

Les boil over et autres phénomènes
généralant des boules de feu
concernant les bacs des dépôts de
liquides inflammables

Juin 2007

Groupe de Travail Dépôts Liquides Inflammables - version 01

SOMMAIRE

PREAMBULE	3
1. INTRODUCTION	4
2. LE BOIL OVER « CLASSIQUE »	4
2.1 DEFINITION DU PHENOMENE DE BOIL OVER « CLASSIQUE »	4
2.2 LES CONDITIONS D'OCCURRENCE DU PHENOMENE DE BOIL OVER « CLASSIQUE »	6
2.3 ÉVALUATION DE L'INTENSITE DES EFFETS DU PHENOMENE DE BOIL OVER « CLASSIQUE »	8
2.4 CINETIQUE DU PHENOMENE DE BOIL OVER « CLASSIQUE »	8
3. LE BOIL OVER DIT « EN COUCHE MINCE »	9
3.1 PREAMBULE	9
3.2 DEFINITION ET DESCRIPTION DU PHENOMENE DE BOIL OVER « EN COUCHE MINCE »	10
3.3 CONDITIONS D'OCCURRENCE DU BOIL OVER « EN COUCHE MINCE »	12
3.4 ÉVALUATION DE L'INTENSITE DES EFFETS DE BOIL OVER « EN COUCHE MINCE »	13
3.4.1 Description du modèle de boil over en couche mince	13
3.4.2 Détermination du délai d'occurrence du phénomène et de la hauteur de liquide susceptible d'être mise en suspension	14
3.4.3 Détermination de la vitesse d'éjection et de la composition du mélange à la suite de la vaporisation de l'eau contenue en fond de bac	15
3.4.4 Détermination des caractéristiques géométriques du volume de flamme qui rayonne....	16
3.4.5 Détermination des conséquences sur l'environnement	17
3.4.6 Exemple d'applications	17
3.4.7 Les limites du modèle	18
3.5 CINETIQUE	18
4. ACCIDENTOLOGIE RELATIVE AU BOIL OVER	20
4.1 ACCIDENTOLOGIE GENERALE	20
4.2 ACCIDENT DU PORT EDOUARD HERRIOT – 2 JUIN 1987	20
Questions relatives à l'accident	21
5. CONCLUSIONS SUR LES BOIL OVER « CLASSIQUE » ET « EN COUCHE MINCE » ET PRODUITS CONCERNES	22
5.1 SIMILITUDES ET DIFFERENCES	22
5.2 LES PRODUITS CONCERNES	22
6. PHENOMENE DE PRESSURISATION DU CONTENU D'UN BAC A TOIT FIXE PRIS DANS UN INCENDIE	23
6.1 DESCRIPTION QUALITATIVE DU PHENOMENE DE PRESSURISATION D'UN BAC A TOIT FIXE PRIS DANS UN INCENDIE	23
6.2 MESURES DE PREVENTION RELATIVES AU PHENOMENE DE PRESSURISATION D'UN BAC PRIS DANS UN INCENDIE	25
6.3 LE DIMENSIONNEMENT DES EVENTS VIS-A-VIS DU PHENOMENE DE PRESSURISATION D'UN BAC PRIS DANS UN INCENDIE	26
Préambule	26
6.3.1 Débit de vaporisation	27
6.3.2 Section d'évent et surpression	29
6.3.3 Application numérique	29
6.4 ÉVALUATION DE L'INTENSITE DES EFFETS DE LA BOULE DE FEU GENEREE PAR LE PHENOMENE DE PRESSURISATION DU BAC PRIS DANS UN INCENDIE	30
7. BIBLIOGRAPHIE	30

Préambule

Ce rapport est un document de travail sur l'état des connaissances en matière de phénomènes pouvant générer des boules de feu concernant les liquides inflammables stockés dans les dépôts hors raffineries. Il s'intéresse plus spécifiquement au comportement des carburants commerciaux tels que l'essence, le gazole et le kérosène (jet A1), l'objectif étant de préciser la nature des phénomènes susceptibles de survenir pour différents liquides inflammables notamment lorsque de l'eau est présente au fond d'un bac en feu.

Ces travaux s'appuient sur :

- l'accidentologie, le retour d'expériences (REX) ;
- l'étude des publications scientifiques récentes ;
- des essais :
 - résultant d'une campagne menée courant 2006 par la profession pétrolière au niveau international ;
 - réalisés en 2007 par l'INERIS pour le compte du MEDAD à la demande du GTLI.

Ce document n'est pas exhaustif. En particulier, il ne précise pas le comportement de tous les produits et le groupe de travail n'a pas pour l'heure travaillé sur l'évaluation des effets du boil over « classique ». De même, le document ne décline pas les mesures de prévention, de mitigation ou de protection associées aux phénomènes de boil over.

1. Introduction

Jusqu'à présent, les liquides inflammables caractérisés par une viscosité importante et une certaine plage d'ébullition étaient considérés comme susceptibles de donner lieu à un « boil over ». En matière de maîtrise de l'urbanisation, des dispositions étaient prises sur la base de l'instruction technique de 1989 qui vise explicitement ce phénomène donnant lieu à une boule de feu.

Des travaux récents ont montré que le « boil over » tel qu'il était considéré jusqu'à présent n'était pas toujours représentatif des phénomènes observés sur certains produits. En particulier, un phénomène sensiblement différent a été observé et a été dénommé « boil over en couche mince » en raison de la plus faible quantité de produit liquide projeté. L'objet de ce chapitre est de rappeler les caractéristiques de chacun de ces phénomènes afin de préciser ensuite si ces phénomènes peuvent être observés pour les produits les plus couramment stockés dans les dépôts de liquides inflammables hors raffineries.

Par ailleurs, ce document introduit un phénomène par lequel un bac d'hydrocarbures à toit fixe peut se rompre voire exploser à la suite d'une pressurisation générée par un incendie autour de celui-ci. Ce phénomène a été intégré à la présente note dans la mesure où il est susceptible de générer une boule de feu.

Il pourrait s'agir du phénomène observé en 1987 au port Édouard HERRIOT, qui n'était pas un boil over.

2. Le boil over « classique »

2.1 Définition du phénomène de boil over « classique »

Le NFPA (National Fire Protection Association - USA) propose une définition précise du phénomène :

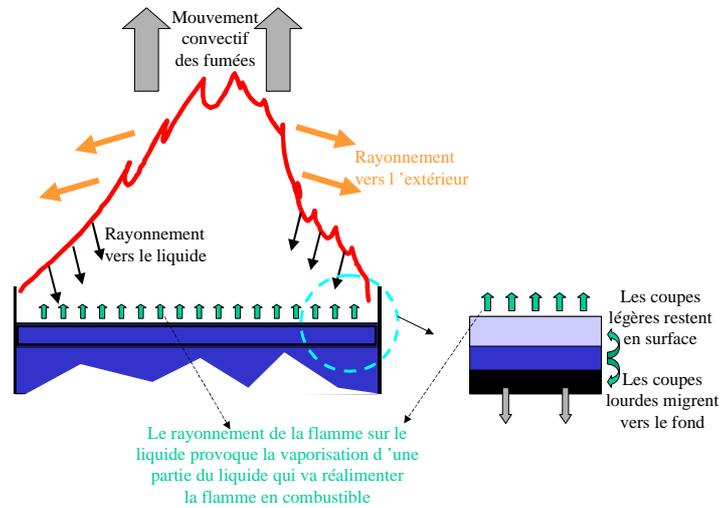
« Le terme de boil over est attribué à un événement survenant lors d'un incendie de certains hydrocarbures contenus dans un réservoir à ciel ouvert, lorsqu'une soudaine augmentation de l'intensité du feu [de réservoir] est observée, accompagnée de l'expulsion de l'hydrocarbure hors du réservoir, après une longue période de combustion régulière [de l'hydrocarbure]. Le boil over a lieu lorsque les résidus de combustion, issus de la surface en feu, deviennent plus denses que les hydrocarbures non brûlés et sombrent formant une couche chaude qui progresse vers le fond plus rapidement que la régression de la surface de liquide. Lorsque cette couche chaude, également appelée onde de chaleur, atteint l'eau ou une émulsion d'eau dans l'hydrocarbure située en fond de bac, l'eau est d'abord surchauffée, puis portée à ébullition de façon quasi explosive entraînant le débordement du bac. »

L'INERIS donne une autre définition s'intéressant notamment aux conséquences du phénomène.

«Un boil over est un phénomène de moussage brutal impliquant des réservoirs atmosphériques et résultant de la transformation en vapeur, d'eau liquide (fond d'eau, eau libre, émulsion) contenue dans un réservoir en feu. Une représentation schématique des différentes phases est présentée sur la Figure 1. Ce phénomène est à l'origine de violentes projections de combustible, du bouillonnement du contenu du bac, de l'extension des flammes et de la formation d'une boule de feu.

[...]

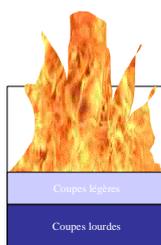
Ce phénomène se caractérise notamment par la présence d'une onde de chaleur dont le processus de formation est décrit sur la figure suivante.»



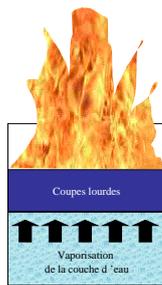
En début d'incendie du bac, le produit occupe tout le volume du bac avec une composition quasi-homogène.



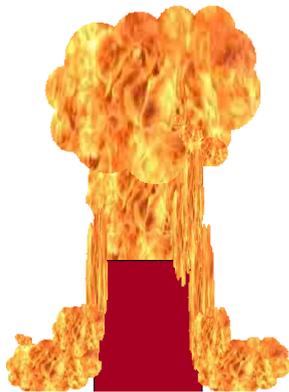
En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une distillation qui conduit à la séparation des coupes légères des coupes plus lourdes. Ces dernières descendant progressivement vers le fond du bac sous l'effet de la pesanteur, c'est la formation de l'onde de chaleur.



Ce phénomène perdure jusqu'à ce que les coupes les plus lourdes, appelées ondes de chaleur, atteignent l'eau située au fond du bac. Cette onde de chaleur a une température de l'ordre de 200 °C.



Le contact entre l'onde de chaleur et l'eau provoque l'évaporation de cette dernière. Cette vaporisation brutale conduit à une augmentation importante de volume et joue le rôle de piston en mettant en suspension le liquide inflammable restant dans le bac.



Une partie du liquide déborde du bac et une autre est mise en suspension en se fragmentant en gouttes et en se vaporisant en traversant les flammes pour former une boule de feu lors de sa combustion.

Figure 1 : représentation schématique des différentes phases d'un boil over

Ainsi, le boil over a deux principales manifestations : un débordement par moussage et une boule de feu (due à l'effet piston).

