$$ **Équation 7.4**

Dans l'Équation 7.4, la convention de signe utilisée est la convention habituelle à savoir : la chaleur est positive lorsqu'elle est ajoutée au système et le travail est positif lorsqu'il est fourni par le système.

7.1.2.1.2 Bilan énergétique des systèmes ouverts

La plupart des applications de la thermodynamique mécanique sont conduites sur la base d'un volume de référence. Dans de tels cas, il faut appliquer le principe de la conservation de la masse : le taux d'accumulation de masse en fonction du temps au sein du volume de référence est égal à la différence des débits masses totaux entrants et sortants à travers la limite.

$$\frac{dm}{dt} = \sum_1 \dot{m}_1 - \sum_2 \dot{m}_2 \text{ (kg/s)}$$ **Équation 7.5**

Le bilan de taux énergétique pour un tel système est :

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_1\left(h_1 + \frac{C_1^2}{2} + gz_1\right) - \dot{m}_2\left(h_2 + \frac{C_2^2}{2} + gz_2\right) \text{ (en unités du SI, W)}$$ **Équation 7.6**

Dans l'équation 7.6, h est l'enthalpie spécifique des flux entrants et sortants du système :

$$h = u + Pv \text{ (, J/kg)}$$ **Équation 7.7**

Pour les systèmes à débit constant, les débits massiques et les taux de transfert énergétique sous forme de chaleur et de travail sont constants dans le temps.

$$\sum_1 \dot{m}_1 = \sum_2 \dot{m}_2 \text{ (kg/s)}$$ **Équation 7.8**

C'est pourquoi, à l'état constant, la première loi de la thermodynamique peut être exprimée comme suit :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_1\left(h_1 + \frac{C_1^2}{2} + gz_1\right) - \dot{m}_2\left(h_2 + \frac{C_2^2}{2} + gz_2\right) \text{ (W)}$$ **Équation 7.9**

7.1.2.1.3 Rendements associés à la première loi : rendement thermique et coefficient de performance

En règle générale, le rendement d'un système thermique indique la relation entre l'énergie utile produite et la quantité d'énergie utilisée.

Le rendement thermique d'un moteur thermique est la fraction de la chaleur en entrée transformée en travail net en sortie :

$$\eta = \frac{W_{net,sortie}}{Q_{entrée}} \text{ (sans dimension)}$$ **Équation 7.10**

D'autres indicateurs de rendement sont les coefficients de performance (COP) d'un quelconque cycle de réfrigération (COPR) et d'un cycle de pompage de chaleur (COPHP), donnés par :

$$COP_R = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} \text{ (sans dimension)}$$ **Équation 7.11**

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \text{ (sans dimension)}$$ **Équation 7.12**

À la différence de l'efficacité thermique, la valeur de COP peut être supérieure à l'unité. Cela signifie, par exemple, que la quantité de chaleur éliminée de l'espace réfrigéré peut être supérieure à la quantité de travail en entrée.

7.1.2.2 Seconde loi de la thermodynamique : entropie.

La seconde loi de la thermodynamique nous permet de connaître les types de transformations possibles ou impossibles et le sens dans lequel elles se produisent. À l'instar de la première loi, la seconde loi peut être formulée de bon nombre de manières différentes et deux d'entre elles sont énoncées ci-dessous :

- il n'est pas possible de construire un moteur thermique qui ne produise aucun autre effet que l'échange de chaleur à partir d'une seule source initialement à l'état d'équilibre et la fourniture de travail. Les moteurs thermiques doivent toujours rejeter de la chaleur vers un réservoir d'énergie thermique ;
- aucun dispositif cyclique ne peut provoquer un transfert de chaleur à partir de réservoirs d'énergie thermique basse température vers des réservoirs haute température sans aucun autre effet.

Pour énoncer la deuxième loi sous une forme générale et utilisable, il est nécessaire de faire appel au concept d'entropie.

7.1.2.2.1 Entropie

Lorsque deux états stables d'un système sont reliés par différents processus réversibles en interne, l'intégrale de la chaleur échangée sur sa température ne dépend pas du chemin suivi par le processus. En d'autres termes, il existe une fonction qui dépend uniquement des propriétés d'état (ou des propriétés de l'état) du système : cette fonction est dénommée entropie. La variation d'entropie est définie comme suit :

$$\underbrace{S_2 - S_1}_{\substack{\textit{Variation}\\ \textit{d'entropie}}} = \underbrace{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)}_{\substack{\textit{Transfert d'entropie}\\ \textit{dans un processus}\\ \textit{réversible}}} \text{ (J/K)}$$

Équation 7.13

L'entropie est une propriété abstraite et peut être considérée comme une mesure du désordre. En utilisant l'entropie, il est possible d'introduire plusieurs formes de la seconde loi de la thermodynamique :

- l'entropie totale d'un moteur et la totalité des composantes de l'environnement qui interagissent avec le moteur doit augmenter lorsque le moteur thermique n'est pas complètement réversible
- les seuls processus qui peuvent se produire sont ceux pour lesquels l'entropie du système isolé augmente. (ce principe est connu en tant que règle d'augmentation de l'entropie).

7.1.2.2.2 Bilan d'entropie pour systèmes fermés

En raison de la nature irréversible de presque tous les processus réels, l'entropie n'est pas une propriété conservatrice. Le bilan d'entropie pour un système fermé est exprimé comme suit :

$$\Delta S = \underbrace{S_2 - S_1}_{\substack{\text{Variation}\\ \text{d'entropie}}} = \underbrace{\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)}_{\substack{\text{Transfert}\\ \text{d'entropie}}} + \underbrace{\sigma}_{\substack{\text{Production}\\ \text{d'entropie}}} \quad \text{(J/K)}$$

Équation7.14

Le terme le plus à droite de l'équation 7.14 est associé à un transfert de chaleur à destination ou en provenance du système au cours du processus et peut être interprété comme le transfert d'entropie accompagnant un transfert de chaleur. Une valeur positive signifie que l'entropie est transférée dans le système et une valeur négative signifie que l'entropie est transférée à l'extérieur du système. Il est dénommé production d'entropie et rend compte des irréversibilités engendrées au cours du processus. La production d'entropie est positive chaque fois que des irréversibilités ont lieu et nulle dans le cas idéal où aucune irréversibilité n'a lieu.

À partir de là, la quantité d'irréversibilités par le biais de la production d'entropie peut être mesurée avec un simple bilan d'entropie. Les irréversibilités sont des éléments clefs pour comprendre le processus de la dégradation énergétique et les dénommées techniques d'économie d'énergie et de conservation énergétique. Tandis que l'énergie n'est pas détruite mais simplement dégradée, la question clef de tout analyste de l'énergie est de mettre en évidence les irréversibilités présentes dans les processus et de proposer des solutions pour les éviter.

7.1.2.3 Bilan d'entropie pour un système ouvert

Le taux d'entropie à l'intérieur d'un volume de référence au cours d'un processus est égal à la somme du taux de transfert d'entropie à travers les limites du volume de référence par transfert de chaleur, le taux net du transfert d'entropie dans le volume de référence par flux massique et du taux de production d'entropie à l'intérieur des limites du volume de référence due aux irréversibilités :

$$\underbrace{\frac{dS_{cv}}{dt}}_{\substack{\text{Taux}\\ \text{de}\\ \text{variation}\\ \text{d'entropie}}} = \underbrace{\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j}}_{\substack{\text{Taux de}\\ \text{transfert}\\ \text{d'entropie}\\ \text{avec chaleur}}} + \underbrace{\sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e}_{\substack{\text{Taux}\\ \text{de}\\ \text{transfert}\\ \text{d'entropie}\\ \text{avec}\\ \text{masse}}} + \underbrace{\dot{\sigma}}_{\substack{\text{Taux}\\ \text{de}\\ \text{génération}\\ \text{d'entropie}}} \quad \text{(W/K)}$$

Équation7.15

Les termes $m_i s_i$ et $m_e s_e$ représentent les taux de transfert d'entropie vers le système et hors du système qui accompagnent l'écoulement massique. Q_j représente le taux temporel de transfert de chaleur à l'emplacement de la limite où la température instantanée est T_j. Le rapport Q_j/T_j correspond au taux associé au transfert d'entropie. Le terme σ dénote le taux temporel de production d'entropie en raison des irréversibilités à l'intérieur du volume de contrôle.

7.1.2.4 Analyse de l'exergie

7.1.2.4.1 Exergie

L'exergie d'un système thermodynamique est le travail théorique utile maximum (travail d'un arbre ou travail électrique) pouvant être obtenu si le système est amené à l'équilibre thermodynamique total avec l'environnement thermodynamique alors que le système interagit avec uniquement cet environnement. Un système est dit être à l'état inerte lorsqu'il est à l'équilibre thermodynamique avec son environnement. À l'état inerte, un système est à la température et à la pression de son environnement ; il n'a aucune énergie cinétique ou potentielle et il n'interagit pas avec l'environnement. L'exergie est une mesure de la variation de l'état d'un système par rapport à l'environnement. Lorsque l'environnement est spécifié, une valeur peut être assignée à l'exergie en termes de valeurs de propriété pour le système uniquement et l'exergie peut être considérée comme une propriété du système. La valeur d'exergie, telle que définie dans l'Équation 7.16, ne peut pas être négative et n'est pas conservée mais détruite par les irréversibilités. L'exergie spécifique sur une base massique unitaire est :

$$e = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + C^2/2 + gz \quad \text{(J/kg)}$$ **Équation 7.16**

L'indice 0 indique l'état inerte.
Lorsqu'une masse circule à travers les limites d'un volume de référence, il existe un transfert d'exergie accompagnant les flux massiques et de travail. On l'appelle exergie d'un flux spécifique ou exergie physique d'un flux de matière et on l'obtient par l'équation ci-après :

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + C^2/2 + gz \quad \text{(J/kg)}$$ **Équation 7.17**

7.1.2.4.2 Bilans d'exergie

Le bilan d'exergie pour un système fermé s'obtient avec la combinaison des bilans d'énergie et d'entropie. La variation d'exergie dans un système fermé est égale à la somme du transfert d'exergie accompagnant la chaleur, du transfert d'exergie accompagnant le travail, diminuée de la valeur d'exergie détruite. L'équation finale est la suivante :

$$\Delta E = \underbrace{E_2 - E_1}_{\substack{\textit{Changement}\\ \textit{d'exergie}}} = \underbrace{\int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)\delta Q}_{\substack{\textit{Chaleur}\\ \textit{accompagnant}\\ \textit{Le transfert}\\ \textit{d'exergie}}} - \underbrace{\left[W - P_0(V_2 - V_1)\right]}_{\substack{\textit{Travail}\\ \textit{accompagnant}\\ \textit{le transfert}\\ \textit{d'exergie}}} - \underbrace{T_0\sigma}_{\substack{\textit{Destruction}\\ \textit{d'exergie n}}} \quad \text{(J)}$$ **Équation 7.18**

T_0 et P_0 indiquent la température et la pression aux conditions ambiantes. Tj est la température de surface là où le transfert de chaleur a lieu. Le taux de variation d'exergie dans des systèmes ouverts est donné par l'équation suivante :

$$\underbrace{\frac{dE_{cv}}{dt}}_{\substack{Taux\\de\\changement\\d'exergie}} = \underbrace{\sum_i \left(1-\frac{T_0}{T_j}\right)\dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{cv} - P_0\frac{dVcv}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i\, e_i - \sum_e \dot{m}_e\, e_e}_{\substack{Taux\\de\\transfert\\d'exergie}} - \underbrace{\dot{I}}_{\substack{Taux\\de\\destruction\\d'exergie\ n}} \quad \text{(W)}$$

Équation 7.19

7.1.2.4.3 Rendement associé à la deuxième loi thermodynamique : rendement exergétique

Le rendement thermique et le coefficient de performance définis à la Section 2.1.3 reposent uniquement sur la première loi thermodynamique et ne font aucune référence aux meilleures performances possibles. Toutefois, le rendement exergétique ou rendement de la deuxième loi surmonte cette déficience et donne une mesure d'approximation à une opération réversible. Les rendements exergétiques sont utiles pour distinguer les moyens permettant d'utiliser des ressources énergétiques qui sont efficaces au plan thermodynamique de celles qui le sont moins. Ils permettent aussi d'évaluer l'efficacité des mesures techniques réalisées pour améliorer les performances d'un système thermique. Le rendement exergétique est défini sous une forme générique comme le rapport entre l'exergie récupérée et l'exergie fournie :

$$\varepsilon = \frac{E_{récupérée}}{E_{fournie}} \quad \text{(sans dimension)}$$

Équation 7.20

Le rendement exergétique est exprimé sous de nombreuses formes différentes en fonction du système analysé. Pour un moteur thermique, l'exergie fournie est la diminution de l'exergie de la chaleur transférée au moteur, soit la différence entre l'exergie de la chaleur fournie et l'exergie de la chaleur rejetée. La sortie nette en travail est égale à l'exergie récupérée. Pour un réfrigérateur ou une pompe à chaleur, l'exergie fournie est égale à l'apport de travail ; l'exergie récupérée est quant à elle l'exergie de la chaleur transférée vers le milieu à température élevée pour une pompe à chaleur et l'exergie de la chaleur transférée à partir du milieu basse température pour un réfrigérateur.

7.1.3 Diagrammes de propriétés et tables, banques de données et programmes informatiques

7.1.3. 1 Diagrammes des propriétés

Selon le postulat relatif à l'état, si l'une quelconque des deux variables d'état d'un corps pur simple sont spécifiées, la troisième est déterminée. Ceci implique que l'état de ladite substance peut être représenté sous forme de diagramme avec deux propriétés indépendantes. Les cinq propriétés de base d'une substance, qui sont habituellement représentées sur des diagrammes de propriété sont : la pression *(P),* la température *(T),* le volume spécifique *(v),* l'enthalpie spécifique *(h),* l'entropie spécifique (s) et la qualité (x), si un mélange de deux phases est impliqué. Les diagrammes de propriété les plus courants sont : pression-température (P-T), pression-volume spécifique (P-v), température-volume spécifique (T-v), température-entropie (spécifique) (T-s) et enthalpie (spécifique) – entropie (spécifique) (h-s). Ces diagrammes sont un bon moyen de présenter des processus sous forme graphique. En outre, les trois premiers diagrammes permettent d'expliquer les relations entre les trois phases de la matière.

La Figure 7.1 est un exemple de diagramme T-s. Les diagrammes T-s sont couramment utilisés en thermodynamique, parce qu'ils sont très utiles pour visualiser les irréversibilités des processus. Les lignes volume constant, pression constante et - enthalpie constante peuvent être observées sur les diagrammes T-s. Les lignes verticales des diagrammes T-s représentent les processus, subissant une compression/expansion isentropique (entropie identique) tandis que les lignes horizontales sous la courbe en cloche représentent des changements de phase isotherme (vaporisation/condensation).

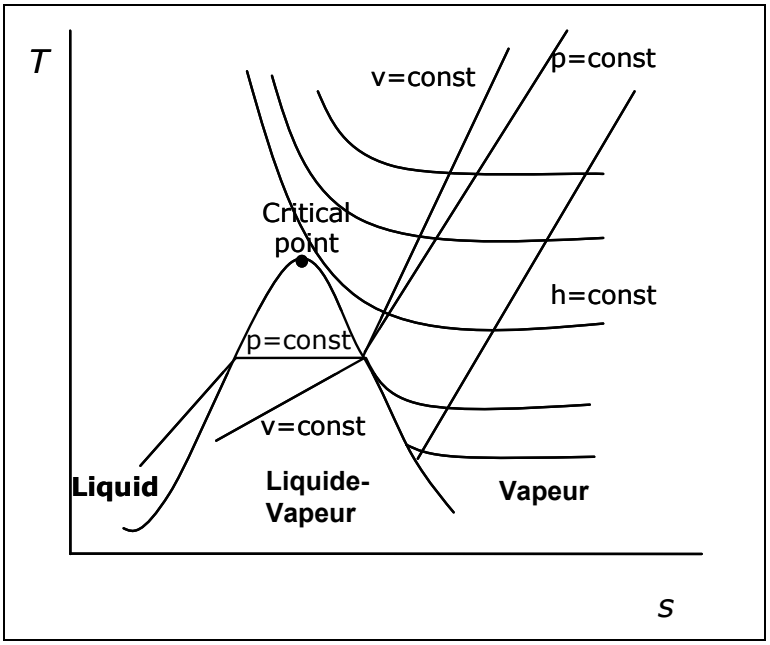


Figure 7.1 : Diagramme température-entropie

7.1.3.2 Tables de propriétés, banques de données et programmes de simulation

Dans le monde réel, les tables ne suffisent pas et il est nécessaire de pouvoir disposer des propriétés thermodynamiques de nombreuses substances, à l'état pur ou en mélange. En réalité, des banques de données thermodynamiques complexes et des modèles de propriétés physiques associées constituent le cœur de tout simulateur d'énergie informatique. Le besoin en la matière est tel qu'un manque de précision ou un manque de données peut conduire à rejeter des solutions de conservation d'énergie très attrayantes. Heureusement, un nombre considérable de bases de données et de programmes informatiques sont disponibles dans la littérature et sur le marché. Le problème se pose de faire son choix avec les bons critères, même en présence de données contradictoires. Il est capital, dans de nombreux cas, de disposer d'informations de qualité, précises et à jour. Il s'agit d'un point fondamental lorsqu'on calcule des propriétés d'un mélange pour lequel des variations par rapport à un comportement non idéal sont courantes. Certains compilations de données majeures sont disponibles auprès de l'Institut américain du pétrole (American Petroleum Institute, (ou API) ; de l'Institut Beilstein de chimie organique, (ou Belstein) ; du Design Institute for Physical Property Data (ou DIPPR) de l'AIChE (American Institute of Chemical Engineers) ; du Deutsche Gesellshaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., ou DECHEMA ; du Physical Property Data Service, PPDS au Royaume-Uni ; et auprès d'autres organismes. Par exemple, le DIPPR a une compilation de données de corps purs globale tandis que le DECHEMA détient un volume considérable de composés. Des programmes de simulation, aux capacités de

calcul des propriétés thermodynamiques étendues, sont disponibles dans le commerce et faciles à trouver. Trois des programmes les plus couramment utilisés sont commercialisés : ASPEN PLUS, HYSIM et PRO/II. Toutefois, ces programmes informatiques peuvent effectuer plus qu'il n'est nécessaire à un analyste réalisant des calculs de routine pour déterminer des économies d'énergie, ou inversement, ils peuvent travailler d'une manière moins spécialisée. Ils sont onéreux à la fois en termes d'effort de manipulation, d'acquisition et de maintenance. EES, Thermoptim et BBlocks constituent des solutions intermédiaires qui permettent à l'analyste de composer ses propres solutions de simulation et qui comprennent les propriétés des corps purs. C'est pourquoi il est important que l'analyste consacre suffisamment de temps à déterminer ce qu'il va lui falloir acquérir. Partir de rien n'est pas souhaitable dans la plupart des cas.

7.1.3.3 Identification des inefficacités

Elles font l'objet d'une étude dans la Section 1.2.2.6

7.1.4 Nomenclature

Symbole	Signification	Unité
C	Vitesse	m/s
E	Exergie	J
$\dot{E}$	Taux d'exergie	J/s
e	Exergie par unité de masse	J/kg
E_T	Energie totale	J
g	Accélération de la gravité	m/s^2
H	Enthalpie	J
h	Enthalpie spécifique	J/kg
$I,$	Irréversibilité	J
$\dot{I}$	Taux d'irréversibilité	J/s
KN	Énergie cinétique	J
m	Masse	kg
$\dot{m}$	Taux de masse	kg/s
P, p	Pression	Pa
PT	Énergie potentielle	J
Q	Chaleur	J
$\dot{Q}$	Taux de chaleur	J/s
S	Entropie	J/K
s	Entropie spécifique	J/(kgK)
t	Temps	s
T	Température	K
U	Énergie interne, énergie	J
u	Énergie interne par unité de masse	J/kg
V	Volume	m^3
v	Volume spécifique	m^3/kg

Symbole	Signification	Unité
W	Travail	J
$\dot{W}$	Taux de travail	J
z	Élévation, position	m
Lettres grecques		
η	Efficacité thermique	-
ε	Efficacité exergétique	-
σ	Production entropique	J/K
$\dot{\sigma}$	Taux de production entropique	J/(kgK)
Indices		
0	Conditions ambiantes	
av	Moyenne de la propriété considérée	
C	Compresseur	
cv	Volume de référence	

7.1.4.1 Bibliographie

- Anderson, E. E. Thermodynamics. International Thomson Publishing. 1994.
- Avallone, E. A. Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers. 9th Edition. Mc Graw Hill.1978
- Bejan, A.; Tsatsaronis, G. and Moran, M. Thermal Design and Optimization. Wiley Interscience. 1996.
- Çengel, Y. A. and Boles, M. A. Thermodynamics: an engineering approach. International Edition. Mc Graw Hill. 1994.
- Danner R.P.; Spencer C.F.; Nagvekar M. Thermophysical Properties for Design Simulations in Developments in the Design of Thermal Systems, Ed. By R.F. Boehm, Cambridge Univ. Press, 1997
- Hering, E. and Modler, K. Grundwissen des Ingenieurs. München: Carl Hanser Verlag, cop. 2002
- Lozano, M.A. and Valero, A. Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial. Ingeniería química. Marzo 1986.
- Moran, M. J. and Shapiro, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 4th Edition. John Wiley & Sons. 2000.
- Moran, M. J.; Shapiro, H.N.; Munson, and Dewitt. Introduction to thermal systems engineering. John Wiley & Sons. 2003
- Moore, W.J. Physical Chemistry, 1974
- Perry, R. H. and Green, D. Perry's chemical engineers' handbook. Mc Graw Hill. 1984.
- The CRC Handbook of thermal engineering. Kreith F. Editor in chief. CRC Press Springer. 2000.
- Valero, A. and Lozano, M.A. Los balances de energía, entropía, exergía y energía libre. Métodos para el diagnóstico de instalaciones industriales. Ingeniería química. Mayo 1987.
- Valero, A. and Lozano M.A. An Introduction of Thermoeconomics in Developments in the Design of Thermal Systems, Ed. By R.F. Boehm, Cambridge Univ. Press, 1997

- Valero-Capilla A. and Valero-Delgado A. Fundamentals of energy thermodynamics, 2005
- Wark, K. Thermodynamics. Mc Graw Hill. 1983

7.2 Études de cas d'irréversibilités thermodynamiques

7.2.1 Cas 1. Dispositifs d'étranglement

Les dispositifs d'étranglement sont courants dans l'industrie et permettent de réguler et de réduire la pression principalement par le biais de vannes. Étant donné que le processus d'étranglement est isenthalpique (à enthalpie constante en amont et en aval), il n'y a aucune perte d'énergie et en vertu de la première loi de la thermodynamique, le rendement énergétique est optimal.

Toutefois, il s'agit d'une irréversibilité mécanique type qui réduit la pression et augmente l'entropie du fluide, sans contrepartie bénéfique. Il y a donc perte d'exergie et diminution de la capacité du fluide à produire de l'énergie par exemple dans un processus de détente dans une turbine.

C'est pourquoi, si l'objectif est de réduire la pression d'un fluide, il est souhaitable de rechercher une détente isentropique avec effet complémentaire de production de travail utile par le biais d'une turbine. Si cela n'est pas réalisable, la pression de travail doit toujours être la plus élevée possible parce qu'on évite ainsi l'emploi de compresseurs ou de pompes pour le transport des fluides (énergie utile supplémentaire).

Une pratique très fréquente dans les installations industrielles consiste à conserver la pression à l'entrée de la turbine aux conditions théoriques de conception. Elle implique habituellement l'utilisation parfois abusive de vanne d'admission pour réguler la turbine. Selon la deuxième loi, il est plus avantageux d'avoir un flottement des spécifications de pression (pression glissante) et de laisser les vannes d'admission totalement ouvertes.

À titre de recommandation générale, les vannes doivent être dimensionnées de manière à être aussi grandes que possible. Un processus d'étranglement satisfaisant peut être obtenu avec une chute de pression de 5 à 10 % au flux maximum et non pas avec une chute de pression de 25 à 50 % comme c'était le cas dans le passé, lorsque les vannes étaient de petite dimension. Il va de soi que la pompe acheminant le fluide doit également être dimensionnée en fonction des conditions des variables.

Enfin, il faut insister sur le fait que les tuyaux ont également un rôle de dispositifs d'étranglement, en faisant diminuer la pression du fluide les parcourant. C'est pourquoi, une bonne conception associée à de bons matériaux et à aussi peu d'obstacles que possible, tels que des vannes, des coudes, des cintrages inutiles, etc. vont limiter les pertes d'exergie à travers le processus.

Dans tous les cas, il est manifeste qu'il convient de procéder à un inventaire des exergies prenant en compte tous les niveaux d'énergie existants dans l'installation, parce que, du point de vue de la première loi, les irréversibilités sont très difficiles, voire impossibles à identifier.

Exemple numérique

Au cours de la mise en service d'une unité dans une centrale électrique, la vapeur extraite de la turbine haute pression (P = 40 kg/cm^2, T = 350 ºC) sert à alimenter une turbopompe.

Étant donné que la turbopompe fonctionne à une pression d'entrée de 8 kg/cm^2, la vapeur provenant de la turbine haute pression doit être étranglée (voir Figure 7.2). Dans l'exemple thermodynamique suivant, les variables de la vapeur sont évaluées au niveau de l'entrée et de la sortie de la vanne. Le processus est représenté sur les diagrammes T-s et h-s (voir Figure 7.3) et le flux d'exergie est obtenu lorsque le flux nominal est de 45 000 kg/h.

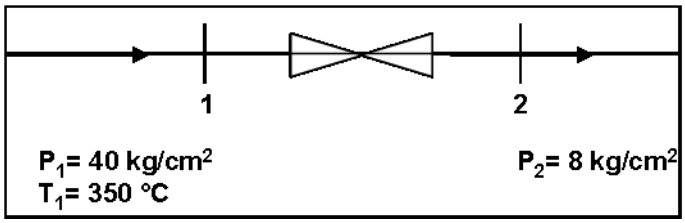


Figure 7.2 : Processus d'étranglement de la vapeur

Solution

La première loi de la thermodynamique révèle que le processus est isenthalpique étant donné qu'aucun transfert de travail ou de chaleur n'est associé au processus d'étranglement :

$$0 = m_1(H_2 - H_1) \Rightarrow H_2 = H_1 \qquad \textbf{Équation 7.21}$$

L'enthalpie et l'entropie spécifiques obtenues au moyen des tables de propriétés sont :

- à P_1 et T_1:
  - h_1 = 3091,95 kJ/kg et S_1 = 6,58 kJ/kg K
- à P_2 et $h_2 = h_1$
  - T_2 = 319 ºC
  - S_2 = 7,30 kJ/kg K

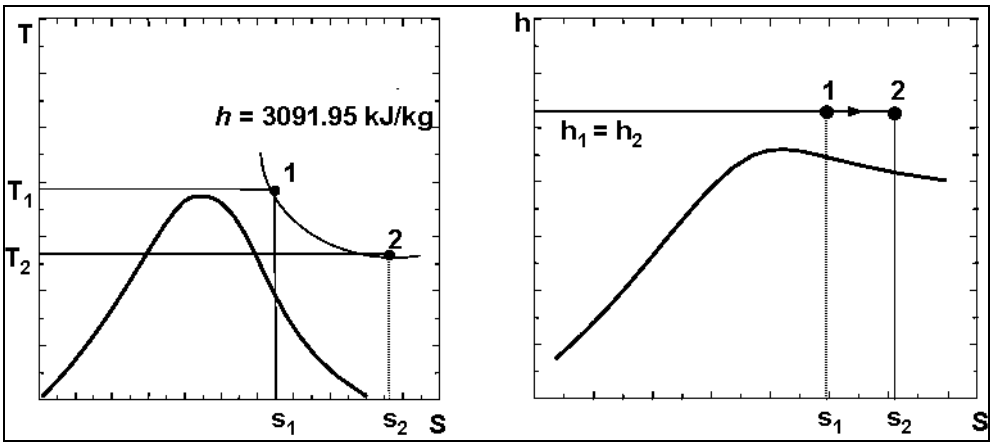


Figure7.3 : Diagrammes T-S et h-S pour le processus d'étranglement de la vapeur de l'exemple

L'exergie spécifique du flux est calculée comme suit :

$$e = H - T_0 s \qquad \textbf{Équation 7.22}$$

Où T_0 = 273 K et l'énergie potentielle et l'énergie cinétique sont considérées comme étant négligeables. D'où :

- e_1 = 3091,95 – 273 x 6,58 = 1295,61 kJ/kg

et

- e_2 = 3091,95 – 273 x 7,30 = 1099,05 kJ/kg

Ce processus est complètement irréversible (irréversibilité mécanique). La perte d'exergie est obtenue par le biais d'un bilan exergétique effectué sur le système. Étant donné qu'il n'y a pas de transfert de chaleur ou de travail, le bilan exergétique se réduit à :

$$I = m(e_1 - e_2) = 45000 kg/h * \frac{1}{3600} s/hx(1295.61 - 1099.05) = 2457 kW = 2.457 MW$$

7.2.2 Cas 2. Échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs où deux flux échangent de la chaleur. Chaque transfert de chaleur est le résultat d'une différence de température et est par conséquent toujours associé à une génération d'entropie et à une destruction d'exergie. C'est pourquoi, il y contradiction entre l'idée de perte d'exergie minimum et celle d'un transfert de chaleur à rendement maximum.

