

UVCE dans un dépôt de liquides inflammables

Mai 2007

Groupe de Travail Dépôts Liquides Inflammables - version 01bis

GLOSSAIRE

AÉROSOL

Dans le cas d'un dépôt de liquides inflammables, un aérosol est un ensemble de particules liquides en suspension dans un milieu gazeux.

FLASH-FIRE OU FEU DE NUAGE

Combustion « lente » d'un nuage de vapeurs inflammables. Le flash-fire peut aussi être appelé feu de nuage. Le principal effet de ce phénomène dangereux est thermique.

LIMITE INFÉRIEURE D'EXPLOSIVITÉ (LIE)

Concentration minimale d'explosivité d'un mélange de vapeurs et d'oxygène de l'air.

LIMITE INFÉRIEURE D'INFLAMMABILITÉ (LII)

Concentration minimale d'inflammabilité d'un mélange de vapeurs et d'oxygène de l'air.
En pratique la LII est souvent assimilée à la LIE.

LIMITE SUPÉRIEURE D'EXPLOSIVITÉ (LSE)

Concentration maximale d'explosivité d'un mélange de vapeurs et d'oxygène de l'air.

LIMITE SUPÉRIEURE D'INFLAMMABILITÉ (LSI)

Concentration maximale d'inflammabilité d'un mélange de vapeurs et d'oxygène de l'air.
En pratique la LSI est souvent assimilée à la LSE.

UNCONFINED VAPOUR CLOUD EXPLOSION (UVCE)

Explosion d'un nuage de gaz/vapeurs non confiné. Il s'agit d'un phénomène qui suppose l'inflammation accidentelle d'un nuage ou panache de gaz/vapeurs combustibles mélangés avec l'oxygène de l'air. Suite à l'inflammation, une flamme se propage dans le nuage ou panache et engendre une combustion des vapeurs et une onde de surpression aérienne, qui sont susceptibles de produire respectivement des effets de rayonnement thermique et des effets mécaniques.

VAPEURS DE LIQUIDES INFLAMMABLES

Une vapeur inflammable est la vapeur produite par un liquide inflammable, qui peut être enflammée et brûlée lorsqu'elle est mélangée avec les bonnes proportions d'air, d'oxygène ou d'autre comburant.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	5
2. DOCUMENTS DE REFERENCE.....	5
3. PROBLÉMATIQUE	6
4. THÉORIE.....	7
4.1. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE	7
4.2. ACCÉLÉRATION DES FLAMMES ET EFFETS DE PRESSION.....	7
5. DESCRIPTION DES CAUSES ET DES EFFETS	10
5.1. DISPERSION	10
5.2. EFFETS THERMIQUES	11
5.3. EFFETS DE SURPRESSION	11
6. EVALUATION DES EFFETS	12
6.1. CARACTÉRISATION DU TERME SOURCE	12
6.1.1. Paramètres à définir	12
6.1.2. Substances étudiées dans le présent document	13
6.1.3. Configurations accidentelles.....	13
6.1.4. Hypothèses de calcul.....	14
6.2. DISPERSION DU NUAGE.....	16
6.2.1. Paramètres à définir	16
6.2.2. Résultats.....	18
6.2.3. Abaque obtenu avec le logiciel Phast pour l'évaluation de l'extension de la LII dans le cas d'une évaporation naturelle d'un épandage consécutif à une fuite liquide d'essence	19
6.3. EXPLOSION DU NUAGE.....	21
6.3.1. Effet thermique	22
6.3.2. Effet de pression.....	22
6.3.3. Abaques	27
7. EXEMPLE DE CALCUL DES EFFETS D'UN UVCE DANS UN DÉPÔT DE LIQUIDE INFLAMMABLE	31
7.1. PLAN MASSE D'UN DÉPÔT FICTIF	31
7.2. CARACTÉRISATION DU TERME SOURCE	31
7.3. DISPERSION DU NUAGE	32
7.4. EXPLOSION DU NUAGE	35