2.2 Les conditions d'occurrence du phénomène de boil over « classique »

Plusieurs conditions sont nécessaires à l'occurrence d'un boil over. (Rapport INERIS, Guide UFIP) :

- 1) un feu de bac (condition 1) après l'effacement du toit
- 2) la présence d'eau à transformer en vapeur (condition 2)
- 3) un hydrocarbure pouvant générer une onde de chaleur qui entre en contact avec le fond d'eau et suffisamment visqueux pour s'opposer au passage de la vapeur d'eau vers la surface (condition 3)

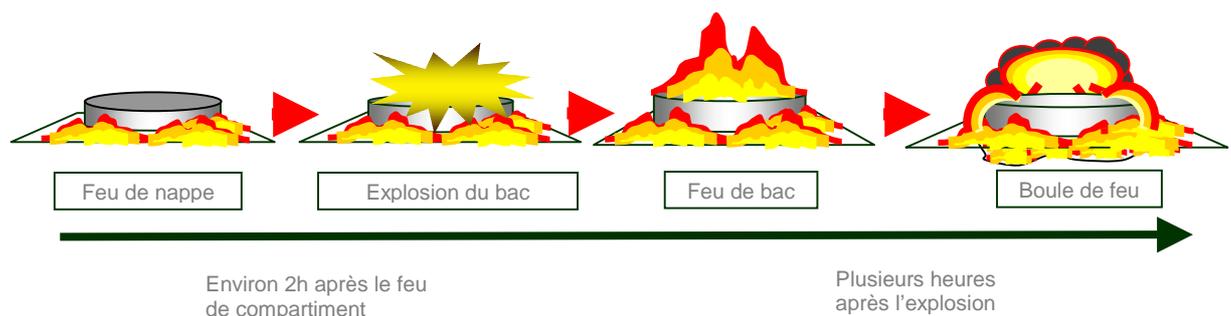


Figure 2: Séquence accidentelle théorique

Condition 1 :

La première condition est un feu de bac d'un produit respectant la condition 3. Les séquences accidentelles pouvant conduire à un feu de bac qui doivent ressortir de l'analyse de risque de l'exploitant, initient la séquence accidentelle du phénomène de boil over. Le phénomène de boil over est un phénomène retardé qui se produit

plusieurs heures après le déclenchement de l'incendie du bac (la cinétique dépend notamment de la hauteur de remplissage du bac).

Outre les conditions 2 et 3, pour qu'un boil over se produise, il faut évidemment que le feu du bac n'ait pu être éteint dans le laps de temps précédent le déclenchement du boil over.

Condition 2 :

La création de vapeur d'eau engendre un accroissement de volume agissant à l'instar d'un piston : 1 litre d'eau génère de 1700 à 2000 litres de vapeur, en fonction de la température de l'onde de chaleur.

Un fond d'eau centimétrique peut suffire à expulser le contenu résiduel d'un bac.

Cette eau peut notamment provenir des eaux pluviales, des eaux de condensation, des eaux projetées lors de l'intervention ou des eaux de décantation susceptibles d'être présentes en fond de bac.

Condition 3 :

Dans le cas de combustion d'un hydrocarbure caractérisé par une large plage de températures d'ébullition, les coupes légères à bas point d'ébullition montent à la surface et alimentent le feu, tandis que les coupes plus lourdes à haut point d'ébullition coulent vers le fond et forment un front chaud qui réchauffe les couches d'hydrocarbure froid de plus en plus profondes, tandis que le feu continue de brûler en surface. On obtient ainsi, sous la surface du feu, une zone de température homogène dont l'épaisseur va croissant au cours du temps. C'est ce que l'on appelle ici " l'onde de chaleur ".

L'onde de chaleur n'est pas un phénomène de conduction en provenance de la surface en feu : il s'agit d'un transfert de chaleur d'une particule chaude de masse spécifique plus élevée vers une couche plus froide située plus profond. L'onde de chaleur est alimentée en continu par les résidus de la combustion de surface et son épaisseur augmente plus rapidement que ne diminue la hauteur d'hydrocarbure dans le bac. La température de l'onde de chaleur est fonction de la nature de l'hydrocarbure en feu.

Commentaire de P. Michaelis (expert en risques industriels TOTAL ayant co-développé le modèle UFIP avec l'INERIS et EDF en 1995) :

« Pour qu'il se produise un boil over il faut que le réservoir soit en feu, condition sine qua non, car dans un boil over c'est l'onde de chaleur qui est responsable de la vaporisation de l'eau, et pour ce faire il faut engendrer un phénomène de séparation (distillation) des coupes légères qui brûlent à la surface liquide du bac, le toit étant effacé, avec les coupes plus lourdes qui coulent vers le fond avec une température égale à la température d'ébullition de la coupe plus légère alimentant le feu de bac. Il s'agit d'un échange calorifique par transfert de masse et non par conduction dans un liquide. »

Le graphique suivant permet de visualiser la propagation de l'onde de chaleur d'un feu de bac. Il est établi à partir d'un essai réalisé par la profession pour le feu d'un bac de pétrole brut de 2,4 m de diamètre.

- Les droites horizontales représentent le niveau de produit estimé dans le bac au temps T.
- Les courbes présentent le profil de température en fonction de la hauteur de produit dans le bac au temps T.

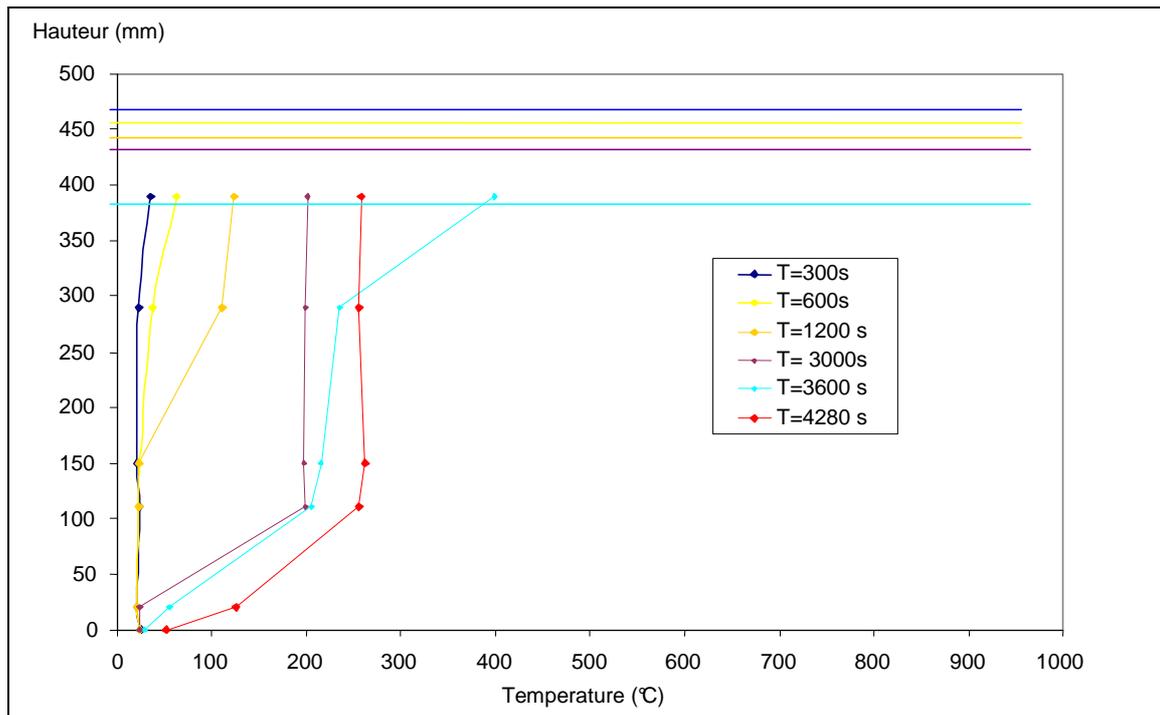


Figure 3 : Évolution de la température à l'intérieur du bac au cours de la combustion de brut

2.3 Évaluation de l'intensité des effets du phénomène de boil over « classique »

Sur le sujet de l'évaluation des effets du boil over « classique », le groupe de travail n'a pas réalisé à ce jour d'investigations particulières sur le sujet, laissant la priorité au comportement de produits tels que l'essence, le gasoil ou le kérosène, produits que l'on retrouve majoritairement dans les dépôts inscrits dans le champ de compétence du GT. En effet, il sera indiqué dans la suite de ce document que ces produits ne génèrent pas de boil over « classique ».

Il est rappelé qu'outre l'évaluation des effets propres à la boule de feu, il convient d'examiner autant que possible le moussage et les effets associés, en particulier en matière d'effets dominos.

2.4 Cinétique du phénomène de boil over « classique »

En premier lieu, il convient de rappeler que ce phénomène est un phénomène retardé.

Ce sujet n'a pas été investigué de façon particulière. Toutefois, les experts du GT ont indiqué que le paramètre t_{BO} (temps de déclenchement du boil over qui correspond au temps entre le début de l'incendie du bac et la projection du produit) défini dans le guide de l'UFIP, permet d'obtenir un « ordre de grandeur ».

En matière de cinétique, il convient d'éviter l'écueil consistant à étudier la cinétique d'occurrence du phénomène de boil over uniquement dans la configuration la plus

pénalisante en matière d'effets. En effet, cette configuration est la moins pénalisante en matière de cinétique vis-à-vis de la mise à l'abri des populations.

Sur ce point, le GT n'a pas investigué à ce jour la collecte de critères objectifs sur la mise à l'abri, en particulier sur les caractéristiques minimales d'un bâtiment pour lequel on pourrait considérer qu'une personne s'y réfugiant est à l'abri.

3. Le boil over dit « en couche mince »

3.1 Préambule

Les deux campagnes d'essais menées respectivement par la profession (en 2006) et l'INERIS (en 2007) avec pour objectif de définir notamment la possibilité ou non de boil over « classique » sur certains produits ont mis en évidence que la combustion de gazole et kérosène ne génère pas d'onde de chaleur.

Cependant, à défaut d'onde de chaleur, certains tests réalisés ont donné lieu à un phénomène éruptif générant des « boules » de feu (sans commune mesure avec un boil over « classique ») en fin de combustion sous certaines conditions. Ce comportement, initialement observé lors des essais de la profession, a été confirmé par des essais spécifiques réalisés par l'INERIS pour le compte du MEDAD au 1^{er} semestre 2007.

Le graphique suivant (issu d'un essai de la profession) montre l'évolution de la température durant la combustion d'un gazole.