Dans un échangeur de chaleur à contre-courant comme celui représenté sur la Figure 7.4, où un fluide chaud à $T_{1,entrée}$ est refroidi jusqu'à une température $T_{1,sortie}$, en libérant de la chaleur vers un fluide froid qui se réchauffe et passe de $T_{2,entrée}$ à $T_{2,sortie}$, la perte d'exergie dans le processus est calculée comme suit :

Les variations d'énergie cinétique et potentielle sont habituellement négligeables et il n'y a aucune interaction sous forme de travail. En première approximation, la chute de pression peut également être considérée comme négligeable. L'irréversibilité créée dans l'échangeur de chaleur est donnée par :

$$I = (e_{1,entrée} + e_{2,entrée}) - (e_{1,sortie} + e_{2,sortie}) = (h_{1,entrée} + h_{2,entrée}) - (h_{1,sortie} + h_{2,sortie})$$

$$- T\,[(s_{1,entrée} + s_{2,entrée} - (s_{1,sortie} + s_{2,sortie})] = T_0\,[m_1 Cp_1 \ln \frac{T_{1,sortie}}{T_{1,entrée}} + m_2 Cp_2 \ln \frac{T_{2,sortie}}{T_{2,entrée}} \qquad \textbf{Équation 7.23}$$

Il peut être démontré à partir de l'équation ci-dessus que I est toujours positif et augmente avec les différences de température au niveau de l'entrée et de la sortie des fluides dans l'échangeur à contre-courant et entre le haut et le bas d'un échangeur à flux co-courant. Dans tous les cas, un échangeur à contre-courant est toujours meilleur qu'un échangeur à flux co-courant du point de vue de l'exergie, parce que l'exergie est toujours transférée vers un système à température similaire.

Les irréversibilités ayant lieu dans les échangeurs de chaleur ont pour origine deux facteurs : un transfert de chaleur résultant d'une différence de température et une chute de pression associée à la circulation des fluides. Il est possible de réduire à la fois le frottement du fluide et le transfert de chaleur irréversible par une réduction de l'écoulement des fluides. Toutefois, afin d'obtenir le même effet d'échange de chaleur, une zone de transfert plus importante est nécessaire : en d'autres termes, il faut concevoir des échangeurs de chaleur plus gros.

L'idée d'étendre l'utilisation d'un échangeur de chaleur à contre-courant à l'ensemble de l'installation, c'est-à-dire de l'étendre à tous les flux devant être chauffés ou refroidis dans l'installation, de sorte que la variation de température par laquelle doit s'écouler la chaleur soit raisonnablement basse, conduit à l'intégration énergétique des processus et à l'utilisation de cascades énergétiques. Il s'agit de la philosophie de la méthode « pinch », développée pour l'intégration des réseaux d'échangeurs de chaleur. Cette intégration peut également être étendue aux cycles de puissance, aux pompes à chaleur et aux cycles de réfrigération de la manière la plus efficace. En résumé, cette procédure assure la plus faible consommation de vapeur (ou d'une quelconque autre source de chaleur) et la plus faible quantité d'eau de refroidissement (ou d'une quelconque autre source de froid) dans les conditions thermodynamiques et techniques qui peuvent être évaluées.

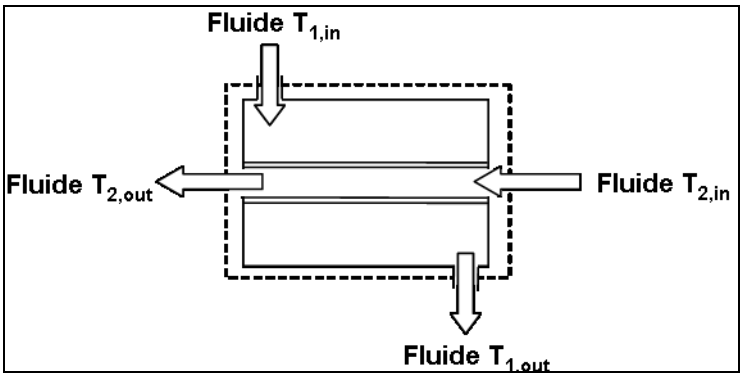


Figure 7.4 : Échangeur de chaleur à contre-courant

Exemple numérique

Dans un resurchauffeur de chaudière (voir Figure 7.5), 1 100 000 kg/h de vapeur sont chauffés de 350 à 540 ºC à une pression de 40 kg/cm^2. La chaleur absorbée par la vapeur provient des gaz d'échappement d'un procédé de combustion. La température moyenne à laquelle se produit le transfert de chaleur est de 1 000 ºC. Sur la Figure 7.6, le processus est représenté sous forme des diagrammes T-s et h-s et la chaleur absorbée par la vapeur ainsi que les pertes d'exergie sont déterminées.

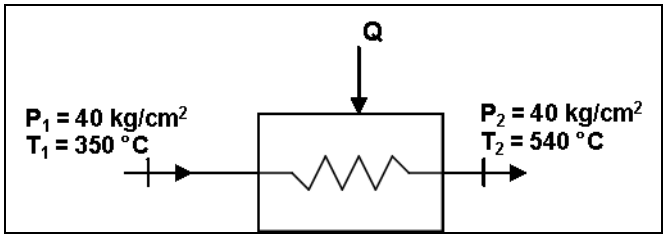


Figure 7.5 : Processus de surchauffe d'un flux de vapeur

Solution
Le bilan énergétique du système considéré sur la Figure 7.5 est :

- $m (h_2 – h_1) = Q$

L'enthalpie et l'entropie spécifique obtenues par les tables de propriétés sont :

- à P_1 et T_1:
  - $h_1 = 3091,95$ kJ/kg et
  - $s_1 = 6,58$ kJ/kg K
- à P_2 et T_2
  - $h_2 = 3530,85$ kJ/kg et
  - $s_2 = 7,21$ kJ/kg K

d'où le transfert de chaleur obtenu est :

- $Q = 11\ 100\ 000 \times (3530,85 – 3091,95) = 438,9$ kJ/kg $= 482,7 \times 10^6$ kJ/h

Les diagrammes T-s et h-s sont représentés sur la Figure 7.6 :

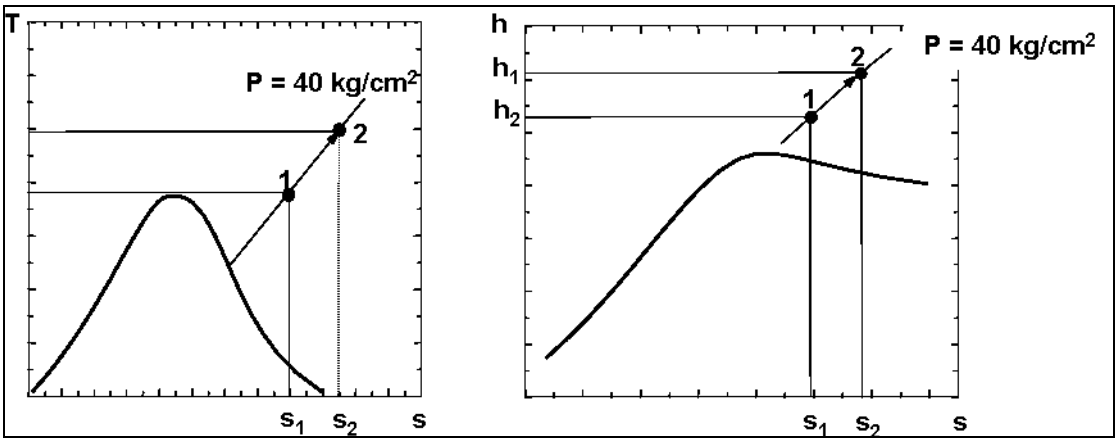


Figure 7.6 : Diagrammes T-s et h-s pour le processus de surchauffe de la vapeur de l'exemple

L'exergie du flux spécifique est calculé comme suit :

$e = h – T_0 s$

Où $T_0 = 273$ K et l'énergie potentielle et cinétique sont considérées comme étant négligeables. D'où :

$e_1 = 3091,95 – 273 \times 6,58 = 1295,61$ kJ/kg

et

$e_2 = 3530,85 – 273 \times 7,21 = 1562,52$ kJ/kg

La perte d'exergie générée est donnée par :

$$I = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_1(e_1 - e_2) \Rightarrow$$

$$I = \left(1 - \frac{273}{1273}\right) 482.7 \times 10^6 + 1.1 \times 10^6 (1295.61 - 1562.52) = 85.82 \times 10^6 \text{kJ/h} = 23.84 \text{ MW}$$

7.2.3 Cas 3. Procédés de mélangeage

Le mélange de fluides ayant différentes compositions ou températures est un autre processus très courant dans l'industrie. Ce concept comprend des processus de tempérage pour le contrôle de la température, des processus de mélangeage pour le contrôle de la qualité, des processus de purification des substances, la distillation, etc.

Par exemple, un mélange adiabatique de deux flux de gaz idéaux différents à la même température et à la même pression et où n_1 et n_2 sont égaux au nombre de moles de chaque flux. La génération d'entropie dans le procédé de mélangeage correspond à la somme de l'augmentation d'entropie de chaque gaz du mélange en raison de leurs expansions de P à leur nouvelle pression partielle. D'où :

$$\sigma = \frac{1}{n_1 + n_2}\left[n_1 R \ln\frac{P_1}{P} - n_2 R \ln\frac{P_2}{P}\right] = -R\sum x_i \ln x_i \text{ (J/K)}$$

Étant donné que $P_i = x_i P_i$ et $x_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$ la perte d'exergie est calculée comme suit :

$I = T_0\sigma = - RT_0\sum x_i \ln x_i$ (J)

Cette expression est toujours positive et symétrique par rapport à la valeur $x_i = 0{,}5$. Elle tend vers zéro lorsque x_i tend vers zéro (pureté maximum). La Figure 7.7 montre I_i/RT_0 par rapport à la fraction molaire d'un composant du mélange x_i. L'exergie maximum est atteinte lorsque $x_i = 0$, mais dans ces conditions, il est relativement facile de séparer les deux composants. Comme le mélange est purifié, la perte d'exergie par mole de composants séparés augmente.

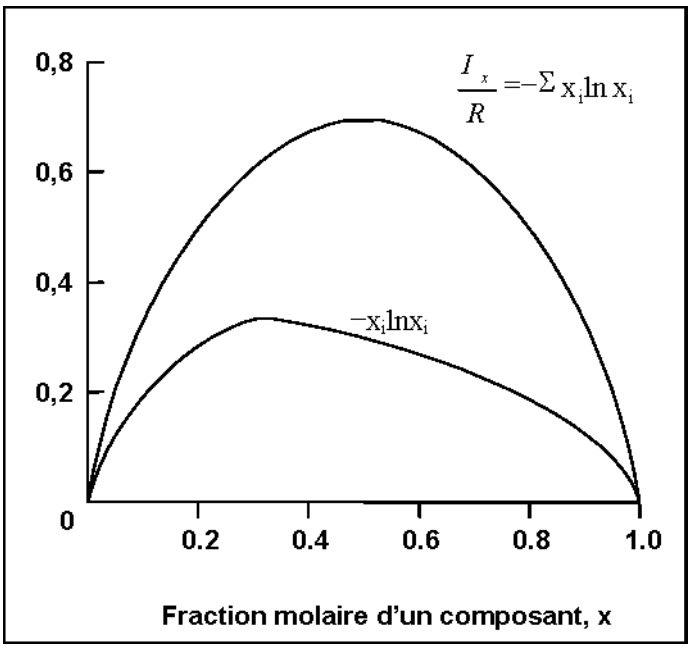


Figure 7.7 : I_i/RT_0 par rapport à une fraction molaire d'un composant du mélange

Pour le système binaire considéré, l'irréversibilité est égale à :

$$I = -RT_0\left[x\ln x + (1-x)\ln(1-x)\right] \quad \text{et} \quad \frac{dI}{dx} = -RT_0 \ln\left[\frac{x}{(1-x)}\right]$$

Certaines des valeurs de cette dérivée sont présentées dans le Tableau 7.1 :

x	I/RT_0	$(1/RT_0)$ dI/dx
0,10	0,325	2,20
0,01	0,056	4,96
10 - 3	7,91 x 10 - 3	6,91
10 - 4	1,02 x 10 - 3	9,21

Tableau 7.1 : Quelques valeurs des dérivées

Cette dérivée indique le travail requis pour améliorer la pureté du produit et la facilité avec laquelle il peut être pollué. En d'autres termes, la valeur d'exergie produite est liée à cette dérivée. Les mélanges multi-composants se comportent de la même manière. La valeur maximum de la fonction $-\sum x_i \ln x_i$ qui est réalisée pour des mélanges équimolaires est représentée dans le Tableau 7.2 :

N	$-\sum x_i \ln x_i$	N	$-\sum x_i \ln x_i$
2	0,693	5	1,609
3	1,099	7	1,946
4	1,386	10	2,302

Tableau 7.2 : Valeurs maximum pour les mélanges

Au fur et à mesure que le nombre de composants du mélange augmente, les effets d'irréversibilité deviennent plus dramatiques. Il s'ensuit un jeu de recommandations relatives aux économies d'énergie dans les processus mixtes. Tout d'abord, il importe avant tout d'éviter des processus mixtes chaque fois que possible. L'obtention d'une

vapeur de qualité élevée ou d'une substance très pure nécessite une grande quantité d'exergie qui est pour la plupart perdue en cas de mélange avec un flux de moindre qualité, (même si la perte d'énergie est nulle). Ensuite, les spécifications de qualité d'un certain produit doivent être respectées et par-dessus tout, dès lors qu'elles sont dépassées, ce produit ne doit jamais être mélangé avec des flux de moindre qualité.

De cette manière, si un produit ayant une pureté de 0,1 % est mélangé de manière équimolaire avec un autre produit ayant une pureté de 1 %, le produit final aura une pureté de 0,55 %, mais la valeur exergétique de ce produit va diminuer considérablement eu égard à chacun des flux, du fait de la relation à la dérivée $\frac{dI}{dx}$ et non à la valeur moyenne de la composition.

Certaines spécifications de qualité des produits doivent être revues et si possible « adoucies ». Il s'agit d'un élément fondamental de l'industrie chimique, où il est très courant de trouver une matière partiellement raffinée avec des produits surpurifiés ou des mélanges de produits provenant de deux unités parallèles pour obtenir une pureté moyenne.

Exemple numérique

Un flux de vapeur à une pression de 180 kg/cm^2 et à une température de 550 ºC est mélangé avec un liquide saturé à 180 kg/cm^2, afin d'atteindre les spécifications théoriques de température de certains équipements (voir Figure 7.8).

Sur la Figure 7.9, la température finale du mélange et la perte d'exergie sont obtenues lorsque le débit massique de la vapeur est de 1 100 000 kg/h et lorsque celui du liquide est de 30 000 kg/h.

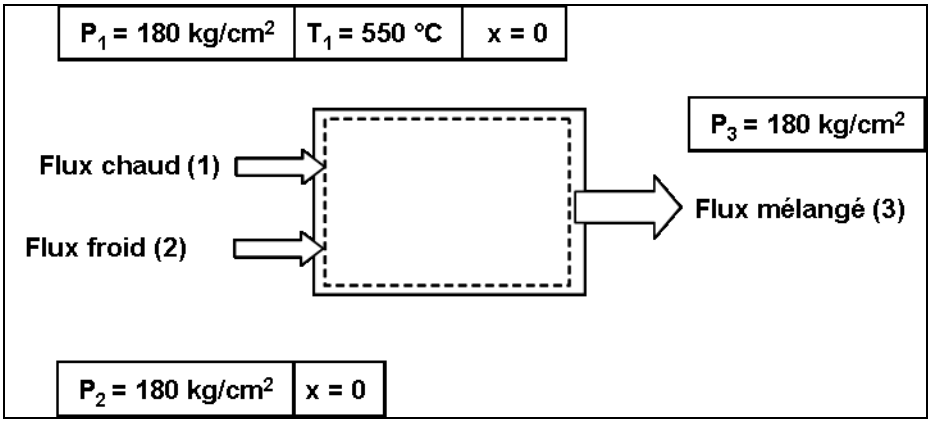


Figure 7.8 : Chambre de mélange de deux flux

Solution

Le bilan massique du système est :

$$m_1 + m_2 = m_3$$

Étant donné qu'il n'y a ni transfert de travail ni transfert de chaleur vers le processus et que l'énergie cinétique et l'énergie potentielle peuvent être considérées comme étant nulles, le bilan énergétique se limite à :

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = (m_2 + m_1) h_3$$

À P_1 et T_1, l'enthalpie et l'entropie spécifiques obtenues par le biais des tables de propriétés sont : h_1 = 3414,2 kJ/kg et s_1 = 6,41 kJ/kg K respectivement. Pour le liquide saturé dans le flux froid (2), il suffit d'une seule propriété (dans ce cas la pression) pour définir l'état : h_2 = 1 717,06 kJ/kg et s_2 = 3,85 kJ/kg K. À partir du bilan énergétique appliqué ci-dessus, il résulte :

$$h_3 = \frac{1.1 \times 10^6 (3414.2) + 30 \times 10^3 (1717.06)}{1.13 \times 10^6} = 3369.14 \text{ kJ/kg}$$

Au flux mixte (3), avec h_3 et P_3, T_3 = 534 ºC et s_3 = 6,35 kJ/kg K.
Il est possible d'obtenir la variation de l'enthalpie et de l'entropie spécifiques à l'aide des tables de propriétés. L'exergie du flux spécifique est calculée, avec T_0 = 273 K et l'énergie potentielle et l'énergie cinétique sont considérées comme étant négligeables. D'où :

e_1 = 1 664,52 kJ/kg,	e_2 = 666,67 kJ/kg	et	e_3 = 1 634,55 kJ/kg

L'irréversibilité est obtenue au moyen du bilan exergétique :

$I = m_1(e_1 - e_3) + m_2 (e_2 – e_3)$ =>
$I = 1,1 \times 10^6(1664,52 – 1634,55) + 30 \times 10^3(666,67 – 1634,55) = 3,76 \times 10^6$ kJ/h = 1,04 MW

Le diagramme T-s est représenté sur la Figure 7.9 :

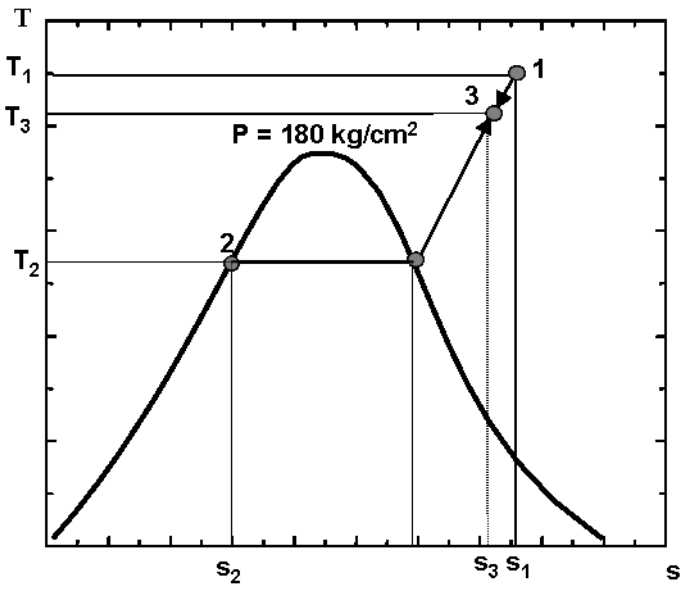


Figure 7.1 : Diagramme T-s pour le procédé de mélangeage de l'exemple

Remarques pour les trois études de cas

Les irréversibilités sont les effets d'un quelconque système d'énergie pouvant être amélioré. Outre le fait d'éviter des différences de pression, de température et/ou de potentiel chimique finies, les causes d'une conception énergétique médiocre

proviennent du découplage de l'offre et de la demande. Le temps joue un rôle important dans les systèmes d'efficacité énergétique. Les systèmes énergétiques diminuent spontanément leur pression, température et potentiel chimique pour parvenir à l'équilibre avec leur environnement. Pour éviter cela, il existe deux stratégies :

- coupler immédiatement les donneurs d'énergie avec les accepteurs d'énergie
- stockage : enfermer un système à l'intérieur de parois rigides pour la pression, de parois adiabatiques pour la température et/ou confiner les systèmes chimiques dans des états métastables.

En d'autres termes, il faut confiner les systèmes dans des réservoirs qui conservent leurs propriétés intensives constantes dans le temps.

7.3 Exemple d'application de l'efficacité énergétique

7.3.1 Craqueur d'éthylène

Les craqueurs d'éthylène convertissent une charge d'alimentation issue de la raffinerie, en éthylène et en propylène qui forment à leur tour la principale charge d'alimentation de l'industrie des polymères. Les craqueurs d'éthylène sont très gourmands en énergie. Les coûts d'énergie représentent plus de 50 % des coûts d'exploitation d'une unité.

Les charges d'alimentation (Fi) sont généralement le naphta, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) et le gazole provenant des raffineries. Les principaux produits (P_1) sont l'éthylène et le propylène. Au sein de cette industrie toutefois, il est coutumier d'ajouter trois autres produits à valeur élevée aux principaux produits à des fins de comparaison : le butadiène, le benzène et l'hydrogène. Le butadiène et le benzène ne sortent pas d'un craqueur sous forme de produits purs. Le butadiène fait partie du flux C_4 et le benzène du flux pétrole du craqueur. Ils sont habituellement extraits dans des unités d'extraction prévues à cet effet qui ne font pas partie du tableau global des craqueurs d'éthylène.

En général, le rapport entre ces produits à valeur élevée et l'éthylène varie dans une fourchette étroite (entre 1,7 et 2,3) et dépend des conditions de craquage et de la qualité/type de la charge d'alimentation.

Pour les usines pour lesquelles les aspects économiques sont essentiellement dictés par la production d'éthylène, un indicateur énergétique beaucoup plus significatif peut consister à diviser la consommation d'énergie par la production d'éthylène plutôt que par celle des produits chimiques à valeur élevée.

Vecteurs énergétiques

- vapeur : un craqueur d'éthylène type comporte, en règle générale, plusieurs niveaux de vapeur (un niveau haute pression d'approximativement 100 bar g, un niveau moyenne pression d'approximativement 20 bar g et un niveau basse pression d'approximativement 4 bar g). En fonction de la configuration, le craqueur importe de la vapeur à certains niveaux et en exporte à d'autres.
- électricité : la plupart des craqueurs sont des consommateurs nets d'électricité. Les craqueurs équipés d'un dispositif de cogénération peuvent être des exportateurs nets d'électricité. À l'intérieur de l'industrie, la convention consiste à utiliser un facteur

de conversion de 37,5 % pour convertir l'électricité en énergie primaire lors de la comparaison des différentes usines.

- eau chaude : la plupart des craqueurs produisent des quantités relativement importantes d'eau chaude. Toutefois, dans la plupart des cas, la température de cette eau chaude est trop basse pour être utilisée par d'autres installations mais, dans certains cas, une intégration avec d'autres installations ou des consommateurs extérieurs s'avère possible. Dans ce cas, un crédit doit être accordé pour l'exportation de ces calories. Ainsi, une amélioration de l'efficacité énergétique est déterminée par une circonstance « extérieure », indépendante des caractéristiques de performances « intrinsèques » de l'unité examinée qui est la possibilité réelle d'utiliser un flux de sortie pour une tâche qui sinon devrait être satisfaite avec un apport d'énergie primaire supplémentaire. En conséquence, deux unités ayant les mêmes « performances intrinsèques » peuvent être évaluées différemment si l'une d'elles parvient à trouver un débouché énergétique pour l'un de ses flux de sortie (intégration thermique).
- combustible : la plupart des craqueurs produisent un combustible liquide (combustible de pyrolyse) et un combustible gazeux (un mélange riche en méthane). La majeure partie du combustible gazeux est recyclée pour alimenter les fours de production d'éthylène. Selon la configuration et le mode d'exploitation, le combustible gazeux produit peut suffire à lui seul à alimenter tous les fours tandis que l'excédent produit est exporté, ou s'il ne suffit toujours pas, il faut alors importer un combustible externe, généralement du gaz naturel. Seul le combustible consommé en interne par le craqueur d'éthylène est pris en compte dans le bilan énergétique. Tous les combustibles exportés sont comptabilisés en tant que produits (ce qui est logique puisque la valeur du combustible est déjà présente dans la charge d'alimentation).
- eau de refroidissement : tous les craqueurs utilisent une eau de refroidissement. Les tours de refroidissement font quelquefois partie d'un craqueur d'éthylène, mais il n'en reste pas moins que cette eau de refroidissement provient de tours qui fournissent également une eau de refroidissement à d'autres unités de production. Dans ce cas, il arrive souvent que l'énergie liée à la production d'eau de refroidissement ne soit pas comptabilisée lors du calcul de l'efficacité énergétique du procédé.
- les procédés d'éthylène utilisent également d'autres utilités telles que N_2 et l'air comprimé. Ces utilités sont souvent produites d'une manière centrale sur le site ou par une société tierce. L'énergie liée à ces utilités n'est pas souvent comptabilisée.

7.3.2 Production de monomère d'acétate de vinyle (VAM)

Certains des composants proposés pour calculer le facteur d'intensité énergétique (EIF) ne sont pas nécessairement applicables à chaque procédé. C'est pourquoi, il faut y apporter des modifications en fonction des besoins dominants.

Considérons par exemple une usine de monomère d'acétate de vinyle (VAM). Plusieurs composants d'une usine VAM ne sont pas mesurés ou quantifiés (repérés par un ? sur la Figure 7.10) tandis que d'autres le sont facilement (repérés par ✓ sur la Figure 7.10), voir Figure 7.10.

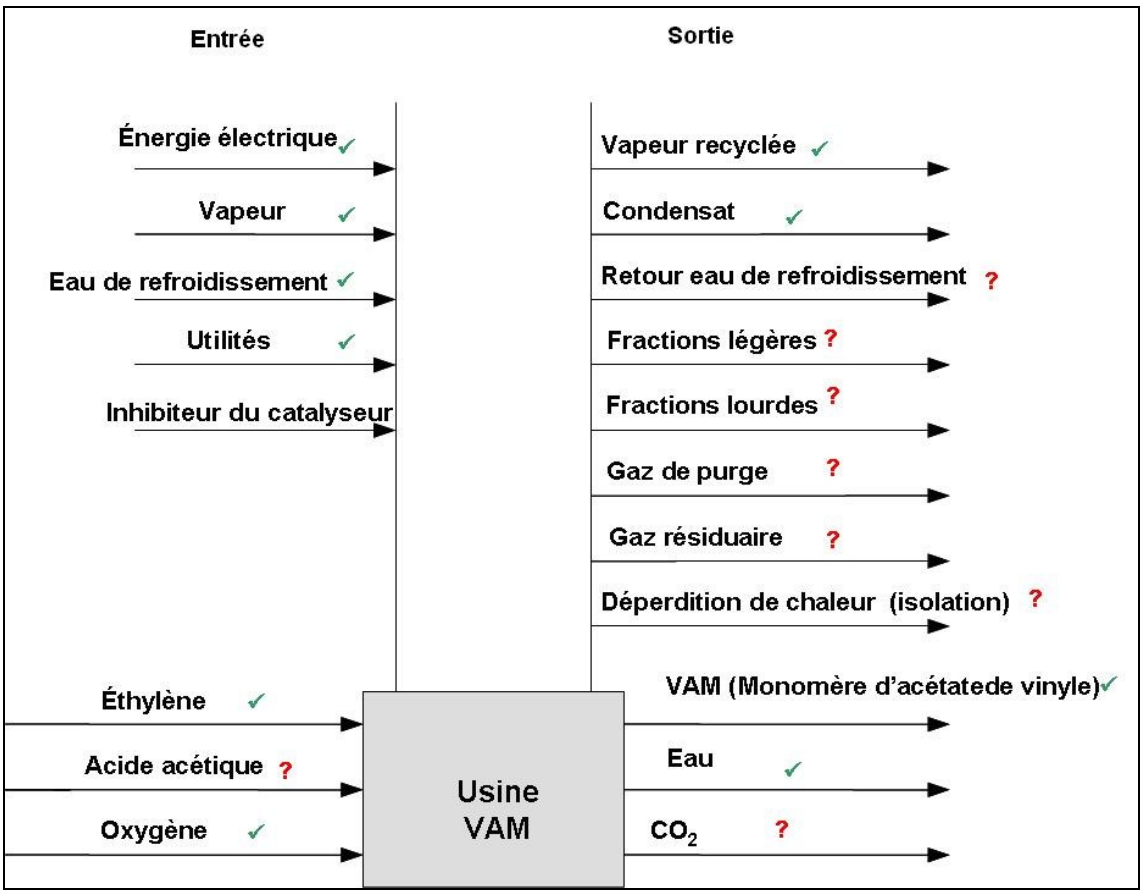


Figure 7.10 : Entrées et sorties d'une usine de monomère d'acétate de vinyle (VAM)

Les pertes thermiques par isolation et celles dues au retour de l'eau de refroidissement ne doivent jamais être comptabilisées ni dans l'EIF ni dans l'EEI. Les gaz résiduaires et les gaz de purge ne doivent pas être comptabilisés s'ils sont incinérés sans récupération de chaleur. Pour ces éléments, il peut toutefois s'avérer utile d'avoir un meilleur aperçu de leur ordre de grandeur afin de vérifier le potentiel économique nécessaire pour réduire ces pertes ou ces flux de déchets.

Par opposition, une plus grande réflexion est nécessaire sur les autres éléments tels que les fractions légères et les fractions lourdes ou si les gaz résiduaires et/ou de purge sont valorisés dans d'autres procédés. Dans le modèle proposé, ces flux n'ont pas été inclus et l'on suppose que la teneur en combustible de ces flux est déjà présente dans la charge d'alimentation. Toutefois, il appartient à l'exploitant de définir comment comptabiliser ces éléments.

7.3.3 Laminoir à chaud d'une aciérie

La matière première d'un laminoir est constituée de brames d'acier plates ayant une épaisseur d'approximativement 20 centimètres, qui sont étirées en bandes d'une épaisseur de quelques millimètres. Le laminoir comprend des fours, des équipements de laminage, des équipements de refroidissement et divers systèmes d'appui technique notamment des pompes, des ventilateurs, des systèmes hydrauliques et de lubrification, des éclairages, un atelier mécanique, un espace pour le personnel, des vestiaires, etc.

La Figure 7.11 représente un schéma de procédé d'un laminoir à chaud.

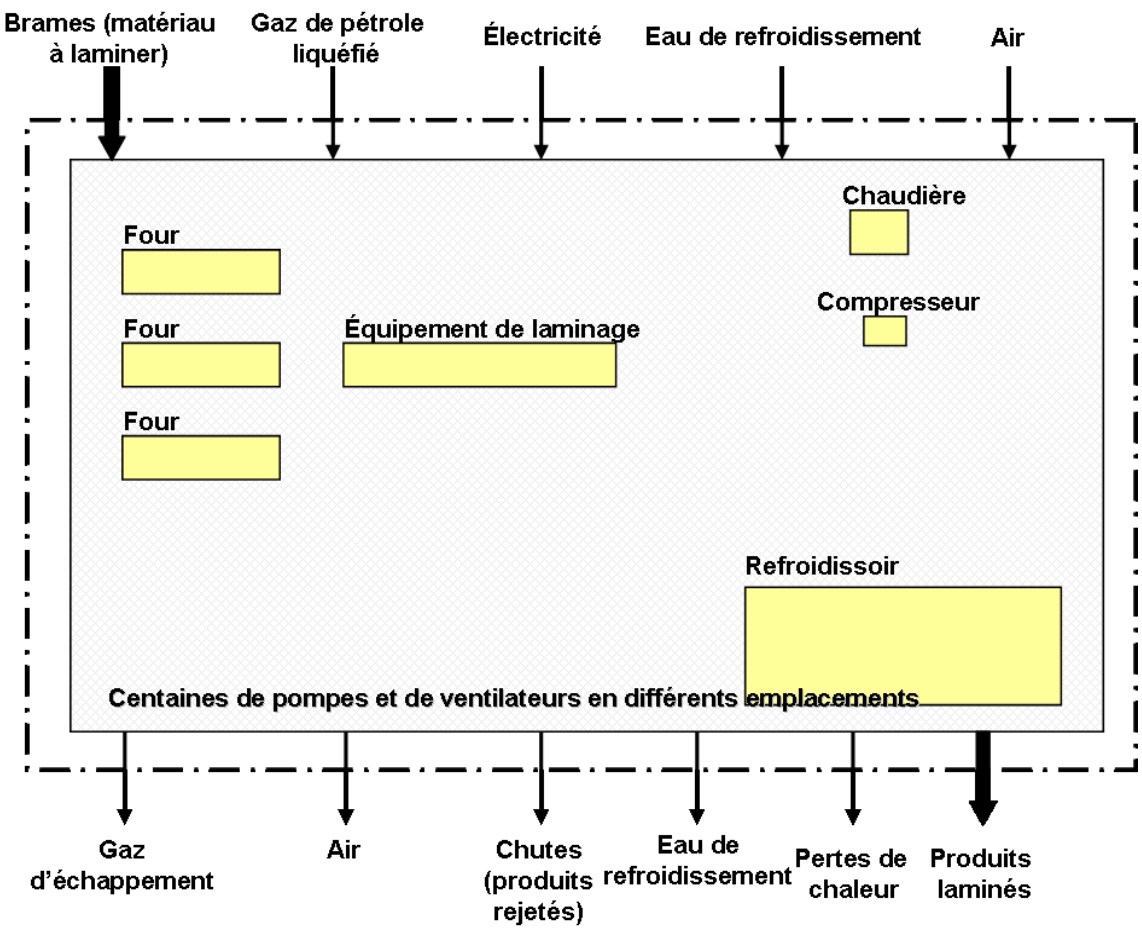


Figure 7.11 : Schéma de procédé d'un laminoir à chaud

Dans ce cas, plusieurs sources d'énergie primaire différentes sont impliquées. Toutefois, l'étude ci-après est limitée à l'utilisation de l'énergie électrique. Le nombre de composants ou sous-systèmes actionnés électriquement dans un laminoir peut être estimé à plus d'un millier.

La consommation d'énergie électrique peut être facilement relevée au moyen de compteurs d'électricité fiables. La production d'acier peut signifier le poids des brames qui entrent dans le laminoir ou le poids des produits finaux laminés et approuvés. La différence correspond au poids des rebuts susceptibles de tomber à différents stades dans le laminoir.

Une analyse des données relatives à un laminoir existant portant sur une période de 11 semaines a été effectuée et la Figure 7.12 présente quelques uns des résultats. La consommation d'énergie varie d'environ 120 à 80 kWh par tonne de produits livrés, selon le nombre de tonnes produites par semaine. La consommation était donc de 100 kWh/tonne et la variation était de ± 20 %. Aucune mesure d'économie d'énergie n'a été prise pendant cette période.

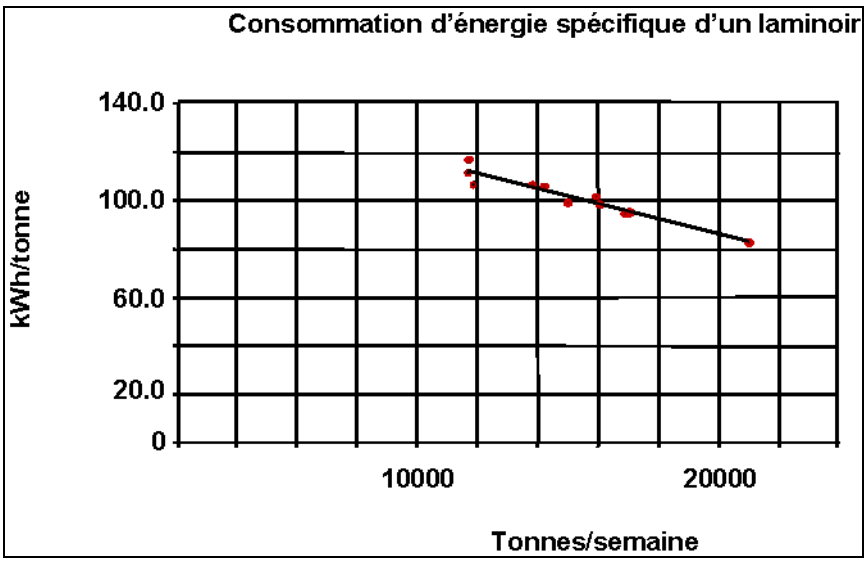


Figure 7.12 : Consommation d'énergie spécifique dans un laminoir

La réduction de la consommation d'énergie spécifique avec une augmentation du taux de production est tout à fait normale et provient de deux facteurs :

- les équipements de production fonctionnent sur des périodes plus longues lorsque le taux de production est élevé. Cela signifie que les périodes d'inactivité sont raccourcies. Certains types d'équipement fonctionnent en continu, y compris le temps de non-production. Ce type de consommation énergétique est réduit lorsque le temps de non-production est raccourci
- il existe une consommation énergétique de base qui ne dépend pas de l'utilisation de la capacité de production. Cette consommation est liée à l'emploi d'éclairage, de ventilateurs, de machines de bureau, etc. À des taux de production plus élevés, la consommation est répartie sur plus de tonnes de produits.

La diminution de la consommation d'énergie spécifique avec une augmentation du taux de production est donc imputable aux fluctuations des conditions du marché sur lesquelles la société n'a aucun contrôle.

Un programme d'amélioration de l'efficacité énergétique a ensuite été réalisé dans le laminoir. Un certain nombre de mesures ont été prises dans le but de faire diminuer la consommation d'énergie et les résultats de ces mesures sont présentés sur la Figure 7.13. Ces résultats semblent être largement indépendants du taux de production. Comme on peut le voir sur la Figure 7.13, il est possible de séparer les résultats des efforts d'économie d'énergie et les résultats imputables à d'autres facteurs, tels que l'utilisation de la capacité de production.

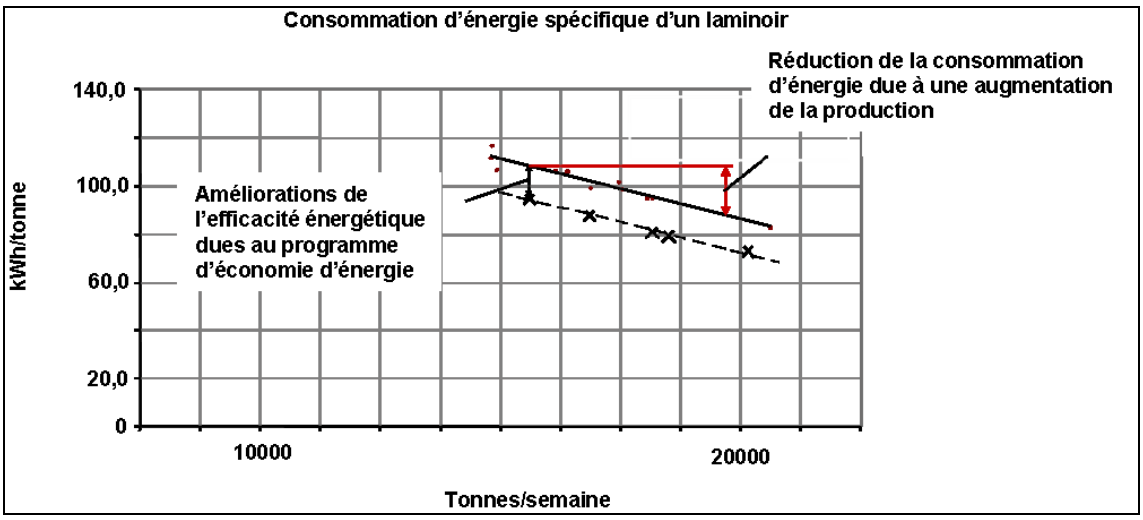


Figure 7.13 : Variations de la consommation d'énergie spécifique d'un laminoir

Il est également évident que des difficultés d'interprétation surviennent lorsque l'on compare la consommation d'énergie spécifique au mois ou à l'année. La consommation d'énergie spécifique peut très bien augmenter d'une période à l'autre bien qu'un certain nombre de mesures d'économie d'énergie aient été prises. Dans ce cas, les effets de telles mesures ne sont pas suffisamment importants pour compenser l'augmentation de la consommation énergétique due à des faibles taux de production.

7.4 Exemples de mise en œuvre de systèmes de management de l'efficacité énergétique

Exemple 1 : Aughinish Alumina (AAL), Irlande [161, SEI, 2006]
Aughinish Alumina (AAL) est la plus grande raffinerie d'alumine en Europe : elle produit annuellement, en traitant du minerai de bauxite, plus de 1,6 million de tonnes d'alumine, qui est ensuite exportée à des fondeurs pour être transformée en aluminium. L'usine, installée sur l'île d'Aughinish, dans le Comté de Limerick, est l'un des plus grands consommateurs d'énergie en Irlande et compte 400 employés. Le raffinage de l'alumine est un procédé grand consommateur d'énergie, dans lequel l'énergie représente environ 30 % du coût total.

La société a répondu à une suggestion de Sustainable Energy Oreland (SEI) concernant la mise en œuvre d'un système de management de l'efficacité énergétique (SM2E). Le système ayant été retenu est le système danois DS 2403 (le système irlandais IS 393 repose sur ce dernier, et a été émis par la suite). La société a choisi un système normalisé pour garantir la mise en place d'une approche systématique et structurée aux fins d'améliorer l'utilisation de l'énergie et de réduire les coûts liés à l'énergie. Le système DS 2403 est très semblable à ISO 14001, et s'est avéré extrêmement avantageux car il a suffit simplement de le mettre en forme pour qu'il corresponde aux procédures ISO 14001 existantes.

Les consultants danois ont effectué une étude préliminaire et un audit, puis une analyse de l'écart définissant les actions à entreprendre pour être en conformité avec la norme. Un responsable chargé à plein temps de l'énergie a été engagé afin de développer les systèmes nécessaires. La société AAL disposait déjà d'un système de mesure étendu de telle sorte que l'accent a été mis sur un meilleur emploi des données disponibles et sur l'instauration de vérifications et de procédures de compte-rendu formelles pour mettre en évidence les problèmes et identifier les opportunités.

Tous les ingénieurs ainsi que le personnel des services maintenance et achat dont le travail était en relation directe avec les impératifs de cette norme ont reçu une formation d'une journée sur sa mise en œuvre. Les 400 employés restant ont quant à eux assisté à une présentation de sensibilisation d'une heure couvrant des aspects plus généraux.

Exemples d'actions identifiées et entreprises *:*

Amélioration de la récupération de la chaleur
Une série de réchauffeurs à calandre utilise de la vapeur régénérative pour chauffer l'eau d'alimentation de la chaudière jusqu'à 120 °C avant son entrée dans les désaérateurs. Les performances des réchauffeurs étaient médiocres depuis un certain temps en raison de l'encrassement des conduites vapeur, ce qui entraînait une non-conformité, qui à son tour donnait lieu à un programme davantage centré sur le dépannage afin d'identifier comment mieux résoudre ce problème. Une analyse thermographique et des études de pression ont permis d'identifier des zones à fortes pertes de charge dans les conduites vapeur. Il est ressorti de ces informations, associées à des calculs détaillés pour déterminer quelles étaient les pertes de charge tolérables, qu'AAL devait effectuer certaines modifications spécifiques dans une zone pendant la fermeture annuelle de l'usine. L'analyse s'est avérée correcte et les modifications se sont traduites par une amélioration significative du rendement énergétique. Cette approche a été appliquée avec succès dans un autre emplacement et des améliorations supplémentaires sont attendues par suite d'autres modifications effectuées à la fin de 2006.

Élévation de la température du flux en entrée
Il est indispensable d'ajouter un lait de chaux au digesteur pour contrôler l'extraction. La température du lait doit être aussi élevée que possible, sinon le digesteur nécessite un apport

supplémentaire de vapeur provenant des chaudières pour atteindre sa température cible. Des anomalies de fonctionnement au début de 2005 se sont traduites par de basses températures de boue et des non-conformités. L'enquête a identifié un procédé simple, peu onéreux, pour résoudre ce problème ; il est peu probable que ceci serait arrivé sans la norme. Bien que les économies réalisées soient petites dans le contexte de la facture énergétique globale d'AAL, il n'en reste pas moins qu'elles sont réelles et le fonctionnement du dissolveur à chaux a également été amélioré.

Exemple 2 : Outokumpu, Tornio works, Finlande [160, Aguado, 2007]
Outokumpu est une société internationale et les établissements Tornio sont le plus grand site mondial intégré produisant de l'acier inoxydable, avec une capacité de 1,65 M de tonnes et 2 300 employés. Ils intègrent leur management de l'efficacité énergétique à leur système de management énergétique ISO 14001, et un rapport relatif à la consommation énergétique dans ce cadre sera établi sur le site avant le 1 décembre 2007. Ils figurent dans le Dow Jones Sustainability Index en 2006, un indice qui référence les entreprises les plus performantes en matière de développement durable et les classe en fonction de leur responsabilité sociale.
Autres sites : Avesta, Degerfors et Nyby ont obtenu la certification de leurs systèmes de management de l'efficacité énergétique en conformité avec SS 627750 en 2006. Avesta avait comme cible « Décembre 2007 » pour réduire la consommation d'électricité de 3 % en passant de 980 à 950 kWh/tonne, et le rendement énergétique du gaz de pétrole liquéfié (GPL) de 2 %, à savoir de 608 à 596 kWh/tonne. L'objectif de Degerfors était de réduire dans la zone de distribution la consommation d'énergie pour le chauffage de 40 % d'ici à 2005. Sheffield (atelier de fonte) doit introduire un système de management de l'énergie, avec désignation d'une équipe chargée de l'énergie et d'un champion énergie, et a pour objectif de réduire de 10 % l'emploi d'énergie de non-production, par rapport à 2006 (là encore d'ici décembre 2007).

Exemple 3: The Dow Chemical Company [163, Dow, 2005]
La compagnie Dow Chemical Company est une société internationale comprenant six segments d'activités, 28 entreprises et plus de 3 200 produits, avec un chiffre de vente annuel de 29 400 millions EUR (1 USD = 0,73416 EUR à la date du 1er janvier 2005). Au total, 43 000 personnes sont employées sur 208 sites de fabrication dans 38 pays. Leur consommation d'énergie est de 3 500 MW, dont 54 % sont générés en interne et 74 % de cela sous forme de cogénération.

Dow utilise les systèmes de management, les méthodes de travail et les outils de recherche permanente d'améliorations déjà en place.

Objectifs fixés par le Global Management Board : 1995 – 2005, amélioration de l'efficacité énergétique de 2 % par an (20 % au total avec 1994 comme année de référence). Les objectifs pour la période 2005 – 2015 ont été fixés en 2005.

Stratégie : pour assurer un développement durable à long terme, les unités commerciales incluent des objectifs et des plans de conservation et d'efficacité énergétique dans la mise en oeuvre de leurs projets et plans stratégiques.

Dans sa mise en œuvre de l'efficacité énergétique, Dow répond à toutes les exigences telles que mentionnées dans la Section 2.1, notamment structure définie, communications, gestion des données, identification et exploitation des opportunités. L'efficacité énergétique fait partie d'une démarche de développement de la « technologie la plus efficace » et est évaluée en conséquence au plan des investissements à long terme. Elle fait appel également au marketing, au brainstorming et aux effets de levier. Il existe chez Dow un directeur de la conservation d'énergie globale, apportant son appui à toutes les entreprises. Sur chaque site d'implantation, il y a un pilier central/directeur de l'efficacité énergétique pour y coordonner les activités relatives à l'efficacité énergétique, avec des équipes pilotes pour la conservation d'énergie au niveau des principales plaques tournantes.

Le personnel est impliqué par les publications illustrant des réussites, l'emploi d'outils pour l'efficacité énergétique à la disposition de tous, des liens avec l'extérieur, de concours d'économies et d'autres activités.

La structure est intégrée, les équipes pilotes pour l'énergie sur le site comportent la direction du site et de l'usine et pratiquent une approche « transversale » au niveau de l'entreprise. Cette structure donne l'assurance que les objectifs de l'usine de traitement se traduisent effectivement en économies réelles au niveau de la société ; elle optimise l'intégration et les synergies d'emploi de l'énergie entre usines, le partage et **l'interaction** des idées et des projets, ainsi que l'identification d'opportunités au niveau du site et la planification.

Un facteur clé réside dans l'utilisation des méthodes de travail et des outils de recherche permanente d'améliorations existants avec :

- une focalisation sur les solutions efficaces au plan de l'énergie – ingénierie / technologie la plus efficace
- une focalisation sur les équipes chargées de la maintenance / l'exploitation / l'énergie
- l'inclusion de sous-produits combustibles / énergie de substitution et des améliorations des comptes-rendus relatifs à l'intensité énergétique (l'utilisation d'un sous-produit combustible peut avoir un effet négatif sur le rendement global des combustibles, mais peut réduire l'émission de CO_2 provenant d'autres combustibles fossiles et ne doit donc pas être pénalisée en tant qu'effet négatif sur l'efficacité énergétique)
- mise en œuvre de la méthode de Six sigma : il s'agit d'une méthodologie s'appuyant sur les données pour « limiter les retouches » et pour « le maintien des gains » ; elle comporte systématiquement plusieurs phases à savoir « mesurer-analyser-améliorer-contrôler ». Elle utilise (entre autres) une évaluation des exigences du client, des analyses statistiques et des outils de prioritisation des opportunités. La gestion du changement, l'engagement de la direction et la communication sont au cœur de la mise en œuvre d'une amélioration.

Réalisations
Dow a atteint la réduction prévue de 20 % de la consommation d'énergie spécifique (que Dow dénomme intensité énergétique, ainsi que d'autres sociétés chimiques et pétrochimiques), en passant de 13 849 kJ/kg de produit à 11 079 kJ/kg, mesurés en kg de produits DOW mélangés.

Exemples d'améliorations spécifiques

Dow – Allemagne centrale (cinq sites) :
- optimisation du site de Boehlen, au plan du bilan vapeur et gaz combustible, avec une réduction annuelle considérable du CO_2 et une amélioration de l'efficacité énergétique (local)
- démarrage d'un projet d'amélioration de l'enveloppe d'hydrogène entre deux sites (distants de 40 km) afin de minimiser l'hydrogène mis à l'air libre / brûlé en torchère et d'optimiser l'utilisation de produits chimiques et de combustible, ce qui se traduit par un bilan de l'hydrogène « confiné » (pertes réduites au minimum) et des mesures de réduction du CO_2.

Site de Freeport, Texas, États-Unis :
- initiation d'un programme à l'échelle du site afin de réduire la consommation électrique des systèmes motorisés. Développement d'un outil pour permettre au personnel chargé des opérations d'évaluer les opportunités d'économie d'énergie et de développer des procédures opérationnelles visant à réduire la consommation d'énergie ou pour identifier des opportunités de modifications d'ordre conceptuelle.

Site de Terneuzen, Pays-Bas :

- l'optimisation des bilans vapeur entre énergie et utilités et les installations de craquage d'oléfines s'est traduite par une diminution des pertes de vapeur et une réduction de la pression vapeur plus efficace (Turbine/stations de régulation).

7.5 Exemple de procédés d'efficacité énergétique centralisés

Exemple 1 : production enzymatique d'acrylamide (Mitsubishi Rayon, Japon)
[164, OCDE, 2001]
Dans le procédé classique, l'acrylonitrile est hydrolysé par l'addition de quantités stoechiométriques d'acide sulfurique en présence d'inhibiteurs de polymérisation pour éviter une polymérisation à la fois des matériaux de départ et des produits. Dans les années 1970, il a été mis au point un catalyseur hétérogène au cuivre qui éliminait le besoin d'acide sulfurique. Il présentait de nombreux avantages et était couramment appliqué.

Toutefois, le développement des technologies de polymérisation et des applications de polymères a créé une nouvelle demande pour un monomère d'acrylamide encore davantage purifié. Il a ainsi été révélé que l'acrylamide produit par le procédé catalytique, qui était reconnu comme étant de qualité élevée, contenait néanmoins des sous-produits mineurs qui affectaient les réactions de polymérisation. Le Medical Research Council (Conseil de la recherche médicale, MRC) a donc démarré la mise au point d'un procédé enzymatique de production d'acrylamide qui réduit le niveau de sous-produits. Il s'agit d'une hydrolyse utilisant un catalyseur récupérable à cellules entières immobilisées.

Le développement à l'échelle pilote du microbe de première génération a duré un an et demi pour la mise au point du procédé et de l'assurance qualité. Pour les seconde et troisième générations, environ six mois d'essais à l'échelle du laboratoire ont suffi à garantir l'application du procédé et la qualité du produit. Puis il a fallu environ sept ans pour la mise au point de l'organisme génétiquement modifié (OGN) et la construction de technologies applicables.
Le Tableau 7.3 présente la production mondiale d'acrylamide.

	Capacité mondiale de production d'acrylamide 10^5 tonnes/an			
Procédé	**Japon**	**Asie (sauf Japon)**	**États-Unis**	**Europe**
Catalytique	0,9	0,75	1,35	1,15
Enzymatique (1998)	0,2	0,2	0,1	0,35
Enzymatique (2001, est.)	n. a.	0,5	n. a.	0,45

Tableau 7.3 : Capacité mondiale de production d'acrylamide : 10^5 tonnes/an
[164, OCDE, 2001]

Le premier procédé enzymatique nécessitait des étapes de décoloration et de concentration que ne comporte pas le nouveau procédé, voir Tableau 7.4.