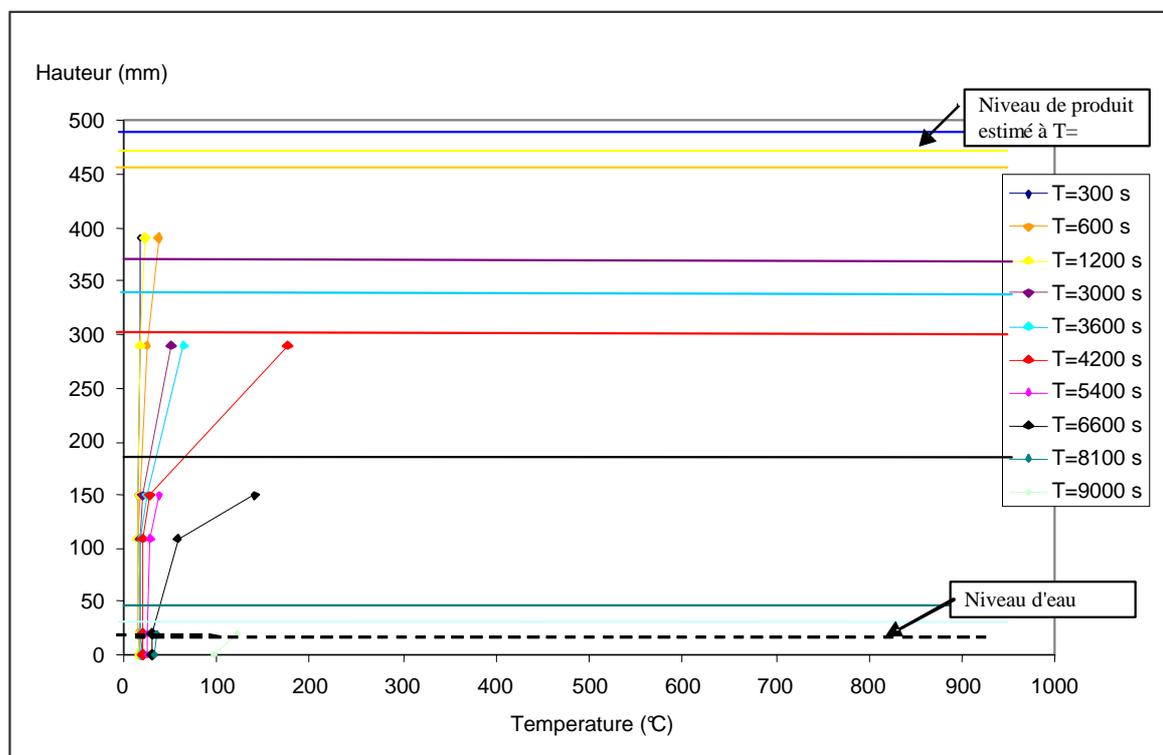
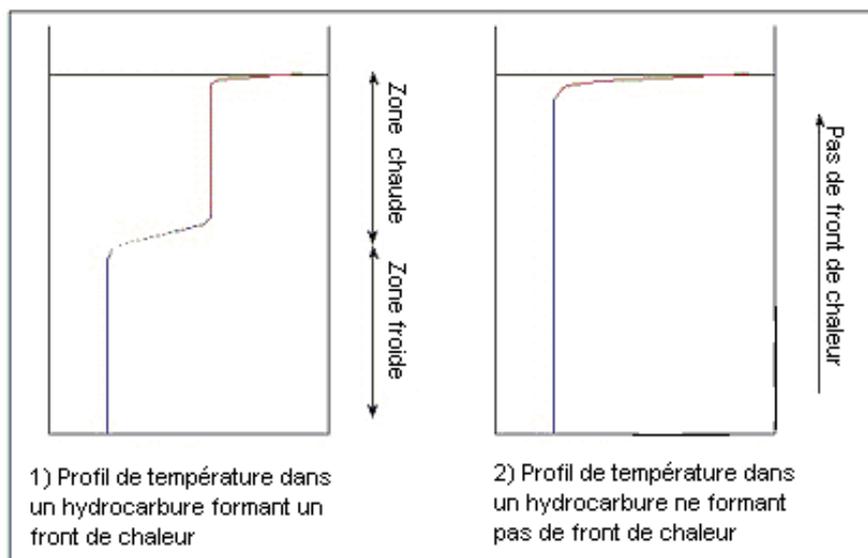


Figure 4 : Évolution de la température à l'intérieur du bac au cours de la combustion de gazole

Remarque : Afin de pouvoir comparer l'évolution des profils de température en fonction du temps pour le gazole et le brut (cf. paragraphe 2.2 ci-dessus), des pas de temps identiques ont été choisis.

Cette différence de comportement des produits durant la combustion est reprise dans la littérature :

- Par le rapport Chaillot (novembre 1989) ;
- Par Broeckmann, qui dans une étude de 1995, illustre ces différences et distingue les hydrocarbures formant une onde de chaleur (bruts, ...) et les hydrocarbures ne formant pas d'onde de chaleur (distillats, gazoles, solvants, ...).



En conclusion, la combustion de certains carburants (gazoles, kérosènes, fuel domestique...) ne s'accompagne pas de la création d'une onde de chaleur et ne génère donc pas de boil over « classique » mais peut donner lieu à un autre phénomène de « boule de feu ». Le GT a retenu l'appellation suivante pour ce phénomène : le boil over dit « en couche mince ».

3.2 Définition et description du phénomène de boil over « en couche mince »

Comme indiqué dans les paragraphes précédents, il ne s'agit pas de boil over au sens classique du terme puisque il n'y a pas d'onde de chaleur, mais d'un phénomène lié à une vaporisation de l'eau contenue dans le bac à la suite du contact d'une couche de produit à une température supérieure à 100 °C. Ce phénomène sera qualifié de phénomène éruptif en couche mince ou de boil over « en couche mince » pour reprendre la terminologie utilisée dans les publications scientifiques récentes : « thin-layer boil over ».

Ce phénomène « en couche mince » fait l'objet de recherches scientifiques. Il est dû à une « nucléation hétérogène de l'eau à l'interface eau gazole » (Garo-1996). Lorsque le front de flamme et la fine couche de produit, dont la température est supérieure à 100°C, impacte le fond d'eau, des bulles de vapeurs commencent à se former à l'interface gazole-eau. Ces bulles grossissent et traversent la fine couche de produit jusqu'à la surface.

Une projection peut alors se former lorsque le nombre de bulles est si important qu'elles ne peuvent être évacuées jusqu'à la surface.

Un volume plus important de vapeur est alors libéré et éjecté subitement, entraînant des gouttelettes de produits en combustion et une augmentation des flammes avec pour conséquences un accroissement du flux thermique et des « projections de gouttelettes ».

Pour des conditions initiales identiques (hauteur de produit, diamètre de bac...), ce phénomène lié à la vaporisation de l'eau en fond de bac est moins intense et plus bref qu'un boil over « classique » puisqu'une couche beaucoup plus fine de produit est concernée.

Les différentes étapes conduisant à un boil over en couche mince sont décrites ci-après.



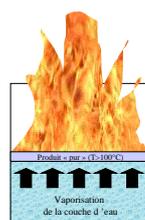
En début d'incendie du bac, le produit qui occupe le volume du bac a une composition homogène qui le restera tout au long de l'incendie. En revanche, un gradient de température apparaît et une zone où la température est supérieure à 100°C peut être identifiée.



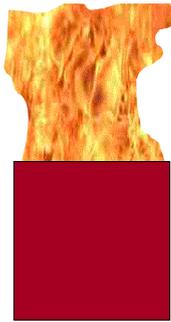
En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une augmentation de température sans modification de composition locale. Il n'y a pas de formation d'onde de chaleur.



Une fois que tout le combustible situé en dessous de cette zone de température supérieure à 100°C a été consommé, il y a contact entre l'eau et cette zone.



Le contact entre la couche de produit et l'eau provoque l'évaporation de cette dernière. Cette vaporisation brutale conduit à une augmentation importante de volume et joue le rôle de piston en mettant en suspension le liquide inflammable restant dans le bac.

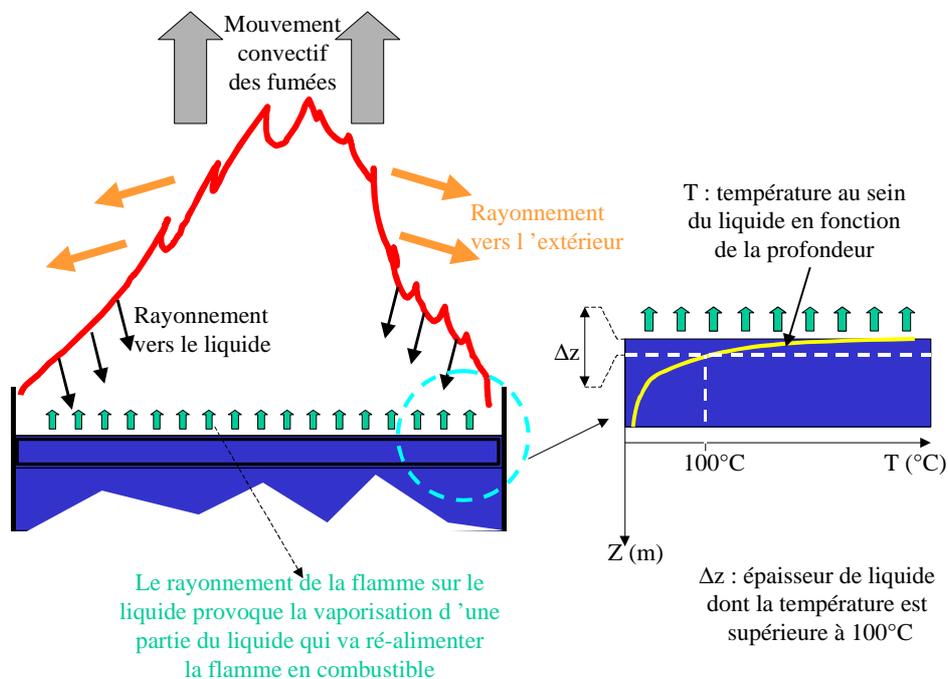


Une partie du liquide est projetée en se fragmentant en gouttes et en se vaporisant en traversant les flammes pour former une zone de combustion vive.

Figure 5 : représentation schématique des différentes phases d'un boil over en couche mince

Il est important de noter que l'ampleur de ce phénomène dépend :

- (1) de la viscosité du produit. Si le produit est peu visqueux, l'effet piston est plus faible car la vapeur d'eau fragmente la couche d'hydrocarbures liquide ;
- (2) de l'épaisseur de la couche d'hydrocarbure liquide dont la température est supérieure à 100°C, qui dépend des propriétés intrinsèques de l'hydrocarbure.



3.3 Conditions d'occurrence du boil over « en couche mince »

Comme illustré précédemment, les conditions d'occurrence sont sensiblement les mêmes que pour un boil over « classique » à l'exception toutefois de la propulsion du produit à générer une onde de chaleur : feu de bac, présence d'eau, produit suffisamment visqueux pour s'opposer au passage de la vapeur d'eau à la surface.

Il convient donc d'identifier les séquences accidentelles associées à un feu de bac dans l'analyse des risques et l'étude de dangers. Ces séquences peuvent dépendre des caractéristiques du produit ou des installations.

3.4 Évaluation de l'intensité des effets de boil over « en couche mince »

En matière d'évaluation des effets, au regard des critères de la réglementation nationale et en particulier de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation, les publications scientifiques consultés par les membres du GT ne permettaient pas d'extraire suffisamment d'informations pour proposer un modèle.

Il a donc été demandé à l'INERIS de développer un modèle spécifique à la lumière des connaissances disponibles. Comme toute évaluation de ce type, des incertitudes existent et des approximations ont dû être faites, l'objectif étant de définir un modèle simple, représentatif du phénomène et raisonnablement majorant à l'aune des connaissances scientifiques actuelles.

Les études réalisées sur ce phénomène en couche mince montrent que son intensité relative décroît lorsque le diamètre du bac augmente. A titre conservatoire, l'évaluation de l'intensité des effets a été faite sur la base des essais réalisés à petite échelle.

3.4.1 Description du modèle de boil over en couche mince

Le modèle proposé (repris dans une feuille Excel mise à disposition) est basé sur des calculs successifs qui permettent de caractériser les différentes phases du phénomène :

Une première phase de combustion « classique » du liquide inflammable qui se situe avant le contact entre le liquide inflammable à une température supérieure à 100°C et l'eau. Lors de cette phase, une fraction de l'énergie rayonnée par les flammes est transmise au liquide. Cette fraction conduit à l'évaporation du liquide qui va ré-alimenter les flammes et également préchauffer le liquide sur quelques centimètres. L'épaisseur préchauffée dépend de la nature du produit impliqué. Lors de cette phase, aucune projection ne survient. La durée de cette phase peut être estimée en divisant la hauteur de liquide présente au moment de l'inflammation par la vitesse de régression qui est une caractéristique du produit en feu ainsi que de la surface du bac en feu (la vitesse de régression diminue lorsque la surface augmente). A l'issue de cette phase, la grandeur importante est l'épaisseur de liquide inflammable dont la température est supérieure à 100°C.

La deuxième phase survient lorsque la couche de liquide dont la température est supérieure à 100°C arrive au contact de l'eau présente au fond du bac. A cet instant, l'eau se vaporise brutalement et agit comme un piston en mettant en suspension la couche d'hydrocarbures située au-dessus d'elle. L'une des principales données de sortie de cette phase est la vitesse d'éjection du liquide, cette dernière dépendant de la quantité d'eau présente en fond de bac ainsi que de la composition du mélange (eau en phase vapeur, combustible en phase vapeur et liquide). La vitesse d'éjection varie entre 8 et 13 m/s et décroît sur les 10 premiers mètres (figure 6) Cette phase d'éjection ne sert qu'à la mise en suspension du mélange (eau + hydrocarbure).

La troisième phase consiste en la combustion de l'hydrocarbure mis en suspension. Cette phase est pilotée principalement par l'entraînement d'air au sein du jet. En effet, lors de la projection, le mélange devient rapidement trop riche en

combustible et il est alors nécessaire que de l'air (oxygène) soit introduit pour observer la combustion du liquide après son évaporation. Ce modèle est issu d'un bilan thermodynamique prenant en compte l'air entraîné ainsi que le dégagement de chaleur résultant de la combustion de l'hydrocarbure en phase vapeur avec l'air entraîné. A noter que la vitesse ascensionnelle du mélange est pilotée par la différence de densité entre gaz brûlés et gaz frais.

La dernière phase est relative à l'évaluation des conséquences en terme d'effets thermiques sur l'environnement. Compte tenu de la durée du phénomène (moins d'une minute), un calcul de dose est réalisé.

Les hypothèses de chacune de ces phases sont précisées dans les paragraphes suivants.

3.4.2 Détermination du délai d'occurrence du phénomène et de la hauteur de liquide susceptible d'être mise en suspension

Le lecteur pourra se reporter au paragraphe dédié pour avoir un rappel de la succession de phénomènes observés dans le cas d'un boil over en couche mince.

3.4.2.1 Épaisseur de liquide mise en suspension

Pour déterminer la quantité de produit susceptible d'être mise en suspension, la relation proposée par *Broeckmann* a été retenue :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) + V_a \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{k}{\rho C_p} q_r \exp(-kz)$$

Cette relation fait intervenir les données physiques suivantes :

- données thermophysiques du produit : masse volumique ρ (échanges conductifs) ($\rho = 820 \text{ kg/m}^3$), coefficient d'absorption du rayonnement k (échanges radiatifs avec la flamme) ($k = 148 \text{ m}^{-1}$), diffusivité thermique modifiée α (échanges conductifs) ($\alpha = 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$),
- flux radiatif reçu par le produit q_r (échange radiatif et prise en compte du diamètre du bac par l'intermédiaire de la relation proposée par Mudan et Croce),
- vitesse de combustion V_a ($V_a = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$).

3.4.2.2 Temps de déclenchement du phénomène

Pour estimer le temps de déclenchement du phénomène, il suffit de connaître la hauteur de liquide au moment où l'incendie a débuté. En effet, il ne se passe rien d'autre qu'un feu de bac tant que la hauteur de liquide est supérieure à quelques centimètres. Le temps de déclenchement peut donc être obtenu à partir de la hauteur initiale de liquide, l'épaisseur mise en suspension et la vitesse de régression spécifique du produit à l'aide de la relation suivante :

$$\text{Temps de déclenchement} = \frac{(\text{Hauteur initiale de liquide} - \text{Épaisseur mise en suspension})}{\text{Vitesse de régression}}$$

Remarque : contrairement au boil over classique, dont l'amplitude décroît avec une réduction du niveau initial de liquide, l'amplitude du boil over en couche mince est indépendante de ce paramètre, seule la quantité de produit ayant atteint une température supérieure à 100 °C étant concernée.

3.4.3 Détermination de la vitesse d'éjection et de la composition du mélange à la suite de la vaporisation de l'eau contenue en fond de bac

Sur la base de discussions avec les industriels présents, le GT a retenu une épaisseur d'eau dans le fond du bac d'un centimètre.

3.4.3.1 Estimation de la vitesse d'éjection

La vitesse d'éjection du mélange décroît suivant la hauteur et il est estimé qu'à la sortie du bac, la vitesse ascensionnelle des gaz brûlés devient dimensionnante devant la vitesse d'éjection du mélange (Figure 6). La phase de combustion du mélange prend alors le relais vis-à-vis de la phase d'éjection.

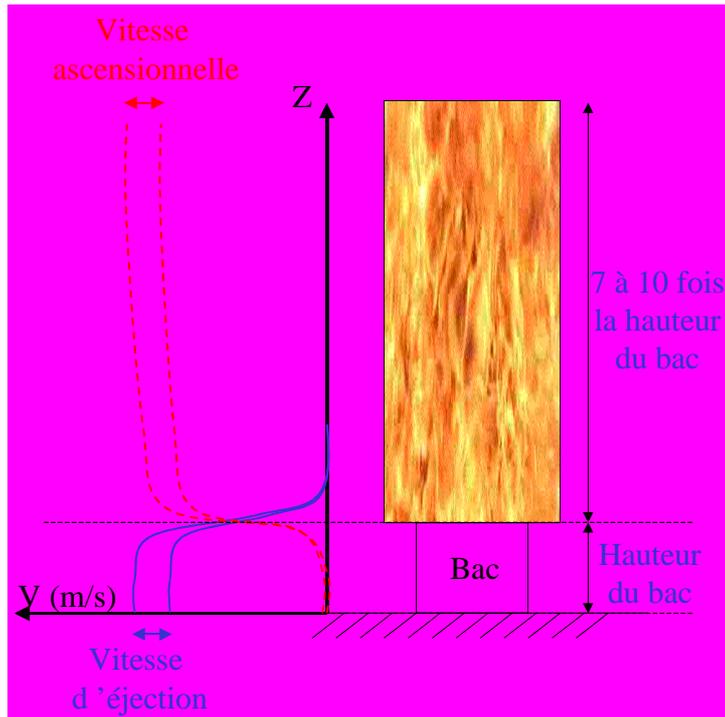


Figure 6 : Schéma d'évolution suivant la hauteur de la vitesse d'éjection et de la vitesse ascensionnelle du mélange.

Pour déterminer la vitesse du mélange, la relation de Davidson (1985) définissant la vitesse ascensionnelle des gaz brûlés dans l'air est donc utilisée :

$$V_{mel} = 0.7 \left[g D_{cyl_feu} \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_a} \right]^{0,5}$$

où D_{cyl_feu} : diamètre du cylindre de feu,

ρ_a et ρ_g respectivement masse volumique de l'air et des gaz.

3.4.3.2 Estimation de la composition du mélange d'eau et d'hydrocarbure initial

La composition du mélange est ensuite calculée sur la base d'un mélange « homogène » au niveau du point le plus haut du bac.

$$\rho_{mel(HC+eau)} = \left[\frac{M_{eau} + M_{HC_liq} + M_{HC_gaz}}{Vol_{global_gaz} + Vol_{HC_liq}} \right]$$

Remarque : Le mélange est considéré à l'équilibre en pression entre la phase liquide et gaz. A noter que la masse d'eau contenue dans le bac est déterminée en

considérant une épaisseur de fond d'eau de 0,01 m. Cette valeur constitue un ordre de grandeur de la quantité d'eau susceptible d'être présente dans un bac d'hydrocarbure en exploitation normale jugé crédible par la profession.

3.4.4 Détermination des caractéristiques géométriques du volume de flamme qui rayonne

3.4.4.1 Entraînement d'air

La relation retenue pour estimer l'entraînement d'air est basée sur une de celles utilisées pour les jets. En effet, la projection de liquide peut être assimilée en première approximation à un jet diphasique composé d'un mélange d'eau et d'hydrocarbures, la durée d'existence n'étant que de quelques secondes.

En revanche, la taille du jet et sa brièveté font que la relation ne peut être appliquée sans modifications, ce qui a été fait en se calant sur les essais à petite échelle. Un compromis acceptable a consisté à multiplier par un coefficient correctif de 10, au regard des essais réalisés par l'INERIS.

$$M_{\text{air}} = 10 \left[0,32 \times M_{\text{mel}} \times \frac{V_{\text{eject}}}{1,2 \times D_{\text{bac}}} \times \left(\frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{mel}}} \right)^{0,5} \right]$$

3.4.4.2 Estimation du volume de gaz brûlés produits et détermination de la nouvelle composition des gaz

Pour estimer ensuite la géométrie des flammes, il est supposé que la combustion des hydrocarbures présents dans le mélange est pilotée par la disponibilité de comburant dans le mélange, en l'occurrence de l'oxygène de l'air. En effet, au niveau du haut du bac, le mélange considéré ne peut s'enflammer faute d'air. Le jet est donc discrétisé et le débit d'air entraîné est calculé sur chaque intervalle pour déterminer la nouvelle composition du mélange en eau, air, gaz brûlés, d'hydrocarbure en phase liquide et gazeuse (cf. Figure 7_{SEQARABIC}).

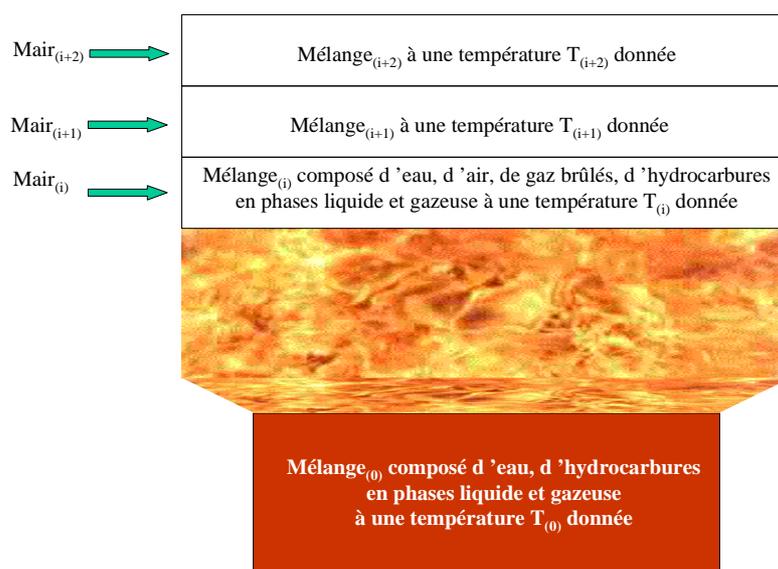


Figure 7 : principe du calcul de la combustion du jet.