Procédé - réaction	**Catalytique (1971-)**	**Enzymatique (1985-)**
Température de la réaction	343°K	273 – 288 °K
Rendement de la réaction en une seule passe	70 – 80 %	~ 100 %
Concentration d'acrylamide	~ 30 %	48 – 50 %
Concentration	Requise	Non requise
Purification	Élimination du catalyseur	Élimination de protéines

Tableau 7.4 : Comparaison des procédés de production d'acrylamide [164, OCDE, 2001]

Des études comparatives ont été réalisées sur les impacts environnementaux des procédés catalytiques, des procédés enzymatiques d'origine et des nouveaux procédés enzymatiques. Selon les conclusions, l'approche biotechnologique a de moindres impacts que le procédé catalytique, en particulier en ce qui concerne la consommation d'énergie et la production de dioxyde de carbone. Les économies d'énergie sont présentées dans le Tableau 7.5 et dans le Tableau 7.6.

	Procédé catalytique	**Procédé enzymatique (ancien)**	**Procédé enzymatique (nouveau)**
Vapeur	1,6	2,8	0,3
Énergie électrique	0,3	0,5	0,1
Matières premières	3,1	3,1	3,1

Tableau 7.5 : Comparaison de la consommation d'énergie exprimée en MJ/kg acrylamide [164, OCDE, 2001]

	Procédé catalytique	**Procédé enzymatique (ancien)**	**Procédé enzymatique (nouveau)**
Vapeur	1,25	2,0	0,2
Énergie électrique	0,25	0,25	0,1
Matières premières	2,3	2,3	2,3

Tableau 7.6 : Comparaison de la production de CO_2 - Kg CO_2/kg acrylamide [164, OCDE, 2001]

Exemple 2 : Utilisation d'encres durcies par rayonnement ou de systèmes de peinture à la place des systèmes à base de solvants classiques

Rotative pour impression heatset de 54" (≈ 1,37 m). Un travail d'imprimerie type comprend une couverture de 35 - 40 % sur une pâte mécanique pour carton légère, de 12-points. Les calculs reposent sur un roulement de trois équipes, soit un fonctionnement pendant 75 % des heures disponibles = 4 680 heures par an.

Encres classiques et système de séchage :
Encres et revêtements à base de solvant, 60 – 65 % de solides. Les sécheurs utilisent du gaz pour chauffer l'air jusqu'à approximativement 150 °C. L'électricité nécessaire au déplacement d'air est comprise dans le calcul.

Souvent, le substrat est refroidi sur des rouleaux refroidisseurs, après passage en four. L'air chargé de solvant (gaz résiduaires) est habituellement traité (par des oxydeurs). Les besoins en énergie pour ces deux systèmes n'ont pas été inclus dans le calcul.

Système à faisceau d'électrons (EB) :
Les encres EB sont des solides à 100 %. Lorsqu'elles sont exposées à des électrons à énergie élevée, elles se polymérisent ou durcissent (fondent puis durcissent). Une chaleur minimale est déposée à l'intérieur du substrat (variation de température d'environ 8 à 12 °C de sorte qu'aucun refroidissement n'est requis. Il n'y a pas de gaz résiduaire contenant des solvants à traiter. Toutefois, le durcissement à faisceau d'électrons (EB) nécessite une atmosphère inerte sous azote. Aucune donnée n'ayant été communiquée quant à la consommation d'énergie pour sa génération, on suppose que le coût par volume unitaire de N_2 est entièrement celui de l'énergie électrique utilisée pour sa génération, et il a été ajouté à la consommation d'énergie. Les économies d'énergie réalisées grâce à un système à encres EB sont présentées dans le Tableau 7.7.

GJ par an	Classique	EB
Gaz	4,67 x 10^4	-
Énergie électrique	384	5.31 x 10^3
	4,7 x 10^4	5.31 x $10e^3$
Économies		41690 GJ/an
		89 %
Réductions de coût		649 162 USD (2006, coût combiné du gaz naturel et de l'électricité)

Tableau 7.7 : Économie d'énergie réalisée grâce à un système à encre EB
[175, Saunders_R., 2006]

Exemple 3 : récupération de chaleur dans les bâtiments d'élevage des poulets de chair (élevage intensif des poulets)

Dans les locaux pour poulets de chair, il existe normalement un système de chauffage de l'air. Avec le système « combideck », le sol est chauffé. Le système est constitué d'une pompe à chaleur, d'un dispositif de stockage souterrain constitué de tubes et d'une couche de serpentins creux isolés, situés sous le sol. Jusqu'aux environs du 21ème jour, les poulets de chair ont besoin de chaleur (environ 28 °C) qui est fournie par pompage d'eau chaude à travers le système souterrain. Après une courte période d'équilibre, le processus de croissance génère un de la chaleur en excès. Cette chaleur est irradiée dans le sol en dessous du bâtiment, où elle est absorbée par le flux d'eau froide du système souterrain et stockée dans le sol. Ce système a de meilleures performances sur la production des poulets de chair (réduction de la mortalité, meilleur prix de revient de la viande, meilleur indice de consommation d'aliments) et un effet positif sur le bien-être de l'animal (réduction du stress dû à la chaleur, baisse de la mortalité, diminution du nombre des consultations vétérinaires nécessaires).

Les coûts d'investissement sont de 2 EUR par emplacement de poulet de chair avec 20 poulets de chair par m². Les frais d'exploitation (usure, intérêts et entretien) sont de 0,20 EUR par emplacement de poulet de chair par an. Les rendements accrus annuels dépasseraient les frais d'exploitation annuels d'un facteur d'environ 3. Par exemple, les coûts vétérinaires sont réduits d'environ 30 % et les coûts énergétiques d'environ 52 %. Le délai de recouvrement est d'environ 4 à 6 ans. Logements pour poulets de chair : Section 4.4.1.4, [173, EIPPCB, 2003]

7.6 Exemple de maintien de la dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique : Excellence opérationnelle

Exemple 1 : Shell Nederland Chemie, Moerdijk, Pays Bas (Usine de production d'éthylène – 900 000 mt/an)
Cette société cherche à réduire ses coûts d'énergie et ses émissions de dioxyde de carbone. Un projet a été mis en œuvre, en partenariat avec Shell Global Solutions, en utilisant le programme « Energise » de la société.

Le personnel de l'usine était constamment à la recherche de solutions permettant d'économiser de l'énergie, mais disposait d'un temps limité, car il devait se concentrer sur le maintien de la continuité du flux de production et de la qualité des produits. Il existait un doute quant à la possibilité de réaliser des économies significatives au niveau de l'usine de production d'oléfines inférieures, car son efficacité énergétique était déjà très bonne. Toutefois, les consultants du programme Energise ont œuvré avec des représentants de l'usine pour imaginer des améliorations opérationnelles conçues afin de réduire la consommation d'énergie.

Initialement, l'équipe a identifié 150 opportunités d'améliorations, et, après étude, 23 d'entre elles ont été développées et mises en œuvre sous forme de projets formels. Ce travail a été réalisé sans aucun arrêt de fonctionnement et pendant que l'usine était opérationnelle. Environ 59 % des économies totales ont été obtenues en modifiant des stratégies de régulation du procédé, notamment en configurant de nouvelles boucles de régulation et en optimisant les points de consigne. Le reste des économies provient des modifications apportées aux procédures (23 % du total) et de l'amélioration de l'entretien des équipements et de l'instrumentation du procédé (18 %). Les principaux domaines d'amélioration ont été les suivants :

- économies significatives réalisées en ajustant les niveaux de pression autour des systèmes de compresseurs et en installant de nouveaux instruments pour faciliter le fonctionnement des compresseurs à des performances optimales. Les modifications apportées à la régulation pour les compresseurs frigorifiques de propylène ont par exemple permis de faire diminuer la demande énergétique d'environ 10 % ;
- les fluctuations opérationnelles qui ont également été réduites de manière significative sur toute la plage de production, ce qui réduit la probabilité de restrictions de capacités, et permet d'éviter le besoin occasionnel de réduire la production globale de l'usine. En particulier, les goulots d'étranglement de capacité en période estivale ont été réduits de manière significative ;
- bon nombre des économies d'énergie proviennent d'une meilleure compréhension du bilan vapeur de l'usine, d'un réglage fin des équipements et d'un investissement en instrumentation pour surveiller les performances des équipements.

L'objectif était d'atteindre une excellence opérationnelle, de meilleures pratiques et de meilleures stratégies de contrôle du procédé, et non pas d'investir dans de nouveaux matériels. L'investissement en capital pour la série de projets à petite échelle s'élevait à 100 000 USD (rapportés en 2006 : environ 75 000 EUR) pour l'ingénierie, l'approvisionnement et la construction de l'instrumentation électronique supplémentaire.

Des économies d'énergie de 5 millions USD /an (environ 3,6 millions EUR), ou de 3,5 % ont été atteintes.

Exemple 2 : Dow Corning, plusieurs installations
L'excellence opérationnelle a été mise en œuvre dans toutes les usines, par une amélioration des actifs de fabrication au moyen d'un renforcement de la discipline d'exploitation. Les usines sont devenues plus fiables et offrent de meilleures prévisions d'exploitation, ce qui a apporté des avantages significatifs à savoir une meilleure qualité des produits et une meilleure exploitation de l'usine. Dans toutes les usines, on a ainsi découvert des capacités cachées de 15 à 20 % en général, avec un investissement minimal en capitaux.

7.7 Surveillance et mesurage

7.7.1 Mesures quantitatives – réalisation de mesures

Deux divisions d'un groupe (unités d'exploitation) partageaient un compteur d'électricité. Les coûts étaient répartis selon un rapport 60/40. L'unité qui payait 60 % avait des coûts d'énergie anormalement élevés et en raison de ce coût fixe qui lui était attribué il avait donc été envisagé de la fermer et de la délocaliser vers un autre site. Un système de mesurage avancé avec enregistrement automatique des mesures a été installé (voir Section 2.15.2). Il a mis en évidence que l'unité qui était redevable de 60 % consommait en réalité une quantité <41 % de l'énergie électrique du complexe. Il a également permis d'identifier un procédé de traitement thermique qui provoquait un pic de 175 kW une fois par semaine. Celui-ci a été décalé à un moment de la journée bénéficiant

d'un tarif moins onéreux (voir Section 7.11). Les économies totales réalisées sont de 324 000 USD (≈240 000 EUR) par an.
[183, Bovankovich, 2007] [227, TWG]

7.7.2 Utilités basées sur un modèle - optimisation et gestion

Exemple 1 : Schott AG, DE
La société fabrique différents types de produits en verre et compte plusieurs sites de production en Allemagne et ailleurs.

La consommation d'énergie et les coûts apparentés étaient historiquement attribués à diverses unités à l'intérieur de la société sur une base fixe, et non sur la consommation réelle. Les responsables ne pouvaient de ce fait agir sur les coûts d'énergie, et la motivation pour réduire la consommation d'énergie était faible. La société a introduit un système de surveillance de l'énergie automatisée (ECS – système de contrôle de l'énergie), avec un compteur entièrement électronique et une modélisation informatique :

- électricité : 940 points de mesure,
- eau : 203 points de mesure,
- gaz : 49 points de mesure,
- air comprimé : 43 points de mesure,
- combustible : 8 points de mesure,
- N_2, O_2, NH_3 : 7 points de mesure.

Avantages obtenues pour l'environnement :

- économies d'énergie grâce à une prise de conscience accrue des coûts
- optimisation de la consommation d'énergie.

Avantages opérationnels :

- élimination plus rapide des défauts avec diminution des pertes de productivité,
- lissage de la fourniture d'énergie,
- transparence des flux d'énergie.

Aspects économiques :

- logiciel : environ 50 000 EUR.
- matériel : environ 500 EUR/ point de mesure.
- économies annuelles :
  - diminution de la charge des pics au niveau de l'alimentation en électricité : environ 3 à 5 %,
  - période de recouvrement d'investissement : environ 0,9 à 2 ans (en fonction du projet).

Verre Schott : [127, TWG]

Exemple 2 : Hôpital Atrium, Heerleen, Pays-Bas
L'hôpital a construit à la fin des années 1990 une « utilité » de trigénération à la pointe du progrès, pour produire et fournir de la vapeur, de la chaleur, de l'électricité et un refroidissement à l'hôpital 24 heures sur 24, avec une fiabilité à 100 %. Elle comprend une chaudière à eau chaude, deux

chaudières à vapeur, des unités de refroidissement électrique et à absorption, des échangeurs de chaleur, deux unités CHP à moteurs à gaz et deux générateurs de secours. La complexité de l'installation et l'utilité et les coûts en combustible ont rendu impossible toute opération économique d'optimisation. Une étude a été réalisée, à la suite de laquelle l'installation d'un condenseur de gaz brûlés a permis d'économiser environ 520 à 713 MWh par an, soit 5 % de la demande énergétique. Un système de management des utilités en temps réel a été installé, avec un retour sur investissement (ROI) interne de 49 % (environ 75 000 – 95 000 EUR/an sur un coût d'énergie variable d'environ 1,2 EUR million [179, Stijns, 2005].

7.7.3 Modèles, bases de données et bilans énergétiques

Exemple 1 : Modèles d'énergie électrique

Le Tableau 7.8 présente un modèle électrique simple.

		A	B	C	D	E	F	G
DÉPARTEMENTS	**DISPOSITIFS**	**n.**	**Puissance nominale kW**	**Rendement nominal**	**Nombre d'heures de fonctionnement par an**	**Facteur de charge**	**Consommation d'énergie kWh**	**%**
Département 1	Dispositif 1	10	55	0,92	500	1	298913	
	Dispositif 2	20	4	0,85	4000	0,8	301176	
	Dispositif 3	15	10	0,9	4000	0,9	600000	
Total Dépt. 1			780				1200089	17,5
Département 2	Dispositif 1	1	500	0,85	3500	0,5	1029411	
	Dispositif 2	20	15	0,9	4000	1	1333333	
	Dispositif 3	5	7.5	0,8	4500	0,9	189844	
	Dispositif 4	10	2	0,75	1500	0,8	32000	
	Dispositif 5	3	150	0,92	3000	0,95	1394022	
Total Dépt. 2			1307				3978611	58,1
Département #.	Dispositif .		…	…	…	…	…	…
TOTAUX			3250				5425000	100.0

Tableau 7.8 : Modèle électrique simple

« n. » dans la colonne « A » représente le nombre de dispositifs identiques (à la fois d'un point de vue technique et d'exploitation) présent dans ce département.

La « consommation énergétique » à la colonne « F » est obtenue en multipliant le nombre de dispositifs x puissance nominale x heures de fonctionnement x facteur de charge et en divisant par le rendement nominal :

$$F = \frac{A * B * D * E}{C}$$ **Équation 7.24**

En ajoutant toutes les énergies consommées dans chacun des départements, il est possible de calculer la consommation totale d'énergie pour l'usine toute entière.

Si le contexte étudié n'est ni très étendu ni complexe, ce type de modèle peut être adéquat pour détecter les domaines où la probabilité de trouver des possibilités d'économie d'énergie est la plus grande. Il suffit de diriger son attention sur la répartition des consommations d'électricité dans chaque département, indiquée dans la colonne « G ». Il est très probable qu'une série d'actions visant à améliorer l'efficacité énergétique sera trouvée dans les départements où la consommation d'énergie est la plus élevée, tandis que les départements ayant une faible consommation peuvent être « négligés » ou pris en compte ultérieurement.

Lorsque le contexte le justifie (parce que le cycle de production est extrêmement complexe, ou lorsque des données relatives à l'énergie n'ont jamais été collectées auparavant) il est également utile de recueillir les données ci-après pour identifier les actions visant à réaliser des économies d'énergie par ex.

- pour les moteurs et les entraînements :
  - type de machinerie entraînée par moteur (compresseur, ventilateur, pompe, etc.)
  - code d'identification
  - fabricant et nom du modèle
  - type du moteur
  - année d'installation, ou durée de vie résiduelle
  - nombre de rebobinages effectués à ce jour
  - type de commande de vitesse, le cas échéant
  - type de transmission mécanique
  - possibilité de décaler le fonctionnement à différents horaires (pour tirer parti des tarifs d'électricité les plus avantageux à des horaires spécifiques ou à des jours spécifiques)

- pour les appareils d'éclairage :
  - type de corps d'éclairage
  - nombre de lampes dans un corps
  - nombre de corps d'éclairage
  - type de lampes
  - puissance nominale de la lampe
  - rendement de la lampe
  - type de ballast (fer, cuivre ou haute fréquence).

Exemple 2. Modèles d'énergie thermique

Même si toutes les données précédentes devraient être recueillies, dans le modèle thermique de premier niveau (« côté génératrices ») seules quelques unes d'entre elles sont à prendre en considération comme dans le dessin d'un modèle électrique (voir Tableau 7.9) :

		A	B	C	D	E	F	G
PROCÉDÉ	**Dispositif**	**n.**	**Puissance nominale kW**	**Rendement nominal**	**Nombre d'heures de fonctionnement par an**	**Facteur de charge**	**Consommation d'énergie kWh**	**%**
Phase 1 (par ex. combustion)	**Gros four à chaux**	4	800	0,85	7700	0,8	2417000	
	Petit four à chaux	5	600	0,85	7700	0,8	2266000	
Total Phase 1			6200				4683000	76,5

		A	B	C	D	E	F	G
Phase 2 (par ex. Production de chaleur)	**Générateur d'eau surchauffée**	2	2500	0,92	1000	0,5	283200	
	Chaudière à vapeur	2	1000	0,92	7000	0,5	793200	
	Générateur d'eau surchauffée	2	1000	0,92	1600	0,5	181200	
Total Phase 2			9000				1257600	20,5
Phase 3 (par ex. Services)	**Séchoir – atomiseur**	1	400	0,7	200	1	11900	…
	Générateur d'air chaud	1	400	0,85	1600	0,5	39200	
	Petits réchauffeurs	37	30	0,8	1600	0,5	115700	
	Gros réchauffeurs	2	60	0,8	1600	0,5	12500	3,0
Total Phase 3			2030				179300	
TOTAUX			3250				6119900	100.0

Tableau 7.9 : Données d'un modèle d'énergie thermique (côté générateurs)

Dans ce cas, afin de faciliter la comparaison, l'énergie consommée a été estimée en Nm^3 de gaz naturel. Les quantités de gaz naturel consommées sont indiquées, dans ce cas, par :

$$F = \frac{A \times B \times D \times E \times 3600}{C \times 34\,500}$$

Où

• 3600	facteur de conversion de kWh en kJ
• 34 500	est la valeur de chauffage nette pour le gaz naturel (kJ/Nm^3).

Le modèle thermique de premier niveau (« côté générateurs ») doit être vérifié pour voir si la quantité totale de la demande en énergie est égale à l'énergie totale indiquée dans les factures de gaz naturel. Si c'est le cas, ce modèle est fiable et utile pour indiquer les meilleurs domaines dans lesquels mettre en œuvre des actions d'économie d'énergie.

Lors de l'évaluation de l'utilisation de l'énergie thermique, des modèles de second niveau (« côté utilisateurs ») doivent également être élaborés. Pour établir de telles fiches de données, il est nécessaire de recenser toute machinerie nécessitant une énergie thermique sous une quelconque forme (eau chaude, vapeur, air chaud, etc.) sauf les combustibles (pris en compte dans le modèle de premier niveau).

Pour chaque élément de machinerie, il est nécessaire de recueillir les données suivantes :

- type de porteur nécessaire
- heures/année de demande thermique
- facteur de charge auquel l'énergie thermique est utilisée
- puissance thermique nominale.

De telles données peuvent être présentées dans le Tableau 7.10 comme suit.

		A	B	C	D	E	F	G
DÉPARTEMENTS	**DISPOSITIFS**	**n.**	**Porteur thermique**	**Puissance thermique kWth**	**Nombre d'heures de fonctionnement par an**	**Facteur de charge**	**Demande énergétique Nm^3 CH_4**	**%**
Département 1	Dispositif 1	2	Vapeur	500	1000	1	104200	

		A	B	C	D	E	F	G
DÉPARTEMENTS	**DISPOSITIFS**	**n.**	**Porteur thermique**	**Puissance thermique kWth**	**Nombre d'heures de fonctionnement par an**	**Facteur de charge**	**Demande énergétique Nm^3 CH_4**	**%**
	Dispositif 2	1	Vapeur	125	500	0,8	5200	
	Dispositif 3	5	Eau chaude	75	5000	0,8	156400	
Total Dépt. 1							265800	21,8
Département 2	Dispositif 1	1	Vapeur	75	2500	0,5	9800	
	Dispositif 2	20	Eau chaude	10	3000	1	62500	
	Dispositif 3	5	Vapeur	50	2500	0,8	52100	
	Dispositif 4	10	Eau chaude	5	1500	0,8	6300	
	Dispositif 5	3	Vapeur	25	3000	0,9	21100	
Total Dépt. 2							151800	12,5
Département .	Dispositif .							
TOTAUX							1215700	100.0

Tableau 7.10 : Données d'un modèle d'énergie thermique (côté utilisateurs)

Le modèle de second niveau (« côté utilisateurs ») permet de vérifier la correspondance entre la chaleur fournie par les utilités (chaudières, générateurs de chaleur, etc.) et la chaleur requise par les utilisateurs. Dans ce cas, les quantités indiquées dans la colonne F sont données par :

$$F = \frac{A \times C \times D \times E \times 3600}{34\,500}$$

Dans le Tableau 7.9, les calculs ont été effectués comme suit :

1 257 600 + 179 300 = 1 436 900 Nm^3 de gaz naturel fourni.

Dans le modèle de second niveau, le calcul indique 1 215 700 Nm^3 de gaz naturel requis. Les 15 % de différence sont dus aux rendements aux étapes suivantes : génération de chaleur, tuyauteries de distribution et régulation et utilisation finale.

Si cette différence est acceptable, alors les deux modèles peuvent être considérés comme étant « certifiés », dans le cas contraire, il est nécessaire d'apporter des corrections (en règle générale au nombre d'heures de fonctionnement ou aux facteurs de charge) pour obtenir une convergence.

Si la différence entre les deux quantités est importante, elle est due à un niveau élevé de pertes en production-distribution-utilisation pour différents porteurs (par ex. vapeur, eau chaude, etc.). Dans ce cas, différentes actions visant à améliorer les rendements énergétiques, par exemple, dans le domaine de l'isolation, de la récupération des condensats, sont vraisemblablement possibles.

7.8 Autres outils utilisés comme outils d'audit et à l'appui d'autres techniques employées au niveau du site :

7.8.1 Outils d'audit et de management de l'énergie

De nombreux outils ont été développés afin de « normaliser » le contenu et les approches des audits. Habituellement, les sociétés d'audits externes ont leurs propres outils, tels que des listes de vérifications à utiliser dans les procédures d'audit. D'autres outils sont produits par des associations de commerce, des organismes gouvernementaux, etc. La liste ci-dessous énumère brièvement certains des types d'outils utilisés pour faciliter les audits et la surveillance des activités d'efficacité énergétique. Bon nombre de ces outils peuvent faire partiellement double emploi et il appartient au vérificateur ou à l'exploitant de déterminer ce qu'il convient d'utiliser. Les outils ci-dessus mentionnés sont des outils généraux et ne sont pas spécifiques à un secteur cible ou à un modèle d'audit énergétique, mais leur utilité correspond fréquemment à une ou plusieurs phases de la mission d'audit :

- **guide d'audit ou manuel d'audit, manuel de gestion de l'énergie** : il s'agit d'un composant central d'un plan d'audit énergétique, qui constitue la base des sessions de formation et est destiné essentiellement aux vérificateurs. Il explique et décrit comment réaliser un audit, comment conduire des calculs, ainsi que les types et contenus des options de conservation de l'énergie (ECO) les plus fréquemment proposés. Bien que les vérificateurs soient censés avoir une certaine connaissance de la thermodynamique (et aussi de l'ingénierie électrique), ces manuels comportent fréquemment une section de rappels sur ces sujets liés à l'énergie
- **vérifications, listes de vérifications ou guides directs en matière d'énergie :** associés à des modèles d'audits énergétiques de type à balayage, ces documents justificatifs sont mis au point afin de faciliter le travail du vérificateur et de garantir simultanément à la fois la qualité et la vitesse de l'étude. Ils sont principalement destinés aux vérificateurs énergétiques mais peuvent également être utilisés en tant qu'outils d'auto-audit pour les responsables de l'énergie des établissements industriels qui ont l'intention de lancer un processus de management de l'énergie en interne avant de demander une assistance externe. Les listes de vérifications peuvent être :
  - générales (voir maintenance, Section 2.9)
  - spécifiques pour certaines activités (voir audits énergétiques, Section 2.11)
  - spécifiques pour certains systèmes techniques (utilités et bâtiments)
  - spécifiques pour certains secteurs industriels (procédés de production).

Ils peuvent également permettre d'identifier l'existence d'une conformité ou d'occasions de réaliser des économies d'énergie avec les meilleures pratiques de gestion de l'énergie ou dans certaines technologies (voir Mise en œuvre et Mise en service des procédures en Section 2.1, et Excellence opérationnelle, Section 2.5).

- **Méthodes de calcul et logiciels :** également connus en tant que modèles énergétiques. Ce sont d'autres composants centraux des plans d'audit énergétique ; ils sont associés avec des modèles d'audits énergétiques analytiques. Leur objectif premier est d'aider le vérificateur dans l'évaluation quantitative des potentiels d'économie d'énergie et dans l'évaluation des coûts d'investissement et des retours sur investissement. L'utilisation (par un vérificateur) d'un outil de calcul recommandé ou certifié (sous couvert d'un emploi correct) facilite l'obtention de résultats de qualité pour le client « audité » ;
- **Fiche(s) de collecte de données :** ce type de pièces justificatives qui est généralement associé à l'outil de calcul, pour lequel elles constituent les données d'entrée, aide le vérificateur à recueillir toutes les informations nécessaires pour la mission d'audit. Il fait partie du rapport final et contribue également à faciliter le suivi des caractéristiques énergétiques du site, l'interprétation des résultats de l'audit et l'émission de recommandations ;

- **modèles de rapport :** à l'instar des fiches de collecte de données, les modèles de rapport sont fréquemment associés à l'outil de calcul, dans lequel les résultats en sortie sont intégrés au rapport. Comme le rapport est la partie livrable de l'audit, l'utilisation d'un modèle permet à tous les participants de profiter au mieux du service d'audit et aussi de produire des rapports d'audit de bonne qualité ;
- **liste de vérifications pour le contrôle qualité des rapports d'audit :** cette liste de vérifications est un document qui peut être utilisé à la fois au niveau de la société et au niveau du vérificateur (auto-vérification). Il vient en complément, ou en remplacement, des modèles de rapport. Il s'agit d'une traduction pratique des modèles d'audits énergétiques : les résultats attendus spécifiés dans le modèle d'audit énergétique doivent figurer dans le rapport et la liste de vérifications constitue un moyen facile de vérifier que le travail a bien été effectué selon les spécifications ;
- **valeurs cibles ou analyse comparative :** (voir Section 2.16) ces chiffres clefs sont à l'origine du besoin en audits énergétiques ; les vérificateurs s'en servent comme données techniques pour justifier leurs recommandations dans le cas des audits simplifiés ;
- **bases de données sur les options de conservation de l'énergie (ECO) :** dans un audit, une difficulté est d'obtenir des informations détaillées sur les coûts et les conséquences des recommandations en matière d'économie d'énergie. Une base de données des options de conservation de l'énergie (ECO) englobant ces informations va permettre au vérificateur/ à l'exploitant d'économiser beaucoup de temps et d'argent et par conséquent contribuer à réduire le coût des audits tout en maintenant le niveau de qualité. La mise à jour des données nécessite une somme de travail importante. En voici un exemple :
    - données par défaut : elles peuvent contribuer à des audits détaillés par une vérification des calculs ou en remplaçant des données difficiles à quantifier ou à évaluer d'une autre manière. Elles peuvent être extraites de bases de données (voir ci-dessus), de données de référence ou de l'expérience acquise sur un autre site, au cours d'un autre audit, etc.