Concernant la combustion, elle est supposée se dérouler dans les conditions stœchiométriques et seul le combustible en phase gazeuse est supposé brûlé. Par la suite, l'énergie dégagée par la combustion est supposée contribuer d'une part, à la montée en température du mélange et d'autre part, à la vaporisation de l'hydrocarbure qui est encore en phase liquide (sous forme de gouttelettes). Le rendement global de la combustion est pris égal à 40 % (valeur théorique).

3.4.4.3 Estimation du volume et de la géométrie des flammes

Pour estimer le volume des flammes qui émet un rayonnement, l'hypothèse a été faite d'une géométrie cylindrique dont le diamètre est pris égal à 1,2 fois le diamètre du bac. Au regard des essais réalisés par l'INERIS, cette valeur constitue un compromis entre les cas où des boules de feu de petite taille et des cylindres ont été observés. A noter que lorsque des boules de feu étaient observées durant les essais de l'INERIS, ce n'était pas la partie la plus rayonnante du phénomène.

La hauteur du cylindre de feu est obtenue à partir du calcul de la composition effectué à l'étape précédente. La hauteur du cylindre de flamme est estimée atteinte dès lors que la température du jet passe en dessous d'une température de 500°C. Il est à noter que dès que la combustion est terminée, la température au sein du jet décroît relativement vite. En supposant que le bac est noyé dans un feu de cuvette, il est donc considéré que le cylindre de feu émet un rayonnement depuis le sol.

A noter : le modèle est suffisamment dimensionnant pour ne pas formaliser l'apport d'énergie au produit par convection, dû au feu de cuvette.

3.4.5 Détermination des conséquences sur l'environnement

3.4.5.1 Estimation de l'émittance des flammes

Pour estimer les effets sur l'environnement, il faut connaître l'émittance des flammes. Celle-ci est prise égale à 150 kW/m² ce qui correspond à une température de 1000°C en utilisant l'équation de Stefan-Boltzmann

$$SEP = \sigma T_f^4$$

Cette hypothèse est conservatrice car cette valeur importante est considérée sur toute la hauteur du cylindre alors que les essais ont montré que cette valeur semble plus faible dès que l'altitude augmente.

3.4.5.2 Calcul des distances d'effets du boil over en couche mince

Les distances d'effets sont calculées en supposant l'hypothèse courante d'une flamme solide de forme cylindrique qui permet de calculer le flux reçu en un point donné et en considérant une durée d'exposition qui correspond à la durée d'existence du phénomène.

Ensuite, un calcul de dose thermique est effectué qui permet d'estimer les effets sur les personnes en se basant sur les doses référencées dans l'arrêté du 29/09/2005 :

$$\phi^{4/3} t = \text{dose}$$

3.4.6 Exemple d'applications

Le modèle précédent a été appliqué pour des bacs de dimensions représentatives de ceux qui peuvent être trouvés dans des dépôts de liquides inflammables. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Caractéristiques du bac			Distances d'effets (m) à partir des parois du bac			Distances d'effets (m) à partir du centre du bac		
Diamètre (m)	Hauteur de bac et de produit (m)	produit	1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s	1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s	600 (kW/m ²) ^{4/3} .s	1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s	1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s	600 (kW/m ²) ^{4/3} .s
60	20	GO	75	110	140	105	140	170
30	15	Jet A-1	25	35	45	40	50	60

3.4.7 Les limites du modèle

Le modèle n'est pas adapté pour des boil over classiques, il ne doit donc être utilisé que pour les produits identifiés dans la feuille de calcul Excel mise à disposition (FOD, GO et Jet-A1). Il ne peut pas être utilisé pour des bacs de faibles dimensions (moins de 1 m de diamètre). En effet, en dessous de ces valeurs, la vitesse de régression n'est plus pertinente.

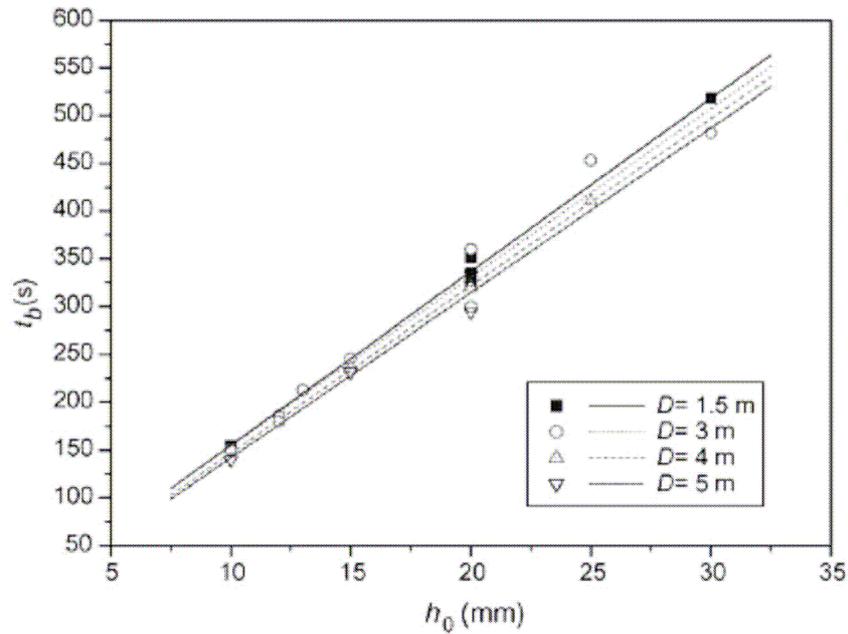
Un calcul simple de balistique (sans intégrer la résistance de l'air, cas le plus pénalisant) montre que des retombées sont envisageables jusqu'à une distance de 50 m maximum (vitesse initiale de 15m/s avec un angle de 45° avec une altitude d'émission de 20m). A titre indicatif, des projections pourraient atteindre 20 m pour le cas a priori le plus fréquent (vitesse initiale de 12 m/s, angle de 60° et hauteur d'émission de 15m).

3.5 Cinétique

Le volet cinétique présenté ici ne concerne que le délai entre les deux phénomènes suivants : feu de bac et survenance de la boule de feu associée au boil over en couche mince. Il ne traite donc pas directement des aspects relatifs à l'adéquation des délais de mise en œuvre des barrières de sécurité, ni de la mise à l'abri des personnes.

Il convient de noter que toutes les études et les essais connus à ce jour conduisent à des durées similaires de déclenchement du phénomène de boil over en couche mince. Les éléments présentés ci-après sont issus notamment des publications du CERTEC (Espagne), du CNRS Poitiers et du NRIFD (Japon). Ils sont donnés à titre illustratif dans la mesure où les produits peuvent être différents.

Une étude de caractérisation du phénomène pulsatoire en couche mince a été réalisée par Ferrero et al (2006). Quatre diamètres de bac (D) ont été étudiés pour plusieurs épaisseurs initiales de produits h_0 . La figure suivante précise le temps de déclenchement (t_b) du phénomène à compter du feu de bac en fonction du diamètre du bac et de la hauteur de produit.



Source : Ferrero et al (2006)

Figure 8: Temps de déclenchement du phénomène pulsatoire en couche mince pour différentes hauteurs initiales de produits

Il convient de noter, comme indiqué dans la présentation du modèle au §3-4-2-2, que le temps de déclenchement dépend directement de la vitesse de régression du produit.

Par exemple, pour un bac de GO de 60 m de diamètre et d'une hauteur initiale de produit de 20 m, le temps de déclenchement estimé entre le début du feu du bac et le phénomène de boil over en couche mince est de 83 h.

Le graphique suivant propose l'évolution issue du modèle, du temps de déclenchement (en heures) du boilover en couche mince en fonction de la hauteur initiale de produit (en mètres).

Temps de déclenchement (h)

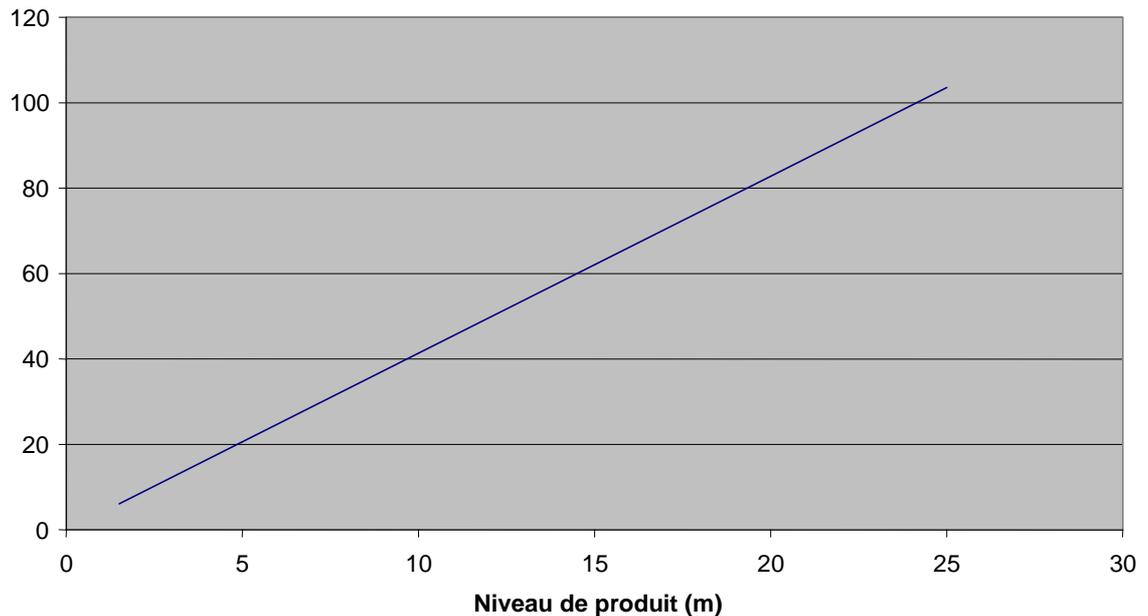


Figure 9 : Évolution du temps de déclenchement du boil over en couche mince déterminée par le modèle.