7.8.2 Protocole de mesure et de vérification

Le protocole international de mesure et de vérification (IPMVP) est un protocole industriel normalisé pour la mesure et la vérification des économies d'énergie. Il s'agit d'un cadre général qui définit un jeu de procédures de mesure et de vérification à la fois souple et large pour évaluer les économies d'énergie dans les bâtiments et dans les systèmes de bâtiments, par ex. éclairage (mais non dans les opérations des procédés). Ils permettent aux propriétaires de bâtiments, aux Sociétés de services énergétiques (ESCO), et aux financiers des projets liés à l'efficacité énergétique des bâtiments de quantifier la performance des mesures de conservation de l'énergie (ECM) ainsi que les économies d'énergie réalisées.

Des techniques spécifiques sont conçues pour faire correspondre les coûts des projets et les besoins d'économie avec des technologies et des méthodes de mesure de l'efficacité particulières. Chaque option est applicable à des programmes et des projets différents selon des facteurs tels que la complexité des mesures d'efficacité soumises à évaluation et la prévision des risques. En conséquence, chaque option varie en précision et en coût de mise en œuvre, ainsi qu'en forces et limites. L'un des principaux objectifs de cette initiative était de contribuer à la création d'un marché secondaire pour les investissements en efficacité énergétique en développant un jeu permanent d'options de mesure et de vérification (M&V) susceptibles d'être appliquées uniformément à un éventail de mesures d'économie d'énergie, ce qui se traduit par des économies fiables sur la durée du projet.

Le protocole est géré par le biais de l'EVO (Energy Verification Organisation) et des informations supplémentaires sont disponibles à l'adresse suivante :

http://www.evo-world.org/index.php?option=com_content&task=view&id=61&Itemid=80

[92, Motiva Oy, 2005, 227, TWG, 250, ADEME, 2006, 261, Carbon_Trust_UK, 2005]

7.9 Analyse comparative

7.9.1 Raffineries d'huile minérale

L'industrie du raffinage considère déjà les questions d'efficacité énergétique sérieusement car les coûts d'énergie représentent plus de 50 % des coûts d'exploitation globaux. Au niveau d'une seule raffinerie, le facteur d'intensité énergétique permet de suivre la performance énergétique. En réalité, il est plus simple d'utiliser le rapport entre l'énergie consommée globalement sur le site et la quantité de pétrole brut traité, qui est équivalent au facteur d'intensité énergétique (EIF). Le suivi de ce rapport au fil du temps nécessite une interprétation, afin de clarifier ce qui provient de la gestion de l'énergie et ce qui provient d'autres facteurs. Toutefois, ce rapport ne peut pas être utilisé aux fins de comparer la performance énergétique de plusieurs raffineries, car les raffineries sont toutes différentes en termes de complexité, schémas d'implantation, produits bruts traités et mélanges de production. Tous ces paramètres ont une incidence sur les besoins énergétiques de ces raffineries.
Les raffineries de pétrole convertissent le pétrole brut en produits pétroliers commercialisables et consomment de l'énergie au cours de ce procédé. Chaque raffinerie est une combinaison unique et complexe d'unités de traitement individuelles. Des indicateurs qui tentent d'appréhender cette complexité ont été développés afin de surveiller la performance énergétique d'une raffinerie donnée au fil du temps et d'évaluer la performance énergétique relative de différentes raffineries. Une tentative pour rendre compte de cette complexité s'est concrétisée par l'indice d'intensité énergétique Solomon pour les raffineries. Il revient à Solomon Associates d'avoir introduit le concept de l'indice d'intensité énergétique (EII). Solomon Associates effectue tous les deux ans à l'échelle du monde entier une étude analytique des raffineries. Elle en couvre tous les aspects tels que capacité, coûts d'entretien, dépenses de fonctionnement et performance énergétique. La performance énergétique est mesurée par le biais de l'indice d'intensité énergétique (EII), qui est défini comme suit :

$$EII = 100 \times \frac{\text{Énergie totale réelle consommée par la raffinerie}}{\Sigma(\text{production par unité x standard énergie par unité}) + \text{chaleur sensible} + \text{énergie hors site}}$$

Dans cette équation :

- le numérateur correspond à la consommation énergétique totale réelle de la raffinerie (exprimée en valeur de chauffage plus basse) qui est égale à la consommation totale de combustible / électricité (à la fois d'importation et de génération interne), mais aussi prend en compte toute exportation de vapeur et/ou d'électricité. L'électricité provenant du réseau externe est convertie en énergie primaire en utilisant un facteur d'efficacité standard de 37,5 %
- le dénominateur correspond à la consommation d'énergie standard selon Solomon (dénommée énergie-guide) et comprend trois éléments principaux :
  - la somme des énergies-guides pour chacune des unités de production : ces énergies-guides sont calculées en multipliant la capacité utilisée par l'unité (rendement normal ou taux d'alimentation) avec un facteur standard d'énergie spécifique à l'unité, fourni par Solomon, pour chaque unité. Pour certaines unités de production, ce facteur énergétique dépend de la qualité de la charge d'alimentation (par ex. densité du pétrole brut) /de la sévérité du traitement (reformeurs catalytiques, craqueurs catalytiques, etc.) / du type d'installation de

production, etc. Ces énergies-guides par unité sont totalisées pour donner la consommation totale d'énergie normale pour toutes les installations de production des raffineries selon Solomon

- un facteur thermique sensible : ce facteur prend en compte l'énergie requise pour élever la température jusqu'à 104,4 °C. La base de calcul pour les entrées de l'installation est constituée par tous les flux d'entrée de matières premières brutes (et leurs densités respectives) qui sont « traités » dans des unités de traitement. Les stocks de mélange ne sont pas pris en compte
- un facteur énergétique hors site : ce facteur tient compte de l'énergie consommée dans les systèmes de distribution des utilités et pour le mélange des produits, les parcs de stockage (chauffage des réservoirs, chauffage des tuyauteries d'évacuation, installations de terminaux) et les installations environnementales. La base de calcul est constituée par les entrées de matières premières dans les unités de traitement ainsi que dans les opérations de mélange et un facteur de complexité de la raffinerie.

L'indice EII est sans dimension et par opposition à la définition de EEI présentée dans la Section 1.3, diminue avec l'augmentation des performances énergétiques.

L'indice d'intensité énergétique (EII) tente de référencer les rendements énergétiques des raffineries ayant des complexités différentes et des unités différentes. Néanmoins cet outil est considéré par l'industrie du raffinage comme un outil imparfait à des fins de comparaison au mieux. Certaines raffineries dont l'indice d'intensité énergétique (EII) est médiocre ont peu d'occasion d'améliorer leurs performances énergétiques, tandis que d'autres ayant un bon indice d'intensité énergétique (EII) ont parfois toujours un large potentiel d'améliorations. En outre, l'indice d'intensité énergétique (EII) ne donne pas un bon aperçu des zones /unités qui nécessitent une amélioration. Le fractionnement détaillé du site en unités principales de production peut s'avérer une aide meilleure à cette fin pour identifier des occasions d'amélioration de la performance énergétique.

[227, TWG]

7.9.2 Agence autrichienne de l'énergie

Le rapport de l'Agence autrichienne de l'énergie (AEA) intitulé « Analyse comparative de l'énergie à l'échelle des sociétés, journal des rapports de société » donne des facteurs d'analyse comparative autres que ceux spécifiques de la consommation énergétique. Par exemple, des scores pour l'utilisation de certaines technologies permettant de réaliser des économies d'énergie (voir Chapitre 3) :

- fréquence des vérifications des chaudières (100 % des usines ont mentionné des vérifications fréquentes des chaudières)
- fréquence des vérifications des conduites d'air comprimé (25 % des usines ont systématiquement éliminé les branches mortes des systèmes lors du changement de processus et 50 % d'entre elles vérifient occasionnellement les branches mortes)
- utilisation de technologies d'économie d'énergie (entraînements à vitesse variable, moteurs à haut rendement (EEM) /, récupération de chaleur, pompes à chaleur et éclairage économe en énergie, entretien des chaudières et air comprimé).

Toutefois, il peut s'ensuivre une approche par le bas (c'est-à-dire entraîner le remplacement de certains composants spécifiques) plutôt qu'une évaluation des systèmes globaux.

7.9.3 Schéma pour les PME en Norvège

La Norvège possède déjà un plan d'analyse comparative accessible sur internet pour les PME. L'analyse comparative repose sur une comparaison des consommations spécifiques (par ex. kWh/kg) des entreprises. Les consommations spécifiques sont calculées en fonction de la consommation d'énergie totale et de la production totale du site. À ce jour, 43 groupes de référentiels différents ont été établis parmi les 800 sociétés participantes. Comme une usine produit en principe des produits différents avec des intensités d'énergie différentes, des facteurs de correction sont utilisés pour normaliser ces différences.

7.9.4 Accords de type volontaire fondés sur des analyses comparatives aux Pays-Bas

Au Pays-Bas, des accords à long terme (covenants) entre le gouvernement et de grosses sociétés (dont la consommation est supérieure à 0,5 PJ/an) reposent sur une analyse comparative. Ces accords fournissent un cadre en vue de la réduction des émissions de CO_2 (voir Chapitre 5).

Un exemple clé est l'industrie du papier et des cartons néerlandaise, qui comporte 26 usines de fabrication et qui est une forte consommatrice d'énergie aux Pays-Bas. Les sociétés participantes s'engagent à prendre des mesures de réduction d'énergie pour amener leurs installations au niveau des meilleures installations mondiales de leur secteur industriel. Dans ce contexte « figurer parmi les meilleures installations mondiales » signifie être parmi les 10 % d'installations efficaces sur le plan énergétique. L'association nationale des industries a joué un rôle capital dans la gestion du processus d'analyse comparative et a nommé deux consultants, un comptable et un ingénieur ayant une expérience de l'industrie.

L'accord prévoit que l'efficacité énergétique est calculée en utilisant le pouvoir calorifique inférieur des combustibles primaires utilisés à toutes fins, dans un emplacement (par ex. génération de vapeur et d'énergie, chauffage direct, moteurs à combustion). L'électricité provenant du réseau national ou envoyée à celui-ci, est convertie à un rendement standard de 40 %.

Les consultants ont évalué les informations relatives aux performances énergétiques des usines à papier dans le monde entier, disponibles dans le domaine public ainsi que celles provenant de leurs propres bases de données. Étant donné que les usines à papier néerlandaises fonctionnent uniquement à l'extrémité aval du procédé de fabrication du papier (sans fabrication de pâte) l'évaluation a été restreinte aux unités d'exploitation dans cette partie du procédé. Les unités génériques suivantes ont été référencées :

- préparation des stocks
- machine à papier
- traitement final (enroulement, découpe, emballage, etc.)
- transformation de l'énergie
- utilités générales et auxiliaires.

Les informations relatives aux performances provenant de différentes unités ont été rendues comparables grâce à l'introduction de facteurs de correction dont on s'est servi par exemple, pour des aspects tels que la composition des matières premières, le désencrage, la coupe, les installations de traitement des eaux résiduaires et la configuration de l'énergie.

Les installations au meilleur niveau mondial (top 10 %), en matière d'efficacité énergétique ont été identifiées pour six sous-segments de l'industrie, en fonction du produit final :

- papier journal,
- papier d'impression et papier écriture,
- papier mousseline,
- carton compact pour caisses,
- carton et carton pour boîtes pliables,
- petites usines de papier spécial.

(Un schéma similaire est exploité en Belgique, dans la province de Flandres)
[227, TWG]

7.9.5 Analyse comparative dans l'industrie du verre

L'industrie du verre étudie actuellement plusieurs méthodes pour identifier les opérations de fusion du verre les plus efficaces au plan énergétique :

- meilleures méthodes ayant fait leurs preuves et applications de bilans énergétiques
- détermination de l'énergie théorique ou de la demande enthalpique et du niveau de consommation d'énergie qui est, en pratique, le plus faible
- analyse comparative de la consommation spécifique des fours industriels de verrerie
- développement de nouvelles techniques de fusion et d'affinage.

Depuis 1999, des données sur environ 250 fours de verrerie ont été recueillies à des fins d'analyse comparative pour les différents secteurs de l'industrie du verre. Malheureusement, il n'a pas été possible d'obtenir des données complètes et fiables à l'échelle mondiale ; des données provenant d'Europe, du Japon, des Etats-Unis, du Canada et de la Turquie ont néanmoins pu être obtenues.

Il est possible d'utiliser différentes méthodes de classement :

- de la consommation d'énergie spécifique la plus faible à la plus élevée et définition des 10 % de fours en tête du palmarès mondial ;
- classement par « meilleur d'une région », en utilisant la moyenne des fours d'une région comme point de référence ;
- la plus faible consommation d'énergie d'un four de verrerie pouvant être atteinte en appliquant toutes les meilleures techniques disponibles (issues de la littérature, des fournisseurs et du BREF GLS (Verrerie).

Une demande d'énergie théorique a été calculée et des modèles thermodynamiques sont disponibles. À une température de 1 400 °C, une demande type pour un lot de soude-chaux-silice est d'environ 0,52 MJ/kg de verre pour les réactions chimiques et de 1,75 MJ/kg pour chauffer le verre fondu.
Les paramètres ayant permis de déterminer l'efficacité énergétique sont les suivants :

- fractions de calcin (verre recyclé) dans le lot
- sélection de matières premières
- âge et type du four
- tirée spécifique et tirée totale
- âge du four
- boosting électrique
- préchauffage du mélange
- autres facteurs tels que :

- modèles de four et isolation
- bilan air excédentaire
- type de brûleur et de combustible.

Les données ont été normalisées en énergie primaire pour tenir compte de l'électricité consommée et de la génération d'oxygène pour les fours à oxycombustion et pour le niveau de calcin dans la charge. Il existe des arguments pour envisager de normaliser d'autres paramètres, par exemple, le four pourrait être normalisé à 0 année (c'est-à-dire neuf), mais dans ce cas, les réparations à froid ne seraient pas prises en compte pendant la campagne d'amélioration de l'efficacité énergétique, etc.

En conséquence, le niveau 10 % a été identifié à 4 285 MJ/t de verre fondu, avec une différence entre le four le plus efficace au plan de l'énergie et le four de classement moyen (50 % ile) était de 25 %. La meilleure pratique pour le verre de conditionnement et le verre flotté a été identifié.

7.9.6 Allocation d'énergie / d'émissions de CO_2 entre différents produits dans un procédé complexe comportant des étapes successives

L'Union des Syndicats des Industries des Produits Amylacés et de leurs dérivés (USIPA), l'association des amidonniers en France, avec la contribution de PriceHousewaterCoopers, a mis au point une méthodologie d'évaluation / d'allocations de l'énergie dans le procédé de production de l'amidon et de ses dérivés. Cette méthodologie a été utilisée :

- pour allouer des emplois de l'énergie à différentes étapes du traitement et à différents types de produits
- pour allouer des émissions de CO_2 à différentes étapes du traitement et à différents types de produits
- pour réaliser des améliorations de consommation d'énergie.

Elle peut donc être utilisée comme outil de référence.

L'industrie de l'amidon se caractérise par un large éventail de produits qui sont obtenus à partir de quelques matières premières au cours d'un procédé en plusieurs étapes successives. Le produit d'une étape peut être soit commercialisé pour des utilisations propres à certains clients, soit traité davantage dans l'usine d'amidon afin d'obtenir d'autres produits.

Ces étapes de production sont bien identifiées dans des zones de travail spécifiques et/ou dans des équipements spécifiques et il s'agit soit de procédés continus ou discontinus.

Matières premières → amidon → sucre→ produits → polyols

Pour simplifier l'approche, les produits ont été triés par familles homogènes (amidon séché– naturel ou modifié), sucres liquides, sucres séchés, dextrose liquide, dextrose séché, polyols liquides, polyols séchés, produits de fermentation.

Les emplois de l'énergie (qui peuvent être équivalents aux émissions de CO_2), sont alloués aux différentes étapes du traitement et par conséquent aux quantités de produits commercialisés. Des coefficients spécifiques peuvent être calculés en rapport avec les produits commercialisés. Comme la teneur en eau peut varier d'une étape à l'autre au cours du procédé, tous les calculs sont effectués en référence à des produits sous forme de solides séchés à 100 %.

Par exemple, pour les émissions de CO_2, l'émission de CO_2 spécifique est allouée à chaque étape de traitement, en fonction des quantités de vapeur utilisées dans l'étape du procédé (à travers les émissions de CO_2 liées à la production de vapeur sur site) et avec des combustibles utilisés dans les sécheurs dans cette étape du procédé. Les émissions de CO_2 spécifiques peuvent ensuite être allouées à un produit, par l'addition des émissions de CO_2 spécifiques dans chacune des étapes de production successives.

La méthodologie ne présente aucun avantage en elle-même mais constitue un outil pour comprendre :

- la contribution de chaque étape de production à la consommation / l'intensité énergétique, et/ou aux émissions de CO_2
- la contribution des différentes familles de produits au modèle de consommation d'énergie d'une usine.

La mise en œuvre des techniques implique des tâches administratives et d'avoir accès aux informations d'exploitation (volume produit, utilisations de l'énergie, etc) au niveau des ateliers, pour chacune des différentes étapes de traitement.

Exemples :
Émissions de CO_2 pour les usines d'amidon françaises – facteurs d'émission spécifiques des produits

Cette méthodologie a également été utilisée dans une société d'amidon française pour mettre en place un engagement volontaire dans le but de limiter les émissions de gaz à effet de serre (AERES).

Références bibliographiques
USIPA – rapports PWC [227, TWG]

7.10 Exemples du chapitre 3

7.10.1 Vapeur

Exemple 1 - Isolation des vannes
L'isolation d'une seule vanne de 100 mm régulant la vapeur à 800 kPa (8 bars) (175 ºC) située à l'intérieur devrait permettre de réduire les pertes de chaleur de 0,6 kW. La réduction des coûts de combustible de la chaudière ainsi obtenue serait de 40 EUR/an et se traduirait par une économie d'énergie de 5 MWh/an.

Pour Johnson Matthey Catalysts à Teesside, Royaume-Uni, l'installation d'enveloppes d'isolation thermique sur les vannes et les brides s'est traduite par :

- des économies d'énergie annuelles de 590 MWh
- des économies de charbon de 29 tonnes/an
- une période de recouvrement de l'investissement de 1,6 an.

Exemple 2 - Préchauffage de l'eau d'alimentation incluant l'utilisation d'économiseurs (voir Section 3.2.5)
Il est possible d'utiliser un économiseur pour une chaudière à gaz ayant une capacité de production de 5 t/h de vapeur à 20 bar g.

La chaudière produit de la vapeur avec un rendement de 80 % et pendant 6 500 heures par an. Le coût du gaz à l'achat est de 5 EUR/GJ.

L'économiseur sera utilisé pour préchauffer l'eau douce de la chaudière avant qu'elle n'alimente le dégazeur. La moitié du condensat est récupérée, l'autre moitié est complétée avec de l'eau douce. Cela signifie que l'économiseur permet d'apporter une amélioration de 4,5 %.

Le coût d'utilisation actuel de la chaudière s'élève à :

- $\frac{6500 \text{ h/an} \times (2798{,}2 - 251{,}2) \text{ kJ/kg} \times 5 \text{ t/h} \times 5/\text{GJ}}{0{,}80 \times 1000}$ = 517 359 EUR/an

Le coût d'exploitation annuel est réduit avec l'installation de l'économiseur à :

- $\frac{6500 \text{ h/an} \times (2798{,}2 - 251{,}2) \text{ kJ/kg} \times 5 \text{ t/h} \times 5/\text{GJ}}{0{,}845 \times 1000}$ = 489 808 EUR/an

- Les économies s'élèvent ainsi à 27 551 EUR/an.

Exemple 3 - Installation d'un économiseur (Voir section 3.2.5)
Une chaudière génère 20 400 kg /h de vapeur à 1 bar g en brûlant du gaz naturel. Le condensat est renvoyé à la chaudière et mélangé avec une eau de complément pour donner une eau d'alimentation à 47ºC. La température de la cheminée est de 260ºC. La chaudière fonctionne 8 400 h/an avec un coût énergétique de 4,27 USD/ GJ. Avec l'installation d'un économiseur, les économies d'énergie peuvent être calculées comme suit :

-

Valeurs d'enthalpie :

- pour la vapeur saturée à 1 bar g = 2780 kJ/kg
- pour l'eau d'alimentation à 47°C = 198 kJ/kg

Sortie thermique de la chaudière = 20 400 kg/h x (2781 -198) kJ/kg = 52,693 millions kJ/h = 14 640 kW.

La chaleur récupérable correspondant à une température de cheminée de 260°C (500°F) et à une charge de chaudière à gaz naturel de 14 640 kW est présentée dans le Tableau 3.7, Section 3.2.5. comme étant égale à ~ 1350 kW.

Économies annuelles = 1350 kJ/s x USD 4,27/106 kJ x 8400 h/an x 3600 s/h = 174 318 USD /an =197 800 EUR/an ((1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion : 1er janvier 2002)

Prévention et élimination des dépôts de tartre sur les surfaces de transfert de chaleur (voir Section 3.2.6.)

Exemple 1
Une chaudière à vapeur consomme 304 000 Nm³ de gaz naturel par an et fonctionne en moyenne 8 000 heures par an. Si on laisse se former une épaisseur de tartre de 0,3 mm sur la surface d'échange de chaleur, le transfert de chaleur est alors réduit de 2,9 %.

L'augmentation annuelle des coûts d'exploitation par rapport à la situation initiale est :

304 000 Nm³/an x 2,9 % x 0,15 EUR /Nm³ = 1322 EUR par an.

Exemple 2
Une chaudière utilise 474 800 GJ de fuel tout en fonctionnant 8 000 heures par an à sa capacité nominale de 20 400 kg/h) de vapeur à 1 bar g. Si on laisse se former une épaisseur de tartre de ≈ 0,8 mm d'épaisseur sur les tubes de la chaudière et si ce tartre est de composition « normale », la perte de combustible occasionnée est de 2 %. L'augmentation des coûts d'exploitation, en supposant que le prix de l'énergie soit de 2,844 USD/GJ, est :

Augmentation des coûts d'exploitation annuels = 474 800 GJ x 2,844USD/GJ x 0,02 = 27 000 USD = 30 637 EUR (1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion : 1er janvier 2002)

Minimisation des purges (voir Section 3.2.7)

Exemple 1
Un système de commande de purge automatique est installé sur une chaudière à combustion tubulaire, qui génère de la vapeur à 25 bars pendant 5500 heures par an. Le système de purge va réduire le taux de purge de 8 à 6 %. La chaudière fournit 25 tonnes de vapeur à l'heure et son rendement s'élève à 82 %. Le prix du gaz est de 5 EUR/GJ.

L'eau d'appoint est fournie à 20 °C, et coûte 1,3 EUR par tonne (purification incluse). Le prix de l'évacuation de l'eau résiduaire est de 0,1 EUR par tonne.

En supposant qu'il n'y ait pas de retour du condensat, la purge ne doit être déterminée que sur le flux d'eau douce car le condensat de retour ne contient aucun sel. La conductivité de l'eau douce est de 222 µS/cm. Il s'agit là d'une indication de la quantité de sels dissous dans l'eau. L'eau d'appoint peut avoir une conductivité maximum de 3000 – 4000 µS/cm.

Le taux de purge (B) est donc calculé comme suit :
- Quantité de sels en entrée = quantité de sels en sortie
- (25 000 + B) x 222 = B x 3000

Le taux de purge est donc de : 1998 l/h ou 8 %.

La quantité initiale d'eau douce d'appoint est :

- 25 000 kg/h * (1 + 0,08) = 28000 l/h

Après installation du système de régulation de purge, elle est égale à :

- 25 000 kg/h * (1 + 0,06) = 26 500 l/h, soit une différence de 500 l/h.
- L'enthalpie de l'eau d'appoint à 25 bar g est égale à : 972,1 kJ/kg.
- L'enthalpie de l'eau d'alimentation à 20°C à pression atmosphérique est égale à : 83,9 kJ/kg.
- La différence est donc de 888,2 kJ/kg.

Les économies en coûts de combustible s'élèvent donc à :

- 500 l/h x 5500 h x 888,2 kJ/kg x 5 EUR/GJ/0,82 x 1 000 000 = 14 894 EUR/an

Des économies ont aussi été réalisées sur les coûts de purification et de purge.

La quantité d'eau économisée s'élève à : 500 l/h x 5500 h/an = 2750 t/an.

Soit une épargne de 3850 EUR/an.

L'installation génère donc des bénéfices annuels de 18 744 EUR.
[227, TWG]

Exemple 2
Supposons que l'installation d'un système de purge automatique réduise votre taux de purge de 8 à 6 %. Supposons encore dans le présent exemple qu'une chaudière à vapeur alimentée au gaz naturel ayant une capacité de production de 45 350 kg/h, 1 bar g fonctionne en continu. Supposons enfin une température de l'eau d'appoint de 16 °C, un rendement de la chaudière de 82 %, avec une évaluation du combustible à 2,844 USD/GJ et un total des coûts pour l'eau, les eaux usées et traitement de 0,001057 USD par kg. Les économies de coûts totales annuelles sont :

Eau d'alimentation de la chaudière : Initiale = 45 350/(1-0,08) = 49 295 kg/h
Finale = 45350/(1-0,06) = 48 246 kg/h
Économies en eau d'appoint = 49 295 – 48 244 = 1049 kg/h
Enthalpie de l'eau de la chaudière = 787,4 kJ/kg ; pour l'eau d'appoint à 16 °C = 65,1 kJ/kg
Économies en énergie thermique = 787,4 -65,1 = 722,3 kJ/kg.

Économies annuelles en combustible = 1049 kg/h x 8760 h/an x 722,3 kJ/kg x 2,844 GJ/0,82 x 10^6 = 23 064 USD

Économies annuelles en eau et en produits chimiques = 1049 kg/h x 8760 h/an x 0,001056 USD/kg = 9714 USD

Économies totales = 23 064 USD + 9714 USD = 32778 USD = 37 192,11 EUR (1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion : 1er janvier 2002).

Récupération de la chaleur de purge de la chaudière (Voir section 3.2.15)

Exemple 1

Un échangeur de chaleur est installé entre la canalisation de purge d'une chaudière et l'alimentation en eau douce d'appoint. La chaudière fonctionne 7600 h par an à une pression de 10 bar g et son rendement est de 82 %. Son taux de purge est de 6 % et elle brûle du gaz naturel dont le coût est de 4 EUR/GJ. Le débit de l'eau douce d'appoint est de 5,3 t/h.

Pour chaque 10 t/h de vapeur à un taux de purge de 6 %, on obtient un bénéfice au plan du rendement de 368 MJ/h (voir Tableau 3.17 de la Section 3.2.15). Pour atteindre cette valeur, l'apport en eau douce d'appoint nécessaire est de 5,3 t/h, ce qui donne un bénéfice au plan du rendement 5,3/10 x 368 = 195 MJ/h.

Les économies réalisées sont les suivantes :

$$\frac{7600 \text{ h x } 195 \text{ MJ/h x } 4 \text{ EUR/GJ}}{1000 \text{ x } 0,82} = 7229 \text{ EUR/an}$$

Isolation des canalisations vapeur et des canalisations de retour du condensat (voir Section 3.2.11)

Exemple
Dans une usine où la valeur de la vapeur est de 4,265 USD/GJ, une étude du système vapeur a permis d'identifier 30 m de conduite vapeur de 25 mm de diamètre sans isolation et 53 m d'une conduite de 50 mm de diamètre sans isolation et qui toutes deux fonctionnent à 10 bar. On a découvert en outre 76 m de conduite de 100 mm de diamètre sans isolation qui fonctionne elle aussi à 10 bar. À partir du Tableau 3.10 de la Section 3.2.11, la quantité annuelle de perte thermique est :

- Conduite de 25 mm : 342 m x 301 GJ/an par 30 m à 102 942 GJ/an
- Conduite de 50 mm : 53 m x 506 GJ/an par 30 m = 26 818 GJ/an
- Conduite de 100 mm : 76 m x 438 GJ/an par 30 m = 32 288 GJ/an
- Perte de chaleur totale = 28 547 + 7 452 + 9234)/30 = 163048 GJ/an/30 m = 5435

Les économies de coûts d'exploitation annuelles grâce à l'installation d'une isolation efficace à 90 % sont :

0,90 USD x 4,265 GJ/an x 5435 GJ/an = 20 860 USD = 23 670 EUR

(1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion : 1er janvier 2002)

Installation de plaques d'isolation amovibles sur les vannes et les raccords (voir Section 3.2.11.1)

À partir du Tableau 3.11 de la Section 3.2.11.1, il est possible de calculer les économies annuelles en combustible et en coûts, réalisées grâce à l'installation d'une plaque d'isolation d'une épaisseur de 25 mm sur un robinet-vanne de 150 mm non isolé dans une conduite de vapeur saturée à 17,24 bar g (208 °C). Si l'on suppose un fonctionnement continu au gaz naturel avec un rendement de la chaudière de 80 % et un prix du combustible de 4,265 USD/GJ :

Économies annuelles en combustible = 1751 W x 8760 h/an x 1/0,80 x 3600 s/h = 69,024 GJ/an

Économies de coûts annuelles = 69,024 GJ/an x 4,265 USD/GJ = 295 USD par robinet-vanne de 150 mm = 334,73 EUR (1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion 1 janvier 2002).

Mise en œuvre d'un programme de contrôle et de réparation pour les purgeurs de vapeur (voir Section 3.2.12)

Exemple 1

La quantité de vapeur perdue pour un purgeur de vapeur peut être estimée comme suit :

$$L_{t,y} = \frac{1}{150} \times FT_{t,y} \times FS_{t,y} \times CV_{t,y} \times h_{t,y} \times \sqrt{P_{in,t}^2 - P_{out,t}^2}$$ **Équation 7.25**

Où :

- $L_{t,y}$ est la quantité de perte de vapeur du purgeur de vapeur t (en tonnes) sur une période (an)
- $FT_{t,y}$ est le facteur d'exploitation du purgeur de vapeur t pendant une période an

- $FS_{t,y}$ est le facteur de charge du purgeur de vapeur t pendant une période an
- $CV_{t,y}$ est le coefficient de débit du purgeur de vapeur t pendant une période an
- $h_{t,y}$ est le nombre d'heures de fonctionnement du purgeur de vapeur t pendant une période an
- $P_{in,t}$ est la pression d'entrée du purgeur de vapeur t (atm)
- $P_{out,t}$ est la pression de sortie du purgeur de vapeur t (atm).

Le Tableau 7.11 présente le facteur d'exploitation $FT_{t,an}$.

	Type	FT
BT	Soufflage	1
LK	Fuite	0,25
RC	Cycle rapide	0,20

Tableau 7.11 : Facteurs d'exploitation pour les pertes de vapeur des purgeurs de vapeur

Le facteur de charge prend en compte l'interaction entre la vapeur et le condensat. Plus il y a de condensat circulant à travers le purgeur de vapeur, moins il y a d'espace pour laisser passer la vapeur. La quantité de condensat est fonction de l'application comme représenté dans le Tableau 7.12 ci-dessous :

Application	Facteur de charge
Application procédé standard	0,9
Purgeurs de vapeur pour la purge de ligne et de traçage	1,4
Flux de vapeur (sans condensat)	2,1

Tableau 7.12 : Facteur de charge des pertes de vapeur

Enfin, la dimension de la canalisation détermine aussi le coefficient de débit :

$CV = 3,43\ D^2$
Où D = le rayon de l'ouverture (cm).

Exemple de calcul :

- $FT_{t,an} = 0,25$
- $FS_{t,an} = 0,9$ parce que la quantité de vapeur ayant traversé le purgeur est condensée, mais correcte par rapport à la capacité du purgeur de vapeur
- $CV_{t,an} = 7,72$
- D = 1,5 cm
- $h_{t,an} = 6000$ heures par an
- $P_{entrée,t} = 16$ atm
- $P_{sortie,t} = 1$ atm.

Le purgeur de vapeur perd ainsi jusqu'à 1110 tonnes de vapeur par an.

Lorsque cela se produit dans une société où les coûts de vapeur sont de 15 EUR/tonne, la perte finale s'élève alors à : 16 650 EUR par an.

Si la vapeur s'échappe totalement au lieu de simplement fuir, les coûts peuvent s'élever à 66 570 EUR par an.

Ces pertes justifient rapidement la mise en place d'un système de contrôle et de gestion efficace pour tous les purgeurs de vapeur d'une société.

Exemple 2 :
Dans une usine, la valeur de la vapeur est de 9,92 USD/1000 kg. Un purgeur sur une conduite de vapeur à 10 bar g est bloqué en position ouverte. L'orifice du purgeur a un diamètre de 3 mm. Le Tableau 3.12 de la Section 3.2.12 présente la perte de vapeur estimée à 34,4 kg/h. La réparation du purgeur en panne débouche sur les économies annuelles ci-après :

Économies = 34,4 kg/h x 8760 h/an x 9,92 USD/1000 kg = 2988 USD/an = 3390,45 EUR
(1 USD = 1,1347 EUR, taux de conversion : 1er janvier 2002).

Réemploi de la vapeur de détente (voir Section 3.2.14)

Exemple 1 :
Un tuyau d'aération possède les propriétés suivantes :

- vitesse de la vapeur de détente : 1,5 m/s
- diamètre du tuyau d'aération : 102 mm
- heures de fonctionnement : 8000 h/an
- rendement de la chaudière : 82 %
- coût du combustible : 4,265 USD/GJ

Un condenseur d'évacuation peut condenser la vapeur de détente, transférer son énergie thermique à l'eau d'appoint entrante, et la renvoyer à la chaudière. L'énergie est récupérée sous deux formes: eau d'appoint plus chaude et condensat, distillé, propre, prêt à l'emploi.

Potentiel de valorisation énergétique d'un condenseur d'évacuation					
Diamètre des tuyaux (mm)	Contenu énergétique, GJ/an*				
	Vitesse de la vapeur, m/s				
	1	1.5	2	2.5	3
50	95	148	195	243	295
102	390	586	781	976	1171
152	881	1319	1757	2200	2638
254	2442	3661	4885	6198	7327
* En supposant un fonctionnement continu, une eau d'appoint à 21 °C, et une vapeur condensée à 38 °C					

Tableau 7.13 : Potentiel de valorisation énergétique d'un condenseur d'évacuation pour plusieurs vitesses vapeur et diamètres de tuyaux
Adapté de [123, US_DOE]

Si l'on se rapporte au Tableau 7.13, le potentiel d'énergie récupérée à partir de la valeur de détente est de 586 GJ, en supposant 8670 heures de fonctionnement annuel. Les économies de coût de combustible potentielles à l'année sont :

- Énergie récupérée par an = 586 GJ/an x 8000 h/an/8760 h/an x 1/0,82 = 652 GJ

- Économies de coût de combustible potentielles annuelles = 652 GJ x 4,265 USD/GJ = 2781 USD = 3155,57 EUR (1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion : 1er janvier 2002).

** Il convient de remarquer que les économies annuelles de combustible sont indiquées par condenseur d'évacuation. Il y a souvent plusieurs condenseurs de ce type installés dans une installation de vapeur, et les économies totales peuvent atteindre un montant important. Le coût de l'échangeur de chaleur supplémentaire doit encore être pris en compte, mais la littérature disponible indique un retour sur investissement rapide en ce qui concerne cette mesure.

Dans le Tableau 7.14, la quantité de vapeur obtenue par livre de condensat de détente est indiquée en fonction à la fois de la pression de la vapeur et de celle du condensat.

Détente du condensat haute pression				
Condensat haute pression (bar g)	**Pourcentage de condensat détendu (kg de vapeur/kg de condensat)**			
	Vapeur basse pression (bar g)			
	3,4	**2**	**1**	**0,34**
15	10,4	12,8	15,2	17,3
10	7,8	10,3	12,7	14,9
7	4,6	7,1	9,6	11,8
5	2,5	5,1	7,6	9,9

Tableau 7.14 : Pourcentage de vapeur obtenue par masse de condensat en fonction de la pression du condensat et de la pression de la vapeur

Exemple 2 :

Dans une centrale où le coût de la vapeur est de 4,265/GJ on génère de la vapeur saturée à 10 bar g dont une partie est soumise à un étranglement afin de réduire la pression pour fournir de la vapeur à 2 bar g. Si l'on suppose un fonctionnement continu, déterminer les économies annuelles pour la production de vapeur basse pression par détente de 2268 kg/h de condensat à 10 bar g. La température moyenne de l'eau d'appoint de la chaudière est de 21 °C.
À partir du tableau ci-dessus, lorsque le condensat à 10 bar g, est détendu à 2 bar g, 10,3 % du condensat se vaporise.

Vapeur basse pression produite = 5000 lb/h x 0.103 = 515 lb/h

À partir des tableaux de vapeur ASME, les valeurs d'enthalpie sont les suivantes :

- Pour la vapeur saturée à 2 bar g = 2725,8 kJ/kg
- Pour l'eau d'appoint ont 21 °C = 88,4 kJ/kg.

- Les économies annuelles sont obtenues comme suit :

Économies annuelles = 233,6 kg/h x (2725,8-88,4) kJ/kg x 8760 h/an x 4,265 USD/GJ = 23019 USD = 26 119,37 EUR
(1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion : 1 janvier 2002).

Minimisation des pertes dues aux cycles courts des chaudières
Exemple 1 :

Une chaudière de 745,7 W avec un rendement cyclique de 72,7 % (E_1) est remplacée par une chaudière de 447,7 W avec un rendement cyclique de 78,8 % (E_2). Les économies de coûts annuels peuvent être calculées comme suit :

- Économies partielles de combustibles = $(1 - E_1/E_2) = 1 – 72,7/78,8) \times 100 = 7,7$ %

Si la chaudière d'origine consommait annuellement 211 000 GJ de combustible, les économies liées à l'adoption d'une chaudière plus petite (compte tenu d'un coût de combustible de 2,844 USD/GJ) sont :

- Économies annuelles = 211 000 GJ x 0,077 x 2,844 USD/GJ = 46 200 USD = 52 422,56 EUR (1 USD = 1,1347 EUR, date de conversion 1 janvier 2002).

7.10.2 Récupération de chaleur

Nettoyage à l'acide des échangeurs de chaleur

Les usines ayant adopté le procédé Bayer, un procédé connu d'extraction de l'alumine à partir de la bauxite, dénommées également raffineries d'alumine, opèrent un lessivage à la soude caustique du minerai à des températures élevées, qui peuvent atteindre 250 °C, comme dans la raffinerie d'alumine italienne de référence (qui sera décrite dans la présente section) et dans bon nombre d'autres raffineries, ou à des températures aussi faibles que 140 °C, comme dans certaines usines australiennes occidentales, en fonction du type de bauxite.

La réaction ou phase de digestion est suivie par une phase de dépressurisation dans laquelle, au cours d'un certain nombre d'étapes de détente progressive, la température et la pression de la liqueur diminuent jusqu'à atteindre les conditions atmosphériques.

La vapeur de détente issue de cette phase est récupérée par condensation, du côté calandre dans une série de condenseurs multitubulaires à calandre où circule du côté tube la liqueur caustique renvoyée à la phase de réaction. L'efficacité de la récupération de la vapeur de détente joue un rôle très important dans l'efficacité énergétique du procédé dans son ensemble, car plus la récupération est élevée, plus la demande en vapeur d'eau douce alimentant les autoclaves est faible, et par conséquent, plus la consommation de fioul du procédé est faible.

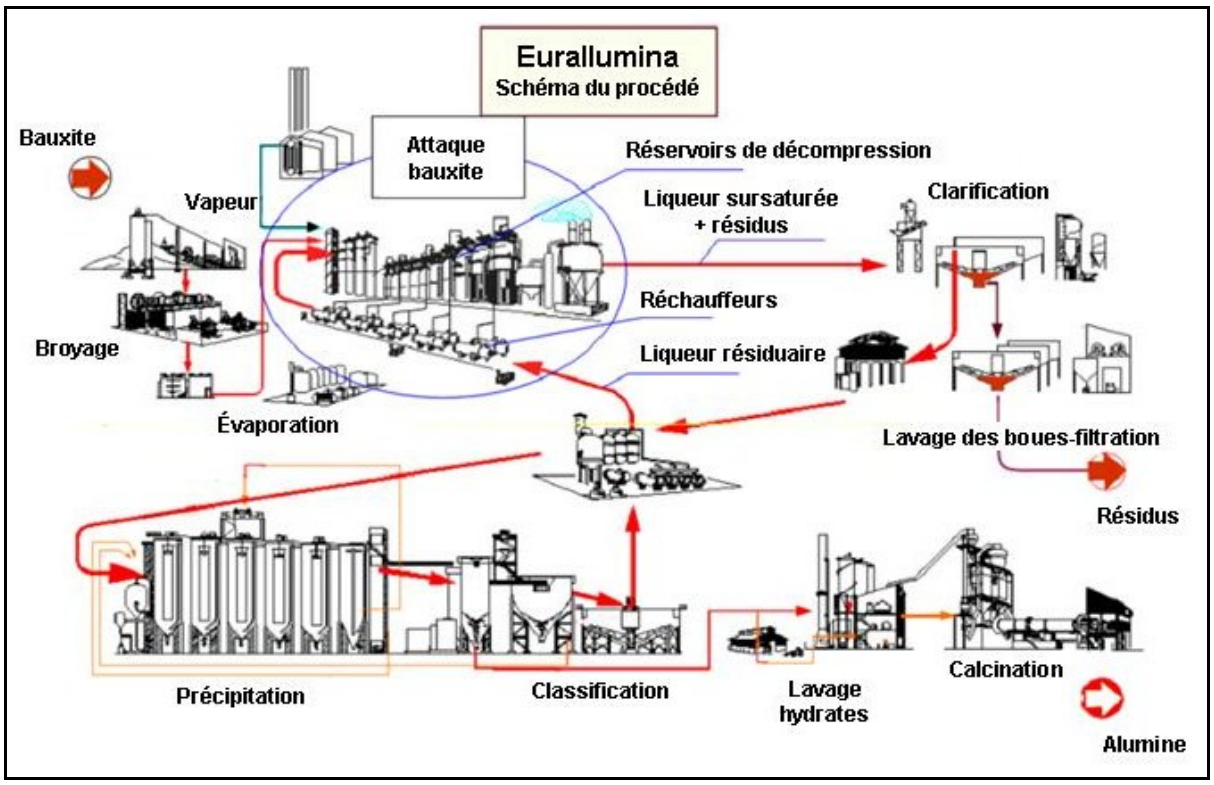


Figure 7.14 : Schéma du procédé utilisé dans la raffinerie d'alumine Eurallumina [48, Teodosi, 2005]

Description (de la technique d'efficacité énergétique)

Les réchauffeurs à calandre et tube sont soumis à un programme de nettoyage à l'acide, pour rénover la surface interne des tubes et restaurer l'efficacité du transfert de chaleur. Les tubes sont en réalité soumis à une formation de dépôt de silice qui est précipité à partir de la liqueur du procédé et qui se produit en particulier à des températures élevées.

Bien que les raffineries adoptent en principe un traitement de désilication, le niveau de silice dans la liqueur du procédé Bayer est tel que le taux d'entartrage peut avoir une incidence grâce sur la récupération de la vapeur détendue et sur l'efficacité énergétique.

L'optimisation de la fréquence du programme de nettoyage à l'acide est un moyen d'améliorer le coefficient de transfert de chaleur moyen des réchauffeurs et par conséquent de réduire la consommation de fioul du procédé.

Avantages obtenus pour l'environnement (en particulier améliorations de l'efficacité énergétique)

Les cycles de fonctionnement des réchauffeurs sont passés de 15 à 10 jours et en conséquence, la fréquence du programme de nettoyage à l'acide des tubes a augmenté. Ce changement opérationnel a permis d'obtenir une augmentation du coefficient de transfert de chaleur moyen et une amélioration de la récupération de la vapeur détendue. Voir Figure 7.15.

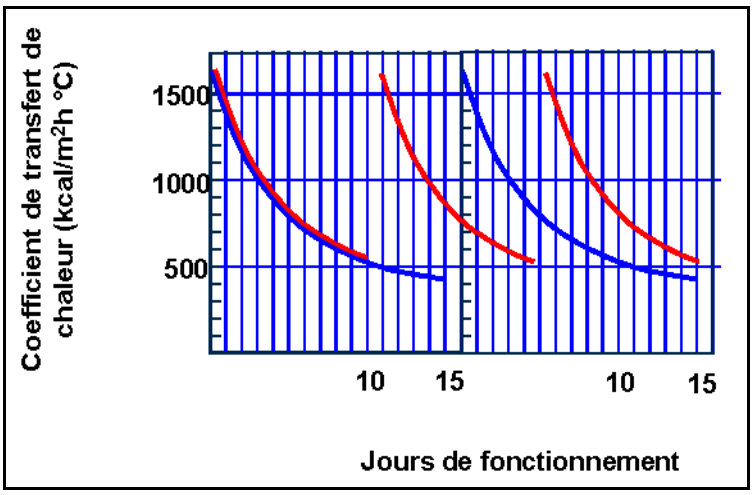


Figure 7.15 : Cycle opérationnel de réchauffeurs
[48, Teodosi, 2005]

Effets croisés
Le seul effet secondaire provoqué par la mise en œuvre de cette technique peut être représenté par la quantité supplémentaire d'acide libéré, en raison de l'augmentation de la fréquence du nettoyage à l'acide qu'il faut finalement éliminer. Dans le cas de la raffinerie d'alumine, toutefois, cela ne crée pas de problèmes environnementaux, car l'acide libéré par cette opération est éliminé avec les résidus du procédé, ou la bauxite épuisée, qui sont alcalins. Le mélange de ces deux résidus offre en fait l'opportunité d'une neutralisation des déchets du procédé (les dénommées boues rouges), avant leur envoi dans le bassin à boues.

Données opérationnelles
Les données opérationnelles sont celles concernant les consommations d'énergie et de fioul qui ont déjà été mentionnées. En ce qui concerne les émissions, le fioul économisé au niveau des chaudières se traduit par une réduction correspondante des émissions de la cheminée de la chaudière, évaluées autour de 10 000 tonnes CO_2/an et aussi de 150 tonnes SO_2/an avant l'adoption du procédé de désulfurisation, qui a été mis en place dans la raffinerie en 2000.

La technique du nettoyage à l'acide des tubes doit être étayée par la préparation de la solution d'acide à la concentration recommandée et avec l'addition d'un inhibiteur de corrosion approprié pour protéger la surface métallique. Une technique utile pour améliorer la protection contre une attaque du métal par l'acide, au cours de la circulation de l'acide à l'intérieur des tubes, consiste à faire circuler de l'eau froide du côté calandre, afin d'éviter une augmentation incontrôlée de la température en un point des tubes.

Applicabilité
Les réchauffeurs à température élevée de la raffinerie de référence ont été équipés de tubes en acier inoxydable afin d'éliminer l'apparition du phénomène de fuites des tubes. Ce choix a été retenu en raison de l'importance accordée à la continuité du procédé, par la production d'un bon condensat, utilisé comme eau d'alimentation des chaudières. Ce facteur contribue également à une plus grande durée de vie des réchauffeurs (au-delà de 12 ans) malgré la fréquence du programme de nettoyage à l'acide.

Aspects économiques
Les coûts associés avec cette nouvelle procédure peuvent être donnés par l'investissement mineur nécessaire pour certaines installations, requis par l'augmentation de la fréquence de nettoyage, ainsi

que par la société chargée de cette opération. Les économies relatives au procédé sont celles citées en termes d'économie de fioul et de réduction des émissions.

L'amélioration obtenue au plan de l'efficacité énergétique du système peut être estimée à une réduction de la consommation de fioul autour de 3 kg/tonne d'alumine, qui correspond à 1,6 % de la consommation de fioul du procédé. Étant donné le taux de production de la raffinerie qui avoisine 1 Mtonne d'alumine/an, l'économie réalisée est équivalente à 3 000 tonnes de fioul par an.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Raisons économiques.

Exemples
Eurallumina, Portovecompany, Italie.

Références bibliographiques
[48, Teodosi, 2005]

Récupération du surplus de chaleur d'une usine à papier

Description (de la technique d'efficacité énergétique)
Une coopération entre les municipalités et l'industrie peut être considérée comme un moyen important d'améliorer l'efficacité énergétique. Un bon exemple d'une telle coopération est celle de la commune de Lindesberg, en Suède, une petite municipalité d'environ 23 000 habitants. La société AssiDomän Cartonboard de Frövi, Suède livre son surplus de chaleur au réseau de chauffage urbain depuis 1998. Ce réseau est exploité par Linde Energi AB (la société de fourniture d'énergie de la municipalité). Les livraisons couvrent plus de 90 % de la demande du système de chauffage urbain. La chaleur est distribuée par le biais d'une tuyauterie de 17 km de long avec une conduite d'acheminement et de retour, jusqu'à Lindesberg.

L'usine à papier s'efforce de réduire sa pollution environnementale et en conséquence, la consommation d'eau a considérablement diminué au cours des dernières décennies. Ceci a permis à l'usine de papier de produire un surplus d'eau chaude avec une température d'approximativement 75 °C. La température d'eau chaude est encore élevée davantage dans un refroidisseur de fumées avant acheminement de la chaleur jusqu'au réseau de chauffage urbain, voir Figure 7.16.

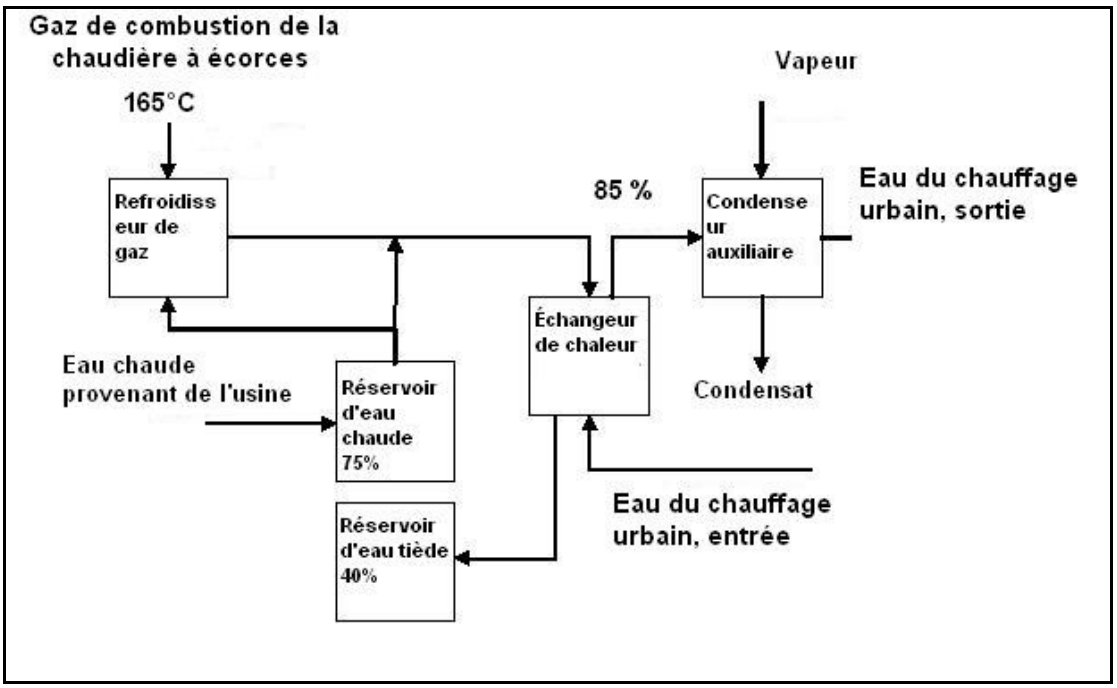


Figure 7.16 : Système de récupération de la chaleur relié au système de chauffage urbain [20, Åsbland, 2005]

Avec cet aménagement du système de récupération de chaleur, la chaleur en excès provenant de l'usine à papier, qui a été recueillie par le système de chaleur secondaire est utilisé. En outre, la chaleur des gaz d'échappement, sinon évacuée dans l'environnement, est elle aussi utilisée. L'utilisation de ces sources de chaleur ne fait en principe pas augmenter la consommation de combustible de l'usine à papier. Toutefois, lors des charges de pointe, un condensateur de vapeur auxiliaire est utilisé en série, et cette utilisation de la vapeur se traduit par une augmentation de la consommation de combustible de l'usine à papier (essentiellement de bio-combustibles).

Avantages obtenus pour l'environnement (en particulier, incluant des améliorations au plan de l'efficacité énergétique)

Avant que l'usine à papier ne soit reliée au système de chauffage urbain, 65 % de la demande de chaleur était fourni par des combustibles fossiles (fioul et gaz de pétrole liquéfié (GPL)) tandis que le reste était fourni par une pompe à chaleur d'eau souterraine électrique (35 %). Aujourd'hui, les livraisons de chaleur en provenance de l'usine à papier couvrent plus de 90 % de la demande en chauffage urbain. Les chaudières à fioul chez Linde Energi AB sont utilisées uniquement pendant les périodes les plus froides, à savoir, pendant environ 2 semaines par an et la pompe à chaleur est hors service.

Par comparaison à ce qu'était la situation avant qu'AssiDomän ne soit connectée au système de chauffage urbain, l'utilisation des combustibles fossiles a diminué de 4 200 tonnes de gaz de pétrole liquéfié (GPL) et de 200 m^3 de fioul par an. En outre, la consommation d'électricité a diminué de 11 000 MWh/an depuis que la pompe à chaleur souterraine a été mise hors service.

Effets croisés

Outre les avantages évidents d'une moindre utilisation de combustibles fossiles et d'électricité, la mise hors service de la pompe à chaleur a entraîné une réduction de la libération dans l'atmosphère de substances appauvrissant la couche d'ozone.

Données opérationnelles

Aucune donnée soumise.

Applicabilité
Ce type de coopération n'est pas limité à l'industrie et aux municipalités. Dans un parc industriel, ce type de coopération peut être très fructueux. En réalité, c'est l'une des idées sous-jacentes au concept d'éco-parcs-industriels.

Aspects économiques
Le coût total de l'investissement s'est élevé à 15 millions EUR. Linde Energi AB a reçu une subvention du gouvernement Suédois de 2,3 millions EUR (15 % de l'investissement total).

Agent moteur pour la mise en œuvre
Les agents moteurs étaient tant économiques qu'environnementaux pour la société comme pour la municipalité. Le moment était également bien choisi, étant donné que le surplus de chaleur de l'usine commençait à poser un problème (risque de pollution thermique) et que la pompe à chaleur du système de chauffage urbain nécessitait une remise en état en raison du remplacement obligatoire des CFC-fluides actifs.

Exemples

- Södra Cell Värö,Varberg
- Shell refinery, Göteborg
- Swedish Steel, Borlänge
- SCA, Sundsvall.

Références bibliographiques:
[20, Åsblad, 2005]

7.10.3 Cogénération

Moteurs à combustion interne (moteurs à pistons) Exemple : Bindewald Kupfermühle

- minoterie : 100.000 t de blé et seigle/an
- malterie: 35.000 t de malt/an

Centrale de cogénération avec moteur à pistons fixe (économie de combustible de 12,5 millions de kWh comparée à une production séparée s'élevant à 12 millions de kWh_{el} et environ 26 millions de kWh_{th})

Données techniques :
- énergie combustible : 2* 2143 k_{fuel} (gaz naturel)
- énergie électrique : 2*700 kW_{el}
- énergie thermique : 2* 1,200 kW_{th}
- génération d'électricité : environ 10,2 millions de kWh_{el}/an
- production de chaleur : about 17,5 millions de kWh_{th}/an
- nombre d'heures à pleine charge : 7286 h/an
- rapport électricité/chaleur : 0,58

Données opérationnelles :
- démarrage : décembre 1991
- niveaux de rendement :

- rendement électrique : 33 %
- rendement thermique : 56 %
- rendement combustible : 89 %

- interventions de maintenance :
  - toutes les mille heures : petit entretien
  - toutes les 10 000 heures : gros entretien
    - disponibilité : environ 90 %

- coût-efficacité :
  - dépenses d'investissement : 1,2 million EUR (équipements périphériques inclus)
  - période de recouvrement de l'investissement :
    - statique : 5 ans
    - dynamique : 7 ans

- avantage pour l'environnement :
  - économies de combustible : 12,000 MWhcombustible/an
  - réduction des émissions de CO_2 : 2 500 t/an.