4. Accidentologie relative au boil over

4.1 Accidentologie générale

Une dizaine de cas sont recensés dans les bases accidentologiques (ARIA/BARPI, VICTOR/GESIP...). Les plus cités sont :

- Yokkaichi (Japon) 15/10/55 (fuel lourd) ;
- Signal Hill Hancock 22/05/58 qui n'est pas un « Boil over » mais un « Froth over » (phénomène spécifique aux produits réchauffés) (fuel lourd) ;
- Tchécoslovaquie 26/06/71 (pétrole brut) ;
- Trieste (Italie) 4/08/72 (pétrole brut) ;
- Etats-Unis 19/06/75 (pétrole brut) ;
- Etats-Unis 1980 (pétrole brut) ;
- Tocoa (Venezuela) 19/12/82 (fuel lourd) ;
- Milford Haven (Royaume Uni) 30/08/83 (pétrole brut) ;
- Thessalonique (Grèce) 24/02/86 (pétrole brut) ;

4.2 Accident du port Edouard Herriot – 2 juin 1987

Il est important de préciser en préambule que ce chapitre n'a pas la prétention de redéfinir l'accident du port Edouard Herriot, mais seulement de poser certaines questions relatives à cet accident qui découlent de la lecture des rapports disponibles et de l'état des connaissances exposé dans les paragraphes précédents.

Les divers rapports sur le déroulement de l'accident évoquent une concomitance de l'explosion de bac et de la boule de feu décrite sur le schéma suivant :

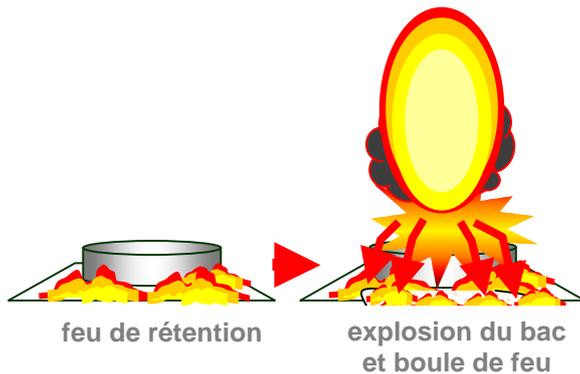


Figure 10 : Séquence accidentelle de l'accident du Port Edouard Herriot

Cette séquence accidentelle (sans feu de bac) ne correspond pas à celle d'un phénomène de boil over, phénomène retardé à partir d'un feu de bac.

Le rapport « dépôts anciens de liquides inflammables », daté d'août 1989, du Groupe de travail technique 253 décrit la boule de feu comme suit :

« Alors que le feu régresse, le bac 6 d'une capacité de 2 900 m³ et qui contenait 1 000 m³ de gas-oil explose en formant une boule de feu de 450 m de haut et 200 m de large (probablement un boil over). Par chance, le début de déchirement de la robe du bac en partie haute avait été détecté quelques instant avant l'explosion et les pompiers avaient pu se protéger derrière le bâtiment. »

Le rapport Face au risque n°235 fait état d'une tor chère de 20 m sur le bac 7, bac adjacent et identique au bac 6 siège de la boule de feu « révélatrice de l'énorme pression intérieure d'un réservoir riveté, contenant 2 500 m³ de gasoil ».

Questions relatives à l'accident

Les questions suivantes se posent alors :

- N'est-il pas possible que le bac 6 soit monté en pression tout comme le bac 7, et que les soupapes ou événements aient été défailants et n'aient pas pu évacuer le différentiel de pression dû à la vaporisation de produit ?
NB : Des sifflements stridents ont été entendus quelques secondes avant le sinistre.
- En considérant que le bac 6 (rappel : il s'agit d'un bac riveté) ait pu monter en pression, jusqu'à atteindre sa pression de rupture, la détente adiabatique et l'inflammation du ciel gazeux alors sous pression peuvent-ils expliquer la génération de la boule de feu observée ?
NB : Au moment du phénomène, le bac 6, de capacité de 2 900 m³ est rempli au tiers de sa capacité, soit 1 000 m³ de produit, et donc contient 2 000 m³ de vapeurs surchauffées sous pression.

Une question complémentaire pouvant expliquer la dimension de la boule de feu doit aussi être posée : la décompression liée à l'ouverture du bac est-elle susceptible d'aspirer des gouttelettes de liquide participant à la boule de feu ?

Afin de mieux appréhender la séquence accidentelle et ses conséquences, des travaux sur les causes de la boule de feu ont été engagés dans le cadre du GTDLI : voir le paragraphe 6 ci-dessous relatif au phénomène de pressurisation du contenu d'un bac à toit fixe pris dans un incendie.

5. Conclusions sur les boil over « classique » et « en couche mince » et produits concernés

5.1 Similitudes et différences

La similitude entre les phénomènes de boil over « classique » et de boil over « en couche mince » réside dans l'évaporation brutale d'une couche d'eau en fond de réservoir qui entraîne la projection enflammée du produit.

Dans le cas du phénomène de boil over « classique », l'onde de chaleur descend plus rapidement que le front de flamme situé sur la partie supérieure du liquide. Aussi, lorsque l'onde de chaleur rencontre le fond d'eau, le produit est projeté entraînant un moussage (le bac déborde) et une boule de feu.

Dans le phénomène de boil over « en couche mince », le produit se consomme en gardant une composition homogène et aucune onde de chaleur ne se forme. La source de chaleur qui peut vaporiser le fond d'eau est le front de flamme lui-même lorsqu'il arrive à proximité immédiate du fond d'eau. Dans ce cas, on retrouve la projection du produit (boule de feu) mais les quantités en jeu sont beaucoup plus faibles et le phénomène de moussage n'est pas observé. La boule de feu est donc plus « petite » et sa durée de vie plus courte, engendrant des effets de moindre intensité.

Il convient aussi de remarquer que dans le cas du phénomène de boil over « classique », plus le bac est plein, plus les effets peuvent être importants mais plus le temps de déclenchement est grand et vice-versa.

Dans le cas, du phénomène de boil over « en couche mince », les effets ne dépendent pas ou presque pas du niveau de remplissage au début de l'incendie du bac. Aussi, les effets maximaux peuvent être atteints dans des conditions défavorables du point de vue cinétique (bac peu rempli). Néanmoins, les effets, sont bien moindres par rapport au boil over classique.

5.2 Les produits concernés

Les essais réalisés ne permettent pas pour l'heure de définir des critères qui permettent de savoir a priori si un produit a une propension à engendrer un boil over classique, à couche mince ou aucun des deux.

Aussi, pour connaître la propension d'un autre liquide inflammable à produire un boil over classique ou un boil over en couche mince ou aucun effet, il est nécessaire de procéder à une étude spécifique. Cette étude peut se limiter par exemple à la réalisation d'essais similaires à ceux réalisés par l'INERIS : essais à petite échelle afin de voir s'il y a projection de liquide enflammé et de mesurer le gradient thermique pour rechercher l'existence d'une onde de chaleur.

Cette combinaison permet d'une part de s'assurer que le produit est suffisamment visqueux pour pouvoir être projeté par la vaporisation de l'eau présente en fond de bac et d'autre part de vérifier, en cas de projections de liquide, si celles-ci ont lieu en présence d'une onde de chaleur ou non.

Dans le cadre des études et des essais réalisés dans le cadre de la rédaction du présent document, certains produits ont d'ores et déjà été testés, en particulier les principaux produits que l'on retrouve dans les dépôts de liquides inflammables (hors raffineries).

Phénomène	Produits testés
boil over « classique »	Brut léger ¹
boil over « en couche mince »	Gazole ² , FOD, ³ JET A-1 ⁴
Aucun des deux	Essence ⁵

Comme indiqué précédemment, tout produit non indiqué ci-dessus ou ne correspondant pas aux spécifications précisées doit faire l'objet d'une étude spécifique (hors changements de la spécification relatifs à la teneur en soufre et aux variations saisonnières été/ hiver/ intermédiaire).

A noter néanmoins qu'il n'y a pas lieu de remettre en cause les produits connus comme pouvant donner lieu à un boil over « classique » au regard de la littérature et de l'accidentologie (fioul lourd, fioul lourd réchauffé, bruts, ...)

6. Phénomène de pressurisation du contenu d'un bac à toit fixe pris dans un incendie

6.1 Description qualitative du phénomène de pressurisation d'un bac à toit fixe pris dans un incendie

Le cas examiné est celui d'un feu de cuvette chauffant un hydrocarbure pour le porter au-delà de la température basse de sa plage de distillation. Dans ce cas en effet, la pression absolue dépasse la pression atmosphérique et un bac à toit fixe se pressurise.

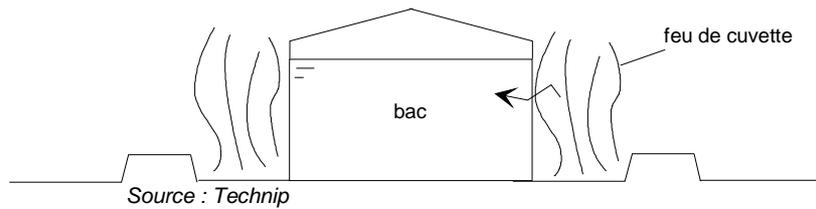
¹ Brut Léger provenant du bassin parisien

² Gazoles et Diesel répondant aux spécifications techniques administratives en vigueur au 01/06/07

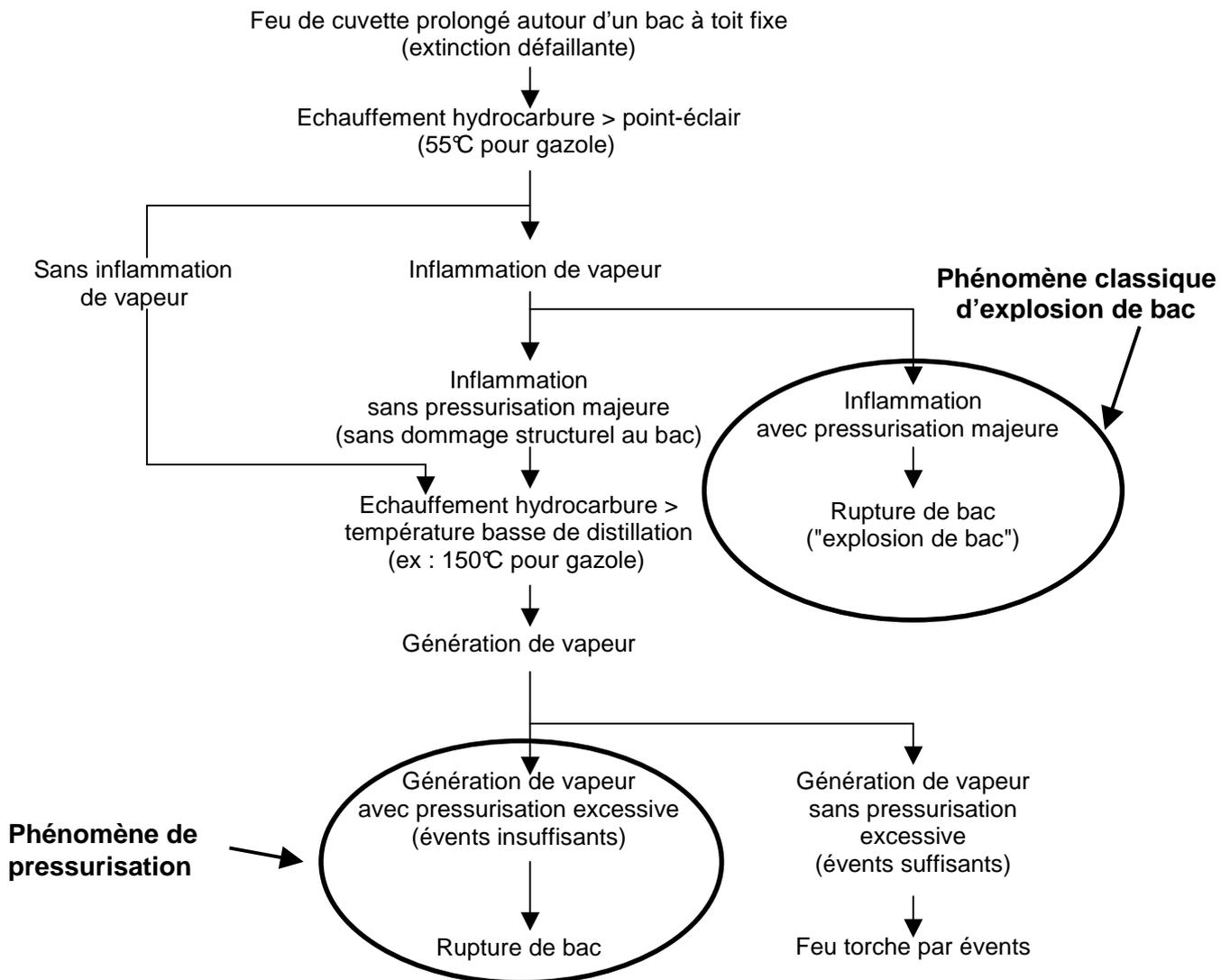
³ FOD – Fuel domestique répondant aux spécifications techniques administratives en vigueur au 01/06/07