Références bibliographiques
[64, Linde, 2005]

7.10.4 Trigénération

Exemple: Aéroport de Barajas, Madrid, Espagne

Les bâtiments de l'aéroport de Barajas ont des besoins énormes en chauffage et climatisation, le nouveau terminal ayant une superficie de 760 000 m² (76 hectares). Avec la mise en œuvre du concept de trigénération, les moteurs génèrent de l'électricité comme une centrale de base à fort rendement global, au lieu de rester inactifs en qualité de génératrices de secours ne contribuant pas au retour sur investissement.

La priorité entre toutes était de développer une centrale de production combinée de chaleur et d'électricité (CHP) qui soit à la pointe de la technique, sans danger pour l'environnement, et qui apporte le degré de fiabilité extrêmement élevé nécessaire à cette installation clé dans un emplacement aussi important.

La solution réside dans six moteurs polycarburantsWärtsilä 18V32DF qui brûlent du gaz naturel comme combustible principal et du fioul léger (LFO) comme combustible de secours. Toutefois le fonctionnement au fioul léger (LFO) est limité à 200 heures par an maximum, en raison des restrictions environnementales locales.

La centrale de trigénération génère une sortie électrique nette de 33 MW et elle est connectée à la fois au réseau interne de l'aéroport et au réseau public. Elle fournit de l'électricité sur une base continue, ainsi que le chauffage des nouveaux terminaux pendant l'hiver, et leur climatisation pendant l'été. Le Tableau 7.15 présente les données techniques de la centrale de production combinée de chaleur et d'électricité (CHP).

Paramètres techniques	Données	Unités
Puissance aux bornes du générateur	33,0	MW_e
Rendement thermique en mode gaz	8497/42,4 %	kJ/kWh_e
Puissance thermique brute	24,6	MW_{th}

Puissance thermique totale	30,9	MW_{th}
Circuit de récupération de chaleur	Eau 120/80	°C
Rendement énergétique de la centrale CHP	74 %	
Capacité du refroidisseur à absorption	18,0	MW_c
Capacité totale du refroidisseur	37,4	MW_c
Circuit d'eau réfrigérée	6,5/13,5	°C
Combustible normal	Gaz	
Combustible de secours	Fioul léger	
Refroidissement haute température de secours	Radiateurs	
Refroidissement basse température et refroidisseur	Tour de refroidissement	

Tableau 7.15 : Données techniques de la centrale de trigénération de l'aéroport Barajas

Six refroidisseurs à absorption mono-étagés sont installés dans le bâtiment de la centrale électrique. L'eau réfrigérée est distribuée aux consommateurs dans le nouveau terminal par le biais d'un système de canalisation séparé. Les refroidisseurs à absorption à bromure de lithium (LiBr) sont alimentés par le circuit de récupération de chaleur à 120 °C et refroidis par les tours de refroidissement.

La centrale CHP de l'aéroport Barajas de Madrid comporte une chaudière au fioul pour le chauffage d'appoint/ la couverture de la charge de pointe et des compresseurs à entraînement électrique pour le refroidissement d'appoint / la couverture de la charge de pointe.

La centrale va vendre son surplus d'électricité au réseau national auquel elle sera interconnectée en permanence. La redondance du système de distribution électrique est élevée afin de couvrir tous les dysfonctionnements de la centrale et de permettre néanmoins de continuer à alimenter l'aéroport. En cas de rupture d'alimentation du gaz, les moteurs sont toujours à même de fonctionner à pleine charge avec du GPL.

Références bibliographiques
[64, Linde, 2005]

7.11 Gestion de la demande

Description
La gestion de la demande fait habituellement référence à la gestion de la demande en électricité. Il est important de faire la distinction entre les éléments de réduction des coûts et les mesures d'économie d'énergie.

Dans la plupart des pays de l'UE (et bien d'autres), il existe une structure complexe de tarification de l'électricité, en fonction des pics d'appel de puissance, de l'heure à laquelle le réseau est sollicité et d'autres facteurs, tels que la possibilité d'accepter une limite sur la quantité fournie. La consommation en heure de pointe dans une installation peut signifier qu'une partie de l'électricité consommée sera facturée à un taux majoré et / ou que des pénalités pécuniaires contractuelles seront encourues. Il s'agit là d'un point à controler et le déplacement ou le lissage des pics se traduira par une réduction des coûts. Toutefois, ceci n'entraînera pas nécessairement une diminution de la consommation totale des unités d'énergie, et il n'y a aucune augmentation du rendement énergétique physique.

Il est par exemple possible d'éviter ou de contrôler les pics d'appel de puissance, par :

- une conversion des raccordements étoile-triangle pour les faibles charges, au moyen de convertisseurs automatiques étoile-triangle, en utilisant des démarreurs progressifs, pour les équipements à forte demande d'électricité, comme les gros moteurs, etc ;
- l'utilisation de systèmes de régulation pour décaler le démarrage des équipements par exemple au début des périodes de service (Voir Section 2.15.2)
- changer l'heure de la journée, à laquelle sont utilisés les procédés provoquant des pointes de consommation d'électricité.

Avantages obtenus pour l'environnement
Aucune communication de données

Effets croisés
Peut ne pas donner lieu à des économies d'énergie.

Données opérationnelles
Voici quelques exemples de demandes instantanées élevées :

- au démarrage d'un équipement à forte consommation électrique, comme par exemple les gros moteurs,
- au début d'une période de service, avec démarrage de plusieurs systèmes, par ex. pompes, chauffage,
- procédés comme le traitement thermique, à fortes demandes en énergie, en particulier s'ils ne sont pas utilisés constamment.

Les demandes instantanées élevées peuvent aussi provoquer des pertes d'énergie en induisant des distortions dans la régularité des cycles de courant alternatif des phases et une perte de l'énergie utile. Voir Harmoniques, Section 3.5.2.

Applicabilité
À prendre en compte dans toutes les installations.

Le contrôle peut être manuel (par ex. en changeant la tranche horaire d'utilisation d'un procédé), effectué par des dispositifs automatiques simples (par ex. minuteurs), ou lié à des systèmes de gestion des procédés et/ou de l'énergie plus sophistiqués (Voir Section 2.1.5.2)

Aspects économiques
Augmentation des coûts due à une consommation d'électricité inutile et aux pics de puissance.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Réduction des coûts.

Exemples
Utilisation fréquente.

Références bibliographiques
http://members.rediff/seetech/Motors.htm
[183, Bovankovich, 2007]
http://www.mrotoday.com/mro/archives/exclusives/EnergyManagement.htm

7.12 Sociétés de services énergétiques (ESCO)

Description
Les débats en matière de politique énergétique mettent souvent en exergue l'existence d'un potentiel d'économies d'énergie inexploité. Ce potentiel est négligé surtout en raison d'insuffisances structurelles et d'un manque d'informations des consommateurs d'énergie bien plus que pour des facteurs économiques. Le financement par tiers des projets d'économies d'énergie ou Energy performance contracting (EPC) par le biais de fournisseurs de services énergétiques, ou de sociétés de services énergétiques (ESCO ou ESCo) peut aider à accroître les économies d'énergie. Toutefois, il convient de noter qu'il existe d'autres options et mesure d'incitations de tiers.

La société de services énergétiques (ESCo) va identifier et évaluer les possibilités d'économies d'énergie puis recommander un ensemble d'améliorations pour lesquelles elle est rémunérée sur les économies réalisées. Elle garantit que les économies réalisées atteignent ou dépassent les débours annuels pour couvrir tous les coûts du projet - le plus souvent par un contrat à moyen ou long terme - par exemple de sept à dix ans. Si les économies ne se matérialisent pas, l'ESCo paye la différence.

L'importance des services d'énergie est soulignée par la Directive de l'UE relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques du 5 avril, 2006 (2006/32/CE), qui définit les services énergétiques comme suit :

Un service énergétique est « le bénéfice physique, l'utilité ou le bien résultant de la combinaison d'une énergie avec une technologie et/ou une action à bon rendement énergétique, qui peuvent comprendre les activités d'exploitation, d'entretien et de contrôle nécessaires à la prestation du service, qui est fourni sur la base d'un contrat et dont il est démontré que, dans des circonstances normales, il donne lieu à une amélioration vérifiable et mesurable ou estimable de l'efficacité énergétique et/ou des économies d'énergie primaire. »

Un fournisseur de services énergétiques peut fournir, par exemple, les types d'énergie suivants, en fonction de l'application concernée :

- énergie thermique (chauffage des bâtiments, vapeur, chaleur du procédé, eau du procédé, eau chaude)
- refroidissement (eau de refroidissement, climatisation urbaine)
- électricité (lumière et courant) à partir de centrales de cogénération ou d'installations photovoltaïques
- air (air comprimé, ventilation, climatisation).

Avantages obtenus pour l'environnement
Économies d'énergie. Les économies à atteindre feront l'objet du contrat de performance énergétique (EPC).

Effets croisés
Aucun effet croisé communiqué.

Données opérationnelles
La société de services énergétiques (ESCO) peut accomplir les tâches suivantes (par ordre chronologique) :

- identification du potentiel d'économie d'énergie
- étude de faisabilité
- détermination des objectifs et signature du contrat d'économies d'énergie

- préparation du projet en vue de sa mise en œuvre
- suivi de la construction et mise en service après achèvement des travaux
- évaluation des paramètres économiques et environnementaux réellement obtenus.

Applicabilité
Largement employé aux Etats-Unis depuis dix à vingt ans. Utilisation croissante dans l'UE.

Aspects économiques
La clause contractuelle de base du contrat de performance énergétique (EPC) signé entre l'entreprise et la société de services énergétiques (ESCO) consiste en l'obligation pour la société de services énergétiques (ESCO) de réaliser, au profit de l'entreprise, à la fois la réduction de la charge environnementale fixée et les paramètres économiques contractuels du projet. Ces paramètres peuvent donner lieu à un accord pour chacun d'eux et comportent souvent les éléments ci-après :

- un niveau garanti d'économies annuelles sur les coûts énergétiques en se référant à la situation actuelle
- un retour sur investissement garanti résultant des économies à venir sur les coûts énergétiques ainsi que d'autres retombées d'ordre financier (y compris la vente de quotas d'émission, les revenus induits par la vente de « certificats blancs », les économies réalisées sur le coût des services de l'entretien, etc.)
- un niveau de réduction d'émissions garanti
- un niveau de réduction garanti pour la consommation de combustibles primaires
- d'autres paramètres garantis comme convenu entre la société de services énergétiques (ESCO) et l'entreprise.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Les agents moteurs ci-après peuvent être sous-jacents à un contrat de performance énergétique (EPC) couronné de succès auprès d'une société de services énergétiques (ESCO) :

- réunions des qualifications nécessaires pour réagir aux facteurs déterminants ci-après (voir Section 2.6),
- méthode et conduite correcte de l'audit énergétique,
- concept proposé pour les modifications, comportant diverses options ainsi qu'une étude de faisabilité,
- choix de l'option optimale prenant en compte l'évolution future prévisible de l'entreprise,
- sélection des technologies et des procédés les plus performants dans le domaine des économies d'énergie,
- provision des fonds nécessaires pour la mise en place de technologies à bon rendement énergétique,
- choix des fournisseurs de certains composants spécifiques,
- justesse des procédures utilisées pour l'installation des technologies à bon rendement énergétique,
- mise en place effective de la performance énergétique et de l'efficacité économique telles que planifiées.

Exemples
Remplacement d'un compresseur défectueux dans un système à air comprimé
La société A utilise de l'air comprimé pour sécher des produits semi-finis. Toutefois, un compresseur défectueux empêche de les produire à pleine capacité et la société commence à ne plus pouvoir faire face à ses commandes.

La société A décide de remédier à cette situation en intégrant dans sa chaîne de production un compresseur rendant le même service et qui sera loué auprès d'un loueur de compresseurs ou auprès d'un autre fournisseur. Une fois le compresseur de la société A réparé, le compresseur loué sera restitué à son propriétaire.

Le Tableau 7.16 présente les avantages et les inconvénients d'une location d'équipement, du point de vue du consommateur d'énergie.

Facteurs	Avantages	Niveau	Inconvénients
Dépense d'investissement	Faible à long terme		Élevée à long terme
Niveau de compétence requis par l'entreprise			Relativement élevé
Niveau de qualification du personnel requis			Relativement élevé
Dépenses d'entretien et de réparation			Relativement élevé
Dépendance vis à vis de fournisseurs extérieurs		Modéré	
Dépenses de coordination et de communication		Modéré	
Sécurité de l'approvisionnement en énergie	Relativement élevé		
Objectif de garantie de la qualité	Relativement étendu	Responsabilité assumée par le client	
Transparence des coûts	Relativement élevé		
Terme du contrat	Court		
Incitations aux économies d'énergie			Relativement faible

Tableau 7.16 : Avantages et inconvénients de la location d'un équipement pour système à air comprimé (CAS)

Références bibliographiques

[279, Czech_Republic, 2006, 280, UBA_DE, 2006]
http://www.esprojects.net/en/energyefficiency/financing/esco
http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/ESCO/index.htm

7.12.1 Gestion des installations techniques

Lorsqu'une société de services énergétiques (ESCO) fournit des services de gestion d'installations techniques, elle assume la responsabilité de l'optimisation de l'exploitation, de l'entretien et des coûts de fonctionnement pour une installation particulière.

La gestion d'installations techniques améliore, en règle générale, le rendement de l'installation bénéficiaire de cette gestion, étant donné que dans la plupart des cas cela implique un investissement plus faible en technologies de mesure et de contrôle. L'installation reste la propriété du client, la seule modification étant que les services à caractère technique sont externalisés.

Le prestataire de services énergétiques facture séparément chaque service ou est rétribué au forfait. Le client peut en outre réduire sa facture d'énergie en partageant les économies d'énergie réalisées par le prestataire de services, créant ainsi une incitation à consommer de l'énergie de manière efficace et économique.

Le plus souvent, il est fait appel à la gestion des installations techniques lorsque le client recherche un fonctionnement opérationnel performant, exempt de pannes et totalement fiable et ne dispose pas à cet effet de spécialistes en nombre suffisant parmi son personnel.

Le Tableau 7.17 présente les avantages et les inconvénients d'une gestion d'installations techniques du point de vue du consommateur d'énergie.

Facteurs	Avantages	Niveau	Inconvénients
Dépense d'investissement			Élevé
Compétence requise par l'entreprise	Faible		
Niveau de qualification du personnel requis	Faible		
Dépenses d'entretien et de réparation	Faible		
Dépendance vis à vis de fournisseurs extérieurs			Élevé
Dépenses de coordination et de communication		Modéré	
Sécurité de l'approvisionnement en énergie	Relativement étendu		
Objectif de garantie de la qualité	Relativement étendu	Responsabilité assumée par le client	
Transparence des coûts (s'applique uniquement aux dépenses d'investissement et non aux coûts en énergie et autres coûts)	Élevé		
Terme du contrat	Court		
Incitations aux économies d'énergie			Relativement faible

Tableau 7.17 : Avantages et inconvénients de la fourniture d'un système à air comprimé (CAS) via une société de services énergétiques (ESCO)

Exemple :
Financement d'une installation de cogénération
La société C (une société d'imprimerie) a décidé d'accroître sa capacité de production, ce qui nécessite la réalisation d'une nouvelle installation de cogénération. Une fois que la société C s'est arrêtée sur une solution, un fournisseur de services énergétiques (qui est aussi le fabricant de l'installation) obtient le financement, et effectue la planification et la construction de l'installation conformément aux termes d'un contrat de 15 ans. Le financement est assuré par les honoraires contractuels que la société C reverse au fabricant de l'installation-et-fournisseur de services énergétiques.

7.12.2 Services d'approvisionnement en énergie finale (également dénommé contrat concernant une installation)

Dans ce cas, le fournisseur de services énergétiques planifie, finance, met en place et exploite l'installation de fourniture d'énergie aux termes d'un contrat qui est en principe établi pour une période de cinq à 20 ans. Pendant cette période, l'installation reste la propriété du fournisseur de services énergétiques. Le client passe un contrat de services énergétiques avec le fournisseur de services énergétiques pour l'achat d'une qualité spécifique d'énergie à un prix spécifique. En vertu de ce contrat, le client n'a pas son mot à dire sur le financement, l'exploitation ou l'entretien de l'installation.

Les coûts du fournisseur de services énergétiques sont inclus dans le prix global, qui comprend un prix de base (mensuel ou autre) et un prix variable en fonction de la consommation, par exemple, « x euros » par mètre cube d'eau chaude. Cette mesure est pour le client une incitation à utiliser avec économie les services énergétiques achetés.

Si le client utilise aussi le réseau de distribution du fournisseur de services énergétiques, ceci doit être inclus dans le contrat, qui doit également préciser le(s) point(s) de transfert d'énergie. Dans ce cas, le fournisseur de services énergétiques est directement responsable de la fourniture d'un espace chauffé et peut donc réduire les dépenses d'énergie de l'utilisateur final en essayant de trouver les manières les plus efficaces de fournir l'énergie finale.

Ce modèle de service énergétique est bien adapté aux nouveaux bâtiments lorsque les services énergétiques doivent être externalisés ; ou pour les bâtiments dont les systèmes énergétiques nécessitent une modernisation de haut en bas qui implique le remplacement des équipements anciens, par exemple la fourniture de chaleur à partir de systèmes de chaudières modernisés.
L'énergie finale est fournie dans approximativement 90 pour cent de tous les scénarios de contrats de services énergétiques.

Le Tableau 7.18 présente les avantages et les inconvénients de la fourniture d'énergie finale du point de vue du consommateur d'énergie.

Facteur	Avantages	Niveau	Inconvénients
Dépense d'investissement	Faible		
Compétence requise par l'entreprise	Faible		
Niveau de qualification du personnel requis	Faible		
Dépenses d'entretien et de réparation	Faible		
Dépendance vis à vis de fournisseurs extérieurs		Élevé	
Dépenses de coordination et de communication		Modéré	
Sécurité de l'approvisionnement en énergie	Élevé		
Objectif de garantie de la qualité	Élevé		
Transparence des coûts	Relativement large		
Terme du contrat			Élevé
Incitations aux économies d'énergie	Élevé		

Tableau 7.18 : Avantages et inconvénients concernant la fourniture d'énergie via une société de services énergétiques (ESCO)

7.13 Site internet de la Commission européenne et Plans d'action nationaux en matière d'efficacité énergétique (NEEAP)

La Commission européenne a un site internet consacré à l'efficacité énergétique à l'adresse suivante :

http://ec.europa.eu/energy/demand/legislation/end_use_en.htm

Comme n'importe qu'elle liste de politiques, d'actions, d'outils et de mesures à l'appui des politiques évolue rapidement au fil du temps, cette page internet est une source d'informations utile et comporte des sections et des liens sur les questions suivantes :

Législation :

- Efficacité énergétique dans les utilisations finales & services énergétiques
- Efficacité énergétique: performance énergétique des bâtiments
- Écoconception pour les appareils consommateurs d'énergie
- Étiquetage de la consommation en énergie des appareils électroménagers
- Efficacité énergétique des équipements de bureau : Programme Energy Star
- Cogénération (production combinée de chaleur et d'électricité) (avec rapports des États-membres)

- À l'étude

Plans nationaux d'action en matière d'efficacité énergétique (NEEAP)
Un tableau permet d'accéder aux fichiers PDF de tous les plans ENE et/ou aux communications destinées aux États membres, dans les langues des États membres et/ou en anglais (dans certains cas, seul un résumé est disponible en anglais. (En mars 2008, il ne manquait que les données relatives à la Suède).

Les actions des États membres sont par exemple :

- Crédits d'impôts pour les investissements en faveur des économies d'énergie
- Primes écologiques rapportées au coût des techniques d'efficacité énergétique
- Mesures d'accompagnement des projets de démonstration dans le domaine de la technologie énergétique
- Études de faisabilité
- Diagnostics énergétiques
- Certificats de cogénération (certificats bleus)
- Cadre réglementaire de planification de l'énergie, où chaque permis environnemental s'accompagne obligatoirement d'un plan ou d'une étude énergétique
- « Benchmarking covenant » à savoir un instrument de type accord volontaire, où les industries s'engagent formellement à aligner le degré d'efficacité de leurs installations (et à se soumettre à des vérifications externes) sur celui des meilleures prestations mondiales (top 10 %), en matière d'efficacité énergétique
- « Audit covenant », où les industries s'engagent à effectuer un audit énergétique complet et à mettre en oeuvre toutes les mesures réalisables au plan économique
- Certificats d'économie d'énergie (Certificats blancs), voir EuroWhiteCert, ci-dessous.
- Accords portant sur les économies d'énergie

Initiatives/Projets
Actuellement, description du projet EuroWhiteCert, avec liens permettant d'accéder aux informations les plus récentes.

Événements
Possibilité d'accès aux derniers événements, par exemple aux derniers communiqués de presse.

Liens
Outre les différents liens indiqués ci-dessus, le site comporte un lien vers le projet européen EMEEES (Evaluation and Monitoring for the EU Directive on Energy End-Use Efficiency and Energy Services), consacré aux problèmes de surveillance et d'évaluation soulevés par la directive européenne relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques.

Un lien « What's new » (« Quoi de neuf ») liste les divers documents européens publiés (rapports, foire aux questions, etc), consultations, réunions

Le bouton Plan du site permet d'accéder aux :

Documents d'orientation stratégique (Policy paper)
Législation
Accords volontaires, incluant :

- Programme européen Motor Challenge
- Programme GreenLight
- Programme Green Building

Activités promotionnelles, incluant :

- Bases de données de projets
- Publications et brochures

Programmes d'appui, incluant :
- Programmes-cadres (FP) de recherche et développement technologique (RTD)
- Programmes Énergie intelligente - Europe et programmes d'appui non-RTD
- Relations internationales

Pour plus d'informations, s'adresser à la DG TREN EnergyServices@ec.europa.eu

7.14 Système européen d'échange de quotas d'émissions (ETS)

Fondés sur les mécanismes novateurs définis par le Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques de 1992 (UNFCCC) – à savoir le mécanisme de mise en œuvre conjointe (MOC), le mécanisme de développement propre (MDP) et le mécanisme des échanges d'émissions – l'Union européenne a développé le plus important système d'échange de quotas d'émissions de dioxyde de carbone (CO_2) au niveau des entreprises, et en a fait le leader mondial du développement de ce marché émergeant.

Le Système européen d'échange de quotas d'émissions (ETS) part du principe que la création d'un prix du carbone par le biais de l'établissement d'un marché liquide pour les réductions des émissions offre aux États membres de l'UE une solution optimale en termes de coût/efficacité pour remplir leurs engagements au titre du protocole de Kyoto et opérer une transition vers l'économie du futur à faibles émissions de CO_2. Grâce à ce système, l'UE devrait atteindre son objectif de réduction des émissions, défini par le Protocole de Kyoto, à un coût annuel allant de 2,9 à 3,7 milliards d'€, soit à un coût inférieur à 0,1 % de son PIB. Sans ce système, le coût annuel aurait pu atteindre 6,8 milliards d'€.

Ce système, établi dans le cadre d'une législation contraignante, proposée par la Commission européenne et approuvée par tous les États membres de l'UE et le Parlement européen, repose sur six principes fondamentaux :

- Il s'agit d'un système à « plafonnement et échanges » ;
- Il vise initialement les émissions de CO_2 produites par les grosses installations industrielles polluantes ;
- Sa mise en œuvre procède par phases, avec des études périodiques et des possibilités de l'étendre à d'autres gaz et secteurs ;
- Les plans d'allocations de quotas d'émissions font l'objet de décisions périodiques ;
- Il comporte un cadre contraignant de respect de la législation ;
- Il concerne le marché communautaire mais permet aussi de tirer parti des possibilités de réduction des émissions dans le reste du monde à travers l'utilisation du mécanisme de développement propre (MDP) et du mécanisme de mise en œuvre conjointe (MOC), et permet

d'établir des liens avec d'autres systèmes de plafonnement des émissions compatibles, mis en oeuvre dans des pays tiers (par exemple en Russie et dans les pays en voie de développement).

Ce système repose sur une « devise » commune utilisée pour les échanges à savoir les quotas d'émissions de carbone : une allocation de quotas d'émission donne le droit d'émettre une tonne de CO2. Les États membres doivent définir des plans nationaux d'allocation de quotas d'émissions de carbone, dans lesquels figure le nombre de quotas alloués à chaque installation, et que la Communauté européenne doit approuver. Les décisions concernant les allocations sont rendues publiques. Les gains pour les entreprises domiciliées dans l'UE sont les suivants :

- en raison de la surveillance et de la déclaration obligatoire des émissions, les entreprises établissent pour la première fois des budgets CO_2 et des systèmes de gestion du carbone ;
- parce que le CO_2 aura un prix, les entreprises vont mettre à contribution l'ingéniosité de leurs ingénieurs pour définir des moyens de réduire leurs émissions ayant un bon rapport coût-efficacité, tant par l'amélioration des processus de production actuels que par des investissements dans de nouvelles technologies ;
- toute une gamme de nouvelles entreprises est en train de voir le jour en Europe par suite de la création d'un marché du carbone : négociateurs en crédits carbone, spécialistes de la finance carbone, spécialistes de la gestion du carbone, spécialistes des audits carbone et autres vérificateurs. De nouveaux produits financiers tels que le Fonds Carbone font leur entrée sur le marché.

Étendue du système

Alors que les quotas d'émission disposent du potentiel nécessaire pour impliquer de nombreux secteurs économiques et tous les gaz à effet de serre contrôlés par le protocole de Kyoto (CO_2, méthane, protoxyde d'azote, hydrofluorocarbures, perfluorocarbures et hexafluorure de soufre), les objectifs du système ETS ont été volontairement limités pendant sa phase initiale pour permettre un apprentissage par la pratique du libre-échange des quotas d'émission.

En conséquence, au cours de la première période d'échange de quotas, de 2005 à 2007, l'ETS ne concernait que les émissions de CO_2 des grandes installations de production d'électricité et de génération de chaleur produites par les installations industrielles de cogénération, très polluantes, et par certains secteurs énergivores : installations de combustion, raffineries de pétrole, fours à coke, usines sidérurgiques et usines de fabrication de ciment, verre, chaux, briques, céramique, pâte à papier et papier. Une taille limite fondée sur la capacité de production ou de sortie détermine les installations de ces secteurs qui sont incluses dans le schéma.

Même avec cette portée limitée, plus de 12 000 installations dans les 25 Etats membres seront couvertes, ce qui représente environ 45% du total des émissions de CO_2 de l'UE, soit environ 30% de l'ensemble de ses émissions de gaz à effet de serre.

Quels sont les avantages des échanges de quotas d'émission pour les entreprises et pour l'environnement ?

Exemple théorique : soit deux entreprises, A et B, qui émettent chacune 100 000 tonnes de CO_2 par an. Imaginons que le gouvernement leur concède à chacune 95 000 tonnes de quotas d'émission en les laissant libre de compenser les 5 000 tonnes manquantes par la méthode de leur choix. Elles peuvent réduire leurs émissions de 5 000 tonnes ou acheter 5 000 quotas d'émissions sur le marché ou encore adopter une position intermédiaire. Avant de décider de l'option à appliquer, elles vont comparer les coûts des différentes méthodes.

Supposons que sur le marché le prix d'un quota soit à ce moment de 10 € par tonne de CO_2. L'entreprise A calcule que réduire ses émissions lui coûterait 5 € par tonne. Elle va donc opter pour

cette solution qui s'avère plus économique que d'acheter les quotas nécessaires. L'entreprise A décide même d'en profiter pour réduire ses émissions non pas de 5 000 mais de 10 000 tonnes afin de s'assurer qu'elle n'aura aucune difficulté à rester dans les limites d'émission pour les prochaines années.

L'entreprise B est dans une situation différente. Ses coûts de réduction, qui s'élèvent à 15 € par tonne, sont supérieurs aux prix du marché. Elle décide donc d'acheter des quotas plutôt que de réduire ses émissions.

L'entreprise A dépense 50 000 € pour réduire ses émissions de 10 000 tonnes au coût de 5 € par tonne, mais elle reçoit 50 000 € de la vente des 5 000 quotas dont elle n'a plus besoin au prix de marché unitaire de 10 €. Cela signifie qu'elle compense entièrement ses coûts de réduction des émissions par la vente des quotas alors que sans le système d'échange de quotas, elle devrait financer un coût net de 25 000 € (en supposant qu'elle ne réduise alors ses émissions que des 5 000 tonnes nécessaires).

L'entreprise B dépense 50 000 € pour l'achat des 5 000 quotas au prix unitaire de 10 €. Sans la flexibilité qu'offre l'ETS, elle aurait dû dépenser 75 000 € pour réduire ses émissions de 5 000 tonnes.

L'échange des quotas d'émissions permet donc aux entreprises d'économiser au total 50 000 € sur les coûts. Étant donné que l'entreprise A choisit de réduire ses émissions (car c'est l'option la plus économique dans son cas), les quotas achetés par l'entreprise B représentent une réelle réduction des émissions même si l'entreprise B n'a pas réduit ses propres émissions.

Références bibliographiques :

EU Emissions trading : An Open Scheme Promoting Global Innovation to Combat Climate Change (Échange des droits d'émission dans l'Union européenne. Un système ouvert promouvant l'innovation internationale comme instrument de lutte contre les changements climatiques), 2004, ISBN 92-894-8326-1 disponible à l'adresse suivante :
http ://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/emission_trading3_en.pdf

7.15 Optimisation des systèmes de transport

Selon le secteur de l'industrie, le transport peut être un important consommateur d'énergie dans une entreprise. La consommation d'énergie de l'entreprise de transport peut être réduite par une bonne « gestion des transports », qui fait partie de l'ensemble du système de gestion de l'entreprise.

Il existe également des systèmes de transport à l'intérieur du site, tels que les conduites de transport (oléoduc), les systèmes de transport pneumatique de poudre, les convoyeurs, les chariots élévateurs à fourche, etc. Toutefois, aucune donnée les concernant n'est fournie dans le présent document.

La sélection du système de transport le plus efficace au plan de l'environnement dépend du type de produit transporté. Le transport routier est largement utilisé, mais le transport par rail et par voie navigable sont utilisés pour les matériaux en vrac, et les oléoducs pour le transport des liquides et des gaz.

7.15.1 Audit énergétique des chaînes de transport

L'intensification de l'exploitation de leurs chaînes de transport permet aux entreprises d'améliorer la logistique de leur transport et de réduire les coûts de transport, leur consommation d'énergie et leurs émissions de dioxyde de carbone. Une procédure d'audit énergétique des chaînes de transport est un outil servant à identifier des mesures visant à accroître l'efficacité et à découvrir un potentiel d'économies.

L'audit énergétique du transport vise à :

- Améliorer le rapport coût-efficacité
- Réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO_2

Contenu de l'audit :

- tous les moyens de transport effectifs et potentiels
- la logistique, incluant :
  - conditionnement et emballage : par ex. des modifications en la matière peuvent contribuer à améliorer l'utilisation du transport, de manière à acheminer davantage de produits par chargement, et à réduire le nombre de déplacements des véhicules
  - chargement
  - stockage et manutention
  - taille et forme des véhicules utilisés
- le personnel de conduite

Avantages de l'audit d'efficacité énergétique (ENE) :

- réduction des coûts grâce à l'amélioration de l'efficacité du transport et aux économies d'énergie
- individualisation et échelonnement des domaines de développement
- faire connaître les bonnes pratiques opérationnelles dans les chaînes de transport.

Des exemples sont donnés dans les sections 7.15.2 et 7.15.3.

[272, Finland, 2007]

7.15.2 Gestion de l'énergie dans le transport routier

Description de la technique d'efficacité énergétique
Pour gérer l'efficacité énergétique des transports, promouvoir des améliorations à long terme en matière de performance des carburants, suivre et cibler avec succès puis mesurer les améliorations induites par chaque initiative, il est nécessaire de recueillir et d'analyser les données

Les quatre étapes suivantes sont essentielles dans un programme de gestion du carburant :

- mise en place d'un système de collecte des données,
- validation de la méthode de collecte quant à la précision des données,
- nettoyage des données,
- analyse et interprétation des données.

Les principales options pour la collecte des données consistent à :

- recueillir les données manuellement et les saisir dans un tableur ou une base de données ;
- recueillir les données à partir de la pompe à carburant et les transférer par voie électronique dans un tableur ou une base de données ;
- utiliser des cartes de carburant et leurs systèmes de relevés, ou transférer leurs données par voie électronique dans un tableur ou une base de données ;
- surveiller la quantité de carburant qui alimente effectivement chaque moteur de véhicule en utilisant un dispositif de bord. De nombreux camions modernes dotés de moteurs à commande électronique peuvent être équipés en option d'un enregistreur de données installé à bord qui capte cette information ;
- installer un débitmètre de carburant indépendant et le relier à un ordinateur de bord propriétaire pour enregistrer la consommation de carburant.

Les deux dernières options mentionnées dans l'énumération ci-dessus, alliées à des méthodes de téléchargement adaptées et à un logiciel informatique approprié devraient donner des données de bonne qualité pour les performances relatives à chaque véhicule et chaque chauffeur ; toutes deux présentent l'avantage de mesurer effectivement le carburant injecté dans le moteur, plutôt que celui qui est dispensé à partir de la citerne de stockage. Toutefois, cette approche se heurte à certaines limites. Il n'y a pas de contrôle du carburant stocké en vrac, c'est-à-dire un rapprochement entre les livraisons et la quantité de carburant distribué.

Cette méthode est aussi onéreuse parce qu'il s'agit d'un système de mesure de carburant installé à l'identique sur chaque véhicule et non pas d'un seul système de suivi pour l'ensemble de la flotte. Ainsi, il serait peut être judicieux de considérer les dispositifs de bord à titre de complément et non pas de remplacement du système de pompe de base.

Il est important de conserver les données brutes (c'est-à-dire le carburant consommé et la distance parcourue) pour éviter d'introduire des erreurs en faisant la moyenne des données de consommation de carburant. En d'autres termes, pour calculer la consommation moyenne sur une période donnée, il faut utiliser le total de la distance parcourue et le total des volumes consommés.

Facteurs ayant une influence sur la consommation de carburant

- Le véhicule est à l'évidence l'un des facteurs les plus importants dans la détermination de la performance du carburant (marque / modèle, données techniques, âge du véhicule, état du véhicule, détails opérationnels, équipements et produits utilisés, par exemple lubrifiants, aérodynamique, etc .)
- Le chauffeur qui conduit le véhicule est considéré comme l'élément ayant à lui seul la plus grande influence sur la consommation de carburant. Les questions relatives aux chauffeurs vont du recrutement à la formation en passant par la sélection, sans compter leur motivation et leur implication personnelle ;
- la charge transportée a naturellement une incidence sur la performance en carburant d'un véhicule. Le poids total est le facteur déterminant, et il varie souvent sur les trajets au fur et à mesure des livraisons ;
- L'optimisation de la taille, de la forme et du chargement des conteneurs renfermant les produits est cruciale (voir Annexe 12) ;
- les conditions météorologiques ont également une influence sur la consommation de carburant. Il faut s'en souvenir quand on compare les données recueillies dans des conditions météorologiques différentes. Vent, pluie, verglas, neige, etc. peuvent avoir un grand impact sur la performance ;
- le type de route intervient également : sur des routes sinueuses et étroites, la consommation de carburant est bien moins bonne que sur des doubles voies en ligne droite. Les routes « lentes »

et tortueuses parcourant un terrain vallonné vont faire chuter les performances carburant, y compris celles des meilleurs véhicules ;

- acquisition de carburant. Les deux principales propriétés du carburant sont la quantité d'énergie qu'il contient, laquelle dépend fortement de la densité du carburant, et la facilité avec laquelle il brûle.

Surveillance

Les cinq éléments clés de la surveillance sont les suivants :

1. Mesurer régulièrement la consommation – cela implique en général la production régulière (de préférence chaque semaine) d'enregistrements de la consommation de carburant de chaque véhicule.

2. Établir une relation entre consommation et service rendu - normalement la distance parcourue par le véhicule est associée au carburant consommé (par ex. km par litre), mais cela peut être encore affiné. D'autres mesures consistent à évaluer le carburant par tonne-km (c'est-à-dire la consommation de carburant pour le transport d'une tonne de charge utile sur une distance d'un km).

3. Identifier les normes du moment - analyser les chiffres de la consommation de carburant pour des véhicules similaires réalisant des types d'activités similaires sur une période représentative. Aboutir à une norme approximative de la consommation de carburant de chaque véhicule. Il ne s'agit pas là d'une norme « effective » mais plutôt d'une référence ou donnée chiffrée du moment ;

4. Rendre compte des performances aux personnes responsables - les données sur la consommation de carburant doivent être communiquées régulièrement aux personnes ayant une certaine influence sur la consommation de carburant. Il s'agit, en principe, des chauffeurs, des ingénieurs et des cadres moyens et supérieurs.

5. Prendre des mesures afin de réduire la consommation – le fait d'avoir un aperçu systématique de la consommation de carburant donne souvent des idées pour réduire cette dernière. Une comparaison des rendements de différents véhicules en ce qui concerne la consommation de carburant est susceptible de révéler des anomalies dans leur performance. L'identification des causes de ces anomalies devrait permettre de faire une distinction entre bonnes et mauvaises pratiques, et de prendre des mesures pour éliminer les mauvaises performances.

Un tel renforcement de la rigueur pour l'exploitation et l'entretien des véhicules aboutit souvent à des économies, même sans l'introduction de mesures d'économie de carburant spécifiques.

Un historique des données de carburant est indispensable pour planifier et mettre en œuvre des mesures d'économie d'énergie. Pour chaque véhicule, les données relatives au carburant sous forme de données brutes sont conservées tout au long de sa vie, de la même manière que ses dossiers d'entretien.

Établissement de rapports

Les rapports standard ci-après sont utiles dans la gestion du carburant :

- rapprochement stock capacité brute du réservoir
- performance carburant par véhicule et par chauffeur
- rapports d'exception.

Les performances des véhicules peuvent être regroupées par type, comme suit :

- véhicules articulés/rigides,
- poids brut des véhicules,
- fabricant/modèle,
- âge,
- travail effectué.

Les performances des chauffeurs peuvent également être regroupées, en utilisant des catégories telles que équipes, type de travail et chauffeurs avec ou sans formation. Les mesures sont habituellement effectuées sur des périodes hebdomadaires, mensuelles et annuelles (de date à date).

Des comparaisons utiles sont effectuées par rapport aux éléments ci-après :

- cibles,
- période(s) précédente(s) pour l'analyse des tendances,
- période identique de l'année précédente,
- autres référentiels, en gardant à l'esprit les différences régionales et opérationnelles,
- véhicules similaires,
- moyennes de l'industrie, c'est-à-dire les rapports d'essais routiers, les tableaux des coûts publiés.

Ces données sont utilisées au moins par les personnes suivantes :

- les cadres dirigeants (présentation générale concise, résumés et rapports d'exception) ;
- le directeur des transports (initiatives en matière d'économie de carburant, recherche des spécificités et réalisation d'études de performances individualisées) ;
- le formateur des chauffeurs (planification d'un programme de formation lié aux économies de carburant et établissement de dialogues avec les chauffeurs, qui doivent se mettre à surveiller leurs propres performances) ;
- personnel technique et d'entretien (surveillance et analyse des chiffres des carburants).

Il existe de nombreux domaines de la gestion des carburants pour lesquels il peut être opportun d'établir des objectifs et recourir à des indicateurs de performance clés. Le cas le plus simple est celui où la mesure est directe et non affectée par un trop grand nombre de facteurs extérieurs. A titre d'exemple, on peut citer les pertes de carburant stockés en vrac dans des réservoirs pour lesquelles des chiffres peuvent être obtenus chaque semaine avec en corollaire une obligation d'examiner et d'expliquer toutes pertes dépassant une valeur cible.

Des mesures plus complexes sont mises en jeu dans le système de surveillance des performances des véhicules. La méthode la plus simple consiste uniquement à prendre la performance du moment et à demander une amélioration. Toutefois, elle ne prend en compte que ce qui a effectivement été réalisé plutôt que ce qui est réalisable.

Lorsque les routes, les charges, etc. présentent des caractères constants, il est possible d'établir une « norme cible » par route, en faisant appel au meilleur chauffeur pour fixer la cible qui sera assignée à tous les autres, bien que de toute évidence, ceci ne tienne pas compte des variations saisonnières et autres influences extérieures du même ordre, et par conséquent, doive être interprété avec beaucoup de précautions.

Une approche plus élaborée consiste à utiliser l'intensité énergétique en tant qu'indicateur. Pour le transport des marchandises, il est défini par la quantité de carburant consommé / (tonnes transportées x distance parcourue) et il s'exprime normalement en litres par tonne-kilomètre

Avantages obtenus pour l'environnement
La réduction de la consommation de carburant est en relation directe avec les effets sur l'environnement. Elle représente non seulement des dépenses évitées mais également des tonnes de CO_2 qui n'auront pas été émises.

Effets croisés
Aucun effet croisé mentionné.

Données opérationnelles
Une conduite économique au plan du carburant (écoconduite) peut améliorer la sécurité et permet par ailleurs de ménager la ligne de transmission, les freins et les pneus. Elle pourrait donc bien se traduire par une baisse des coûts dus aux accidents, à l'entretien, aux réparations et aux immobilisations.

Certains exploitants ont même utilisé leurs progrès en matière d'économies de carburant comme argument commercial en mettant en exergue leur contribution à la protection de l'environnement.

Un dialogue approfondi entre les chauffeurs et la direction fait partie intégrante d'un bon programme d'économies de carburant. S'il est bien mené, il peut faire boule de neige et avoir des retombées comme une meilleure compréhension réciproque et la suppression de quelques unes des barrières. Certaines entreprises ont utilisé le rendement carburant comme un moyen pour modifier la culture des chauffeurs.

Applicabilité
Cette technique de gestion de carburant peut s'appliquer dans les entreprises disposant de flottes de transport routier.

Aspects économiques
Le prix du pétrole brut associé à l'accise du carburant a fait qu'en règle générale le carburant s'est avéré représenter un coût d'exploitation à croissance rapide. Cela signifie que tout investissement consenti aujourd'hui pour une bonne gestion du carburant pourrait bien rapporter des dividendes encore plus élevés demain.

La réalisation d'économies de carburant exige invariablement des investissements en temps, en efforts ou en argent, et souvent les trois à la fois. Les dépenses pour financer par exemple des équipements de suivi de la consommation de carburant ou de meilleurs véhicules sont faciles à chiffrer, mais il ne faut pas oublier les coûts masqués, tels que l'investissement en temps consacré à la gestion, au travail de bureau et aux activités d'exploitation qui sont plus difficiles à cerner.

Agent moteur pour la mise en œuvre
Réduction des coûts – les mesures d'économies d'énergie n'ont pas toutes le même rapport coût-efficacité. Certaines mesures seront mieux adaptées que d'autres à des activités opérationnelles différentes. En tout état de cause, il est important pour quiconque cherchant à réduire sa consommation de carburant de procéder de manière systématique, plutôt que d'introduire ponctuellement de nouvelles pratiques. Il est pratique d'intégrer la consommation d'énergie des transports dans un système / une structure de gestion de l'énergie plus générale.

7.15.3 Amélioration du conditionnement pour optimiser l'utilisation des transports

Usine exemple
Société : VICO SA située à Vic-sur-Aisne (France)
Activité : production de chips et d'autres produits dérivés des pommes de terre
Quantité : 32 000 tonnes par an
Chiffre d'affaires : 114,4 million EUR /an

Pour livrer ses produits dans les 2500 points de vente en France, VICO SA avait besoin de 9000 mouvements de camion par an. Les produits étaient conditionnés et empilés sur des palettes jusqu'à une hauteur de 1,8 mètre. De cette façon, un camion standard (d'une hauteur de 2,8 m) pouvait contenir 38 palettes (sur un niveau) et le taux de remplissage était limité à 70 %. Consécutivement à une étude de faisabilité, le conditionnement des produits fut modifié pour permettre le stockage sur palettes jusqu'à une hauteur de 1,4 m, puis le chargement des palettes sur deux niveaux. Le nombre de mouvements des camions a ainsi pu être réduit de 10 % et le kilométrage parcouru de 20 %.

Investissement nécessaire : 76 224 EUR
Délai de retour sur investissement: 1,5 mois
Période d'essai : 3 mois

Consommation initiale : 686 030 l/an de gasoil (diesel)
Consommation après adoption du nouveau conditionnement : 536 875 l/an de gasoil

Réduction de la consommation de gasoil (diesel) de 22 %

Réduction indirecte des coûts pour l'entreprise (qui a externalisé la fonction transport) : 610 000 EUR par an.

Références bibliographiques
ADEME guide on good energy practices in industry (réf 3745)
[94, ADEME, 2005], [103, Best practice programme, 1996]

7.16 Ventilation européenne des différentes sources d'énergie

Électricité

Pour créer 1 GJ d'électricité, les moyennes de la consommation de combustibles et des émissions rejetées pour l'UE des 25 sont :

Électricité	GJ	1
Énergie primaire	**GJ**	**#2,6**
Pétrole	**kg**	**9,01**
Gaz	**m^3**	**6,92**
Charbon	**kg**	**15,7**
Lignite	**kg**	**34,6**
SO_2	**kg**	**0,10**
CO_2	**kg**	***147**
NO_2	**kg**	**0,16**

Mélange européen*	
Pétrole	4,1 %
Gaz	19,0 %
Houille	13,1 %
Lignite brut	23,8 %
Charbon total	*36,9 %*
Nucléaire	30,9 %

Calcul IFEU		Fioul	Électricité provenant du fioul	Gaz naturel	Électricité provenant du gaz	Houille	Électricité provenant de la houille	Lignite	Électricité provenant du lignite	Électricité nucléaire
Électricité	GJ		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$	$1{,}00^{E}+00$
Énergie primaire	GJ	$3{,}69^{E}+00$		$2{,}90^{E}+00$		$2{,}38^{E}+00$		$2{,}82^{E}+00$		$3{,}35^{E}+00$
Pétrole	kg	$9{,}22^{E}+01$	$7{,}88^{E}+01$							$4{,}19^{E}-01$
Gaz	m^3			$7{,}14^{E}+01$	$5{,}33^{E}+01$					$3{,}74^{E}-01$
Charbon	kg					$8{,}48^{E}+01$	$8{,}19^{E}+01$			$3{,}03^{E}+00$
Lignite	kg							$3{,}19^{E}+02$	$3{,}12^{E}+02$	
SO_2	kg	$6{,}44^{E}-02$	$2{,}43^{E}-01$	$3{,}24^{E}-03$	$2{,}88^{E}-03$	$5{,}05^{E}-02$	$1{,}48^{E}-01$	$3{,}73^{E}-03$	$2{,}22^{E}-01$	$3{,}22^{E}-02$
CO_2	kg	$1{,}26^{E}+01$	$2{,}47^{E}+02$	$1{,}46^{E}+01$	$1{,}32^{E}+02$	$1{,}06^{E}+01$	$2{,}17^{E}+02$	$7{,}84^{E}+00$	$3{,}16^{E}+02$	$6{,}27^{E}+00$
NO_2	kg	$3{,}46^{E}-02$	$3{,}68^{E}-01$	$7{,}79^{E}-02$	$1{,}51^{E}-01$	$4{,}11^{E}-02$	$1{,}10^{E}-01$	$6{,}30^{E}-03$	$6{,}14^{E}-01$	$1{,}43^{E}-02$

Ces facteurs d'émission moyens associés à la production d'électricité sont extraits de la base de données ECOINVENT de 1994.
Données de la révision WFD. * données de l'AIE pour l'UE-25 de 2004

Tableau 7.19 : Facteurs d'émission moyens associés à production d'électricité

Vapeur

Pour produire de la vapeur avec une valeur énergétique de 1 GJ, les moyennes pour toute l'Europe de la consommation de combustibles et des émissions rejetées sont :

Vapeur	**GJ**	**1**
Énergie primaire	**GJ**	**1,32**
Pétrole	**kg**	**12,96**
Gaz	**m^3**	**10,46**
Charbon	**kg**	**14,22**
SO_2	**kg**	**0,54**
CO_2	**kg**	**97,20**
NO_2	**kg**	**0,18**

	Mélange européen (mélange estimé)
Pétrole	40.0 %
Gaz	30.0 %
Houille	30.0 %

		Fioul	**Chaleur provenant du fioul**	**Gaz naturel**	**Chaleur provenant du gaz**	**Houille**	**Chaleur provenant du charbon**
Chaleur	GJ		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$
Énergie primaire	GJ	$1{,}29^{E}+00$		$1{,}41^{E}+00$		$1{,}28^{E}+00$	
Pétrole	kg	$3{,}24^{E}+01$	$2{,}75^{E}+01$				
Gaz	m^3			$3{,}49^{E}+01$	$2{,}81^{E}+01$		
Charbon	kg					$4{,}74^{E}+01$	$4{,}14^{E}+01$
SO_2	kg	$4{,}01^{E}-02$	$9{,}95^{E}-01$	$1{,}61^{E}-02$	$5{,}75^{E}-04$	$4{,}76^{E}-02$	$3{,}70^{E}-01$
CO_2	kg	$6{,}51^{E}+00$	$9{,}22^{E}+01$	$7{,}16^{E}+00$	$6{,}48^{E}+01$	$5{,}82^{E}+00$	$1{,}15^{E}+02$
NO_2	kg	$1{,}77^{E}-02$	$1{,}78^{E}-01$	$3{,}47^{E}-02$	$4{,}47^{E}-02$	$3{,}77^{E}-02$	$2{,}17^{E}-01$

ECOINVENT		**Fioul**	**Chaleur provenant du fioul**	**Gaz naturel**	**Chaleur provenant du gaz**	**Houille**	**Chaleur provenant du charbon**
Chaleur	GJ		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$
Énergie primaire	GJ	$1{,}22^{E}+00$		$1{,}43^{E}+00$		$1{,}36^{E}+00$	
Pétrole	kg	$3{,}06^{E}+01$	$2{,}60^{E}+01$				
Gaz	m^3			$3{,}53^{E}+01$	$3{,}00^{E}+01$		
Charbon	kg					$5{,}21^{E}+01$	$4{,}17^{E}+01$
SO_2	kg	$1{,}59^{E}-02$	$1{,}41^{E}+00$	$3{,}06^{E}-02$	$6{,}47^{E}-04$	$6{,}98^{E}-02$	$6{,}29^{E}-01$
CO_2	kg	$4{,}24^{E}-01$	$9{,}16^{E}+01$	$7{,}29^{E}+00$	$6{,}47^{E}+01$	$6{,}36^{E}+00$	$1{,}16^{E}+02$
NO_2	kg	$8{,}24^{E}-04$	$1{,}88^{E}-01$	$3{,}18^{E}-02$	$2{,}35^{E}-02$	$5{,}50^{E}-02$	$2{,}50^{E}-01$

GEMIS		**Fioul**	**Chaleur provenant fioul**	**Gaz naturel**	**Chaleur provenant du gaz**	**Houille**	**Chaleur provenant du charbon**
Chaleur	GJ		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$		$1{,}00^{E}+00$
Énergie primaire	GJ	$1{,}35^{E}+00$		$1{,}39^{E}+00$		$1{,}20^{E}+00$	
Pétrole	kg	$3{,}42^{E}+01$	$2{,}89^{E}+01$				
Gaz	m^3			$3{,}44^{E}+01$	$2{,}63^{E}+01$		
Charbon	kg					$4{,}27^{E}+01$	$4{,}12^{E}+01$

SO_2	kg	6,44^{E}-02	5,78^{E}-01	1,52^{E}-03	5,03^{E}-04	2,54^{E}-02	1,11^{E}-01
CO_2	kg	1,26^{E}+01	9,27^{E}+01	7,02^{E}+00	6,49^{E}+01	5,28^{E}+00	1,13^{E}+02
NO_2	kg	3,46^{E}-02	1,69^{E}-01	3,76^{E}-02	6,59^{E}-02	2,05^{E}-02	1,83^{E}-01

Ces facteurs d'émission moyens pour la génération de vapeur sont extraits sous forme de moyennes des bases de données ECOINVENT et GEMIS.

Tableau 7.20 : Facteurs d'émission moyens pour la production de vapeur

7.17 Correction du facteur de puissance électrique

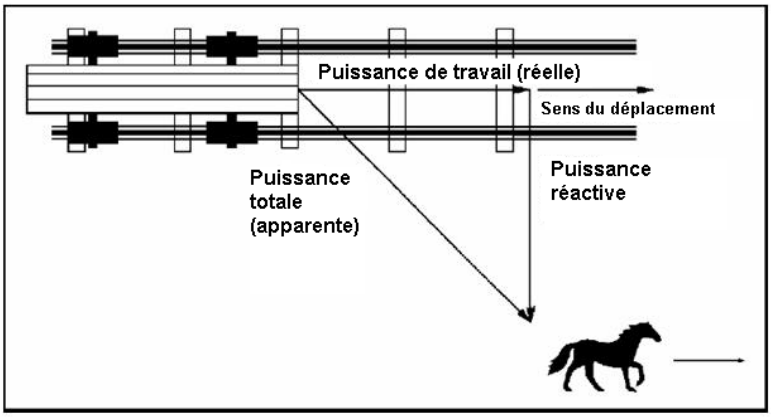


Figure 7.17 : Explication de la puissance réactive et apparente [123, US_DOE]

Pour comprendre le facteur de puissance électrique, imaginer un cheval tractant un wagon de chemin de fer le long d'une voie. Les traverses de chemin de fer créant une surface accidentée, le cheval est obligé de tirer le wagon par le côté de la voie. Le cheval exerce sa traction sous un certain angle par rapport à la direction de déplacement du wagon. La puissance nécessaire pour déplacer le wagon le long de la voie est la puissance active (réelle ou nette). L'effort du cheval représente la puissance (apparente) totale. En raison de l'angle de traction du cheval, la totalité de l'effort du cheval n'est pas utilisé pour faire progresser le wagon le long de la voie. Le wagon ne se déplacera pas latéralement par rapport à la voie ; pour cette raison, la traction latérale du cheval constitue un effort stérile ou de la puissance sans travail (réactive).

L'angle de traction du cheval est relié au facteur de puissance, défini comme le rapport de la puissance réelle (active ou nette) à la puissance apparente (totale). Si le cheval est amené plus près de l'axe de la voie, l'angle de traction latérale diminue et la puissance réelle se rapproche de la puissance apparente. Le rapport de la puissance réelle à la puissance apparente (facteur de puissance) se rapproche donc de 1. Lorsque le facteur de la puissance tend vers 1, la puissance réactive (stérile) tend vers 0.

Références bibliographiques :

US DOE: Motor challenge programme, Fact sheet: Reducing Power Factor Cost
http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/mc60405.pdf