⁴ Carburéacteur Jet A-1 répondant aux spécifications techniques administratives en vigueur au 01/06/07

⁵ Supercarburant, Supercarburant ARS, Supercarburant Sans Plomb 95, Supercarburant Sans Plomb 98 répondant aux spécifications techniques administratives en vigueur au 01/06/07



La séquence des événements est présentée dans l'arbre d'événements suivant :



Source : Technip

Il convient à ce stade de noter que le phénomène présenté est différent du phénomène bien connu d'explosion de bac et faisant notamment l'objet de la circulaire du 31 janvier 2007 relative à la « modélisation des effets de surpression dus à une explosion de bac atmosphérique » ; ce dernier phénomène peut d'ailleurs se produire dans d'autres conditions que celles décrites dans l'arbre précédent. En particulier, il ne nécessite pas nécessairement un feu de cuvette prolongé.

On notera que le phénomène de pressurisation d'un bac à toit fixe pris dans un incendie **peut potentiellement concerner tous les liquides inflammables.**

En cas d'explosion de bac, on peut différencier deux grandes familles de comportement de l'intégrité du bac.

Cas d'une rupture robe/toit

L'hydrocarbure est expulsé en altitude avec un effet directionnel réduisant les effets au sol (cf port Edouard Herriot). La propulsion est "dopée" par l'ébullition de l'hydrocarbure surchauffé. C'est pourquoi ce phénomène est décrit dans le présent document relatif aux phénomènes pouvant générer des boules de feu.

Cas d'une rupture robe/fond

L'hydrocarbure est émis au sol avec un effet de vague enflammée également "dopé" par l'ébullition.

Avertissement : les propositions formulées dans les **paragraphes 6.2 et 6.3** suivants sont celles du GT (dont UFIP, GESIP, USI, TECHNIP), **hors avis de l'INERIS qui n'a pas fait connaître ses propositions et commentaires à la date de rédaction du présent document.**

6.2 Mesures de prévention relatives au phénomène de pressurisation d'un bac pris dans un incendie

Les principales mesures de prévention concernent la prévention des feux dans les cuvettes et les mesures permettant de limiter la durée de ces feux.

L'objet du présent paragraphe n'est pas d'entrer dans le détail des mesures de prévention ou de protection mais d'explicitier des mesures de conception permettant de faire en sorte que la montée en pression du bac par vaporisation du produit contenu soit insuffisante pour donner lieu à une perte d'intégrité du bac.

Notamment cette condition peut être considérée satisfaite sous réserve de mise en œuvre d'évents de respiration suffisamment dimensionnés, correctement construits et installés et correctement maintenus dans le temps. Ces points devront impérativement être justifiés dans l'étude de dangers.

Il convient de préciser à ce stade que plusieurs circonstances différentes peuvent conduire à augmenter la pression à l'intérieur du bac de façon plus ou moins rapide. Les mesures techniques permettant de se prémunir de ces augmentations de pression dépendent de la vitesse de montée en pression :

- les augmentations et diminutions de pression dues aux conditions météorologiques et aux transferts de produits sont généralement traitées par les événements des bacs et par des soupapes de respiration. Il s'agit dans ce cas de montées en pression relativement lentes ;
- a contrario, l'explosion de bac due à l'explosion du ciel gazeux est très rapide et la fragibilité peut être un moyen d'en diminuer les effets ;
- le cas présent de phénomène de pressurisation d'un bac pris dans un incendie constitue une augmentation de pression relativement rapide mais plus lente que l'explosion du ciel gazeux, aux dires des experts. Elle peut donc être traitée par la mise en œuvre d'évents de respiration suffisamment dimensionnés pour évacuer le gaz en surpression.

6.3 Le dimensionnement des événements vis-à-vis du phénomène de pressurisation d'un bac pris dans un incendie

Le présent paragraphe explicite des modalités de dimensionnement des événements pour que ceux-ci puissent évacuer le gaz en surpression sans causer une perte d'intégrité du bac.

Préambule

Les codes de construction des réservoirs fixent des pressions de design, qui sont utilisées pour le calcul de l'épaisseur de la robe, de sa stabilité, de l'épaisseur du toit, de l'aire de compression robe/toit, ainsi que pour la sélection et le dimensionnement des événements, l'ancrage du réservoir, le choix du type de toit et sa conception détaillée. C'est la pression de design qui permet d'évaluer la pression de rupture d'un réservoir atmosphérique.

Le choix du code de construction et donc de la pression de design associée à la conception du réservoir conditionne sa pression de rupture.

Correspondance entre les différents codes de construction
et les pressions de design associées

Pression de design (mbar)	CODRES 91 (France)	EN 14015 (CEE)	API (US)
0	Réservoirs sans pression	Réservoir à toit flottant	API 650 (jusqu'à 180 mbar)
5		Réservoirs sans pression	
10	Réservoirs à basse pression	Réservoirs à basse pression	
25		Réservoirs à haute pression	
56	Réservoirs à moyenne pression	Réservoirs à haute pression	
60	Sans objet	Réservoirs à très haute pression	API 620 (jusqu'à 1 bar)
180			
500			
1000			

L'ensemble des experts consultés (Références : CETIM, API937A, JN Simier, TECHNIP, Lannoy (rapport Macart)) s'accordent pour dire que :

- ⇒ La pression de rupture varie dans le même sens que la pression de design,
- ⇒ La pression de rupture d'un bac est inversement proportionnelle à son diamètre,
- ⇒ Un bac à basse pression ($P_{\text{design}} \leq 25$ mbar), vide ou en produit, présente une pression de rupture inférieure à 250 mbar

Il revient à l'exploitant de démontrer que, par conception, les bacs qu'il exploite ne peuvent subir de pressurisations importantes susceptibles de reproduire un phénomène de boule de feu telle que celle observée au port Edouard Herriot en 1987 :

- soit l'exploitant peut démontrer que la surpression ($P_{rup} - P_{atm}$) associée au bac⁶ est insuffisante pour comprimer les gaz susceptibles de :

- produire une énergie interne capable d'évincer complètement le toit,
- reproduire ainsi une boule de feu dimensionnante par détente adiabatique.

Dans ce cas, il convient tout de même de s'interroger sur la zone de rupture du bac et le cas échéant des conséquences que cela peut avoir.

- soit l'exploitant met en œuvre des événements de respiration dimensionnés suivant les critères proposés aux paragraphes 6-3-1 et 6-3-2 ci-dessous (le GTDLI a investigué ces critères uniquement dans le cas des hydrocarbures) permettant ainsi d'évacuer le débit de vaporisation des gaz et de prévenir ainsi toute pressurisation susceptible d'engendrer une boule de feu suite à une perte d'intégrité du bac.

Il convient alors :

- a. De déterminer le débit de vaporisation maximal à évacuer
- b. De dimensionner une surface d'évents permettant d'évacuer ce débit, afin de ne pas dépasser la pression de design d'un bac.

6.3.1 Débit de vaporisation

Ce cas est un cas de dimensionnement d'évent prévu par la norme EN 14015. Cette norme reprend la formule établie par l'API (API 2000, avril 98) en évaluant un débit d'évaporation en équivalent "air" :

$$U_{FB} = 4.10^4 A_W^{0,82} \times \frac{R_i}{H_V} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

U_{FB} : débit de vaporisation en Nm³/h d'air.

A_W : surface de robe au contact du liquide, en m² (avec hauteur plafonnée à 9 m).

H_V : chaleur de vaporisation en kJ/kg.

M : masse molaire en kg/kmole.

R_i : coefficient de réduction pour prendre en compte l'isolation thermique ; ce facteur est pris égal à 1 correspondant à l'absence de toute isolation.

T : température d'ébullition, en K.

Pour un corps pur comme l'hexane qui est représentatif des hydrocarbures :

$M = 86$ g, $H_V = 335$ kJ/kg, $T = 342$ K

A noter :

Dans le cas de la norme EN 14015, la puissance de l'incendie (en W) transmise au liquide est déterminée par la relation :

$$P = 40\,000 A^{0,82}$$

avec A = surface mouillée en m² avec une hauteur plafonnée à 9 mètres.

Cette formule est similaire à celle de l'API 2000 pour laquelle :

$$P(W) = 43\,200 A^{0,82}$$

avec A = surface mouillée en m² avec une hauteur plafonnée à 9 mètres.

⁶ P_{rup} : pression de rupture du réservoir
 P_{atm} : Pression atmosphérique

Eléments complémentaires relatifs à la puissance de l'incendie transmise au liquide :

Point 1 :

L'API 2000 et la EN 14015 considèrent que la hauteur de liquide à prendre en compte pour la détermination de la surface mouillée n'excède jamais 9 mètres, afin de tenir compte du fait que les grandes capacités sont moins susceptibles d'être exposées au feu d'une manière homogène sur l'ensemble de la surface mouillée.

L'API 521 – paragraphe 5.15.1.1 - considère que « pour déterminer la quantité de vapeur générée, il est nécessaire de ne prendre en compte que la fraction du bac qui est mouillée et de la prendre au plus égale à 7,6 mètres.

Note : même si les feux d'hydrocarbures peuvent excéder 40 mètres de hauteur, l'expérience a montré que le dimensionnement des événements à partir d'une chaleur rayonnée moyenne prise à une hauteur de 7,6 mètres au dessus du feu de nappe était suffisant ».

De plus, pour une hauteur de produit supérieure à 9 mètres, on peut remarquer que :

- ⇒ Le volume des gaz susceptibles d'être comprimés est réduit, donc les effets d'une boule de feu potentielle le seraient également
- ⇒ De surcroît, le bac est d'autant plus frangible que la charge hydraulique est importante (ref. API 937A / CETIM / TECHNIP)

Ainsi, sur la base des précédentes considérations, le GTDLI retient l'hypothèse de l'API 2000 et de la EN 14015, à savoir une hauteur plafonnée à 9 mètres pour la détermination de la surface mouillée.

Point 2 :

Les formules d'origine de l'API 521 (dimensionnement des soupapes) d'où est tirée la formule ci-dessus prévoient l'introduction d'un coefficient C=1,64 pour déterminer la puissance de l'incendie dans le cas suivant : cuvette de rétention mal drainée pour écarter les liquides inflammables du bac et défaut de la protection incendie.

Le GTDLI retient la prise en compte du coefficient C=1,64 en faisant abstraction de tout drainage éventuel de cuvette et de la présence de moyens de lutte incendie.

En conclusion, le GTDLI retient la formule suivante pour la détermination du débit de vaporisation, avec les hypothèses présentées ci-dessus :

$$P(W) = 43\,200 \cdot C \cdot A^{0,82}$$

avec A = surface mouillée en m² avec une hauteur plafonnée à 9 mètres et C=1,64

La formule devient :

$$U_{FB} = 70\,900 \cdot A_w^{0,82} \cdot \frac{R_i}{H_v} \cdot \left(\frac{T}{M} \right)^{0,5}$$

Ainsi, pour les bacs dont la hauteur est supérieure à 9 mètres, **sur la base des caractéristiques de l'hexane (représentatif des hydrocarbures)**, la formule se simplifie en :

$$U_{FB} = 6542 \cdot DEQU^{0.82}$$

DEQU : Diamètre du bac en mètres

6.3.2 Section d'évent et surpression

En première approximation, la surpression atteinte dans un réservoir pris dans un feu enveloppant et devant être évacuée Δp (en Pa) peut être évaluée par :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_{air} \left(\frac{U_{FB}}{C_D \times S_e} \right)^2$$

ρ_{air} : masse volumique de l'air (= 1,3 kg/m³).

C_D : coefficient aéraulique de l'évent (entre 0,6 et 1). Il s'agit d'une donnée constructeur à fournir au cas par cas par l'exploitant.

S_e : section des événements.

U_{FB} : débit de vaporisation en **Nm³/s** d'air.

Ainsi on obtient :

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{2} \rho_{air} \left(\frac{U_{FB}^2}{C_D^2 \times \Delta p} \right)}$$

On dimensionne S_e en prenant Δp égal à la pression de design du bac.

6.3.3 Application numérique

Produit : hexane (représentatif des hydrocarbures).

Bac : diamètre = 30 m, hauteur = 15 m.

$A_w = 1414 \text{ m}^2$ ramenée à 848 m^2 (du fait du plafonnement à 9 m)

=> $U_{FB} = 106\,402 \text{ Nm}^3/\text{h} = 29,6 \text{ Nm}^3/\text{s}$

Pour limiter la Δp à 1000 Pa (10 mbar), on obtient :

$S_e = 0,75 \text{ m}^2$, si C_D (coefficient aéraulique de l'évent) = 1

$S_e = 1,25 \text{ m}^2$, si $C_D = 0,6$

6.4 Évaluation de l'intensité des effets de la boule de feu générée par le phénomène de pressurisation du bac pris dans un incendie

A ce jour, l'évaluation de l'intensité des effets de la boule de feu générée par le phénomène de pressurisation de bac pris dans un incendie n'a pas été investiguée par le groupe de travail.

Aussi, à défaut de propositions de l'exploitant dûment justifiées dans l'étude de dangers pour évaluer l'intensité des effets de la boule de feu, il est proposé d'utiliser les formules de l'instruction technique de 1989 relatives au boil over en considérant la masse réagissante M égale à 10 % de la masse contenue dans le réservoir :

- Effets significatifs : $8,23 M^{1/3}$
- Effets létaux : $5,86 M^{1/3}$
- Effets létaux significatifs à déterminer

Ceci est valable pour l'ensemble des liquides inflammables susceptibles de générer le phénomène.

7. Bibliographie

- FACE AU RISQUE - n°235 – Août-septembre 1987
- FACE AU RISQUE - n°240 – Février 1988
- CSIC – Groupe de travail technique « 253 » - Dépôts anciens de liquides inflammables – Recommandations techniques compte-rendus de réunions – Août 1989
- INERIS - Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques accidentels - (DRA-35) - Version Projet - BOILOVER
- NFPA 68 – Guide for Venting of Deflagrations – 2002 Edition
- API Standard 2000 – Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks – Fifth edition, April 1998
- UFIP - Guide méthodologique étude de dangers - Juillet 02
- M. Henry, NFPA, Fire Protection Manual for Hydrocarbon Processings Plants, Vol.1, 3rd ed. C. H. Vervalin, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, **1985**, p. 69.
- Défense incendie d'un dépôt, Document GESIP, **1982**
- Hall, H. H., « Oil-Tank-Fire Boilovers », JN: Mechanical Engineering, Vol. 47, No7, pp540-544, **1925**.
- Dr. Jennifer Skilling, « Explosive Phenomena : Boilovers », Chemical Engineering, University of Edinburgh. (Site web : www.chemeng.ed.ac.uk/~jskillin/teaching/safety4/jroberts/background.htm)

- Risinger, J. L., Fire Protection Manual for Hydrocarbon Processing Plants, Vol. 1, 3rd ed. C. H. Vervalin, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, **1985**, pp. 137-148.
- Burgoyne, J.H. and Katan L. L., « Fires in open tanks of petroleum products: Some fundamental aspects », Institute of Petroleum, Vol. 33, pp158-185, **1947**.
- Hasegawa, K, « Experimental Study on the Mechanism of Hot Zone Formation in Open-Tank Fires », 2nd International Symposium on Fire safety Science, pp 221-230, **1988**.
- Koseki, H., « Boilover and crude oil fire », Applied Fire Science, Vol. 3, pp 243-272, **1993-94**.
- Koseki, Tomakomai Large Scale Crude oil Fire experiments – fire technology, **2000**
- Koseki, Experimental study of Boilover in crude oil fire- fire safety science
- Koseki - Effect of pan size on radiation characteristic
- Koseki – large scale Boilover experiments using crude- fire safety journal **2006**
- Broeckmann B. and Schecker H. G., « Heat transfer mechanisms and Boilover in burning oil-water systems », Loss Prevention in the Process Industry, Vol. 8, No3, pp 137-147, **1995**.
- Michaëlis P., Mavrothalassitis G., Hodin A., « Boilover – Propension de certains hydrocarbures à développer ce phénomène. Quantification déterministe des effets conséquences. », Document TOTAL, Réf. ENV-MHS-950418, **1995**.
- Video de l'accident de Signal Hill Hancock
- Bases de données : ARIA (BARPI), MHIDAS, VICTOR
- Kimura Y., « Rapport sur l'incendie de Daikyo Oil à Yokkaichi, », JN : Kasai, Fire Prevention Society of Japan, Vol.4, No.4, pp. 185-192, **1955**
- Persson H., SP Swedish National Testing and Research Institute, « Tank Fires: Review of fire incidents 1951-2003 », **2004**
- David D.J., « Boiling up and over », JN : Hazardous Cargo Bulletin, février **1990**
- LAURENT GAUTIER 34 THESE PROFESSIONNELLE 2005
- Garrison W.G., « C.A. La Electricidad de Caracas, December 19, 1982, Fire near Caracas, Venezuela », JN : Loss Prevention Bulletin, No 57, **1984**

- Golec R.A., Standard Oil Company (Indiana) and Wade R.C., Amoco Oil Company, « Amoco Oil Company – Milford Haven Refinery Tank Fire », Rapport Amoco, **1983**
- « Amoco-Raffinerie Milford Haven: Tankbrand stellte hohe Anforderungen an Einsatzkräfte », Notruf 112, Band 5
- Garo J.P., Gillard P. and Vantelon J.P., « On the Thin layer Boilover », 6th International Symposium on Fire Safety Science, ENSMA, Université de Poitiers, France, July 5-9, 1999.
- Garo, J.P., Gillard, P., Vantelon, J.P. and Fernandez-Pello A.C., « Combustion of liquid fuels spilled on water. Prediction of time to start to Boilover », Combustion Science and Technology, Vol. 147, p 39-59, 1999.
- Hua J.S., Fan W.C. and Liao G.X., « Study and Prediction of Boilover in liquid pool fires with a water sublayer using micro-explosion noise phenomenon », Fire Safety Journal, 30, p269-291, 1998
- Committee for the Prevention of Disasters, TNO, 'The Yellow Book' – Methods for calculation of physical effects, Part 2, Chapter 6, Ref. CPR 14 E, ed. C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings, 3rd edition, 1997
- Legifrance, Circulaire et Instruction technique du 9 novembre 1989 relatives aux dépôts anciens de liquides inflammables, JO du 7 décembre 1989
- Lees F.P., Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 2, Chapter 16.15: Fireballs, ed. Butterworth-Heinemann, 2nd edition, Reprinted 2001
- Watkins P. and Ramsden N., RPI, « Lastfire Update Boilover Study – Phase I – Initial Small Scale Test Series », April 2004.
- Watkins P. and Ramsden N., RPI, « Lastfire Update Boilover Study – Phase II – Instrumented Test Series », August 2004.
- Michaëlis P., Dumas J-L., Gautier L., « Projet LASTFIRE II – Validation du modèle TOTAL du front de chaleur d'un Boilover », Document TOTAL, Réf. RAE.MHS.08.02.05, février 2005.
- Michaëlis P., Dumas, J.L., Gautier L., Malichecq M., Leloup A., « Rapport descriptif de la troisième campagne d'essais de Boilover à échelle réduite, réalisée dans le cadre du LASTFIRE II du 25 juillet au 9 août 2005 », Document TOTAL, Réf. RM HSE/MHS.31.08.05, août **2005**.
- A Chaillot- Débordement par ébullition (Boilover)/ débordement par moussage (slop Over), 1989
- Garo, Vantelon, Koseki – Thin Layer Boilover : prediction of its onset and intensity- 200
- B. Kozanoglu, F. Ferrero, M. Muñoz, J. Arnaldos, J. Casal, Velocity of the convective currents in boilover, Chem. Eng. Sci. 61 (2006)
- F. Ferrero, M. Muñoz, B. Kozanoglu, J. Casal, J. Arnaldos, Experimental study of thin-layer boilover in large-scale pool fires, Journal of Hazardous

Materials 137 (2006)

- Fabio Ferrero , Miguel Munoz, Josep Arnaldos Thin-layer boilover in diesel-oil fires: Determining the increase of thermal hazards and safety distances (2006)
 - Rapport d'étude de l'INERIS – INERIS-DRA-07-86550-08183A du 12 juin 2007 – Recherche des produits susceptibles de produire un boil over en couche mince et estimation des effets induits par ce phénomène
-