1. INTRODUCTION

Ce document, réalisé dans le cadre du GTDLI¹, a pour objet, dans le cadre de l'appréciation des risques liés aux dépôts de liquides inflammables, de préciser :

1. la problématique,
2. les hypothèses,
3. la modélisation des conséquences

de la formation d'un mélange de vapeurs ou de gouttelettes de liquides inflammables et d'oxygène de l'air et les phénomènes physiques qui s'ensuivent :

- sa dispersion atmosphérique,
- et en présence d'une source d'allumage et dans les plages d'inflammabilité du mélange :
 - sa combustion « lente » (flash-fire) au sein d'une zone sans encombrement, ou :
 - son explosion (UVCE) résultant de l'accélération de la vitesse de combustion causée par une zone caractérisée par un certain degré d'encombrement et/ou de confinement.

Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est une explosion de gaz à l'air libre avec ou sans aérosol. Dans le cas d'un mélange de vapeurs d'un liquide inflammable cette explosion produit :

- des effets thermiques
- des effets de pression

Avertissement :

Ce document a été rédigé en tenant compte autant que possible des connaissances techniques et scientifiques les plus récentes. Toutefois, concernant l'accident du dépôt de Buncefield, les investigations des autorités britanniques ne sont pas terminées. Aussi, à ce stade, ce document introduit-il uniquement quelques éléments bien établis issus de cet accident : la nécessité d'examiner dans l'analyse des risques le phénomène d'UVCE dû à un débordement de capacité, et les diverses conditions météorologiques propres à l'établissement, dont les cas d'atmosphères très stables.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

- Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – Juillet 1999 – INERIS DRA - YMo/YMo - 1999 – 20433
- Methods for the calculations of physicals effects Parts I&II – CPR 14E – Third edition 1997 – TNO
- Combustion et explosion d'un mélange de vapeurs d'hydrocarbures et d'oxygène de l'air – LOG/RI 09-2006 version 02 – TOTAL France – C. Mamès

¹ Le GTDLI est le groupe de travail sectoriel « dépôts de liquides inflammables », piloté par la DRIRE Ile-de-France, dont la 1ère réunion s'est tenue le 25 juin 2003. Ce groupe a vocation à être un lieu privilégié pour faciliter les échanges entre la Profession (UFIP, GESIP, USI, UNGDA), les experts (INERIS, TECHNIP), l'Inspection des Installations Classées (DRIRE Ile-de-France, DRIRE Nord-Pas-de-Calais, DRIRE Lorraine, DRIRE Languedoc-Roussillon, DRIRE Pays-de-la-Loire, DRIRE Rhône-Alpes, DRIRE Poitou-Charentes et STIIC) et les ministères concernés (Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables : DPPR, Ministère de l'Intérieur : DDSC).

3. PROBLÉMATIQUE

La caractérisation d'un phénomène d'explosion de vapeurs d'hydrocarbures ou de feu de nuage requiert la connaissance des éléments suivants :

1. Caractérisation du terme source
 - Initial :
 - i. Brèche sur équipement
 - ii. Substance, ou mélange de substances, libérée(s) à l'atmosphère
 - iii. Conditions opératoires (température, pression)
 - Secondaire :
 - i. Nappe liquide formée en rétention
2. Conditions de formation d'un nuage inflammable par mélange avec l'oxygène de l'air et induit par :
 - L'émission d'une phase liquide à la brèche avec génération éventuelle d'aérosol,
 - Puis la vaporisation de la nappe liquide formée,selon la caractérisation physico-chimique du produit et les conditions ambiantes.
3. Dispersion atmosphérique :
 - Conditions météorologiques
 - Détermination des contours physiques du nuage
 - Détermination du volume inflammable
4. Inflammation du nuage :
 - Propagation d'une flamme à travers les parties du nuage où la concentration se situe à l'intérieur du domaine d'inflammabilité
 - Accélération possible de la flamme sous l'effet de la turbulence (turbulence atmosphérique, turbulence du jet, turbulence engendré par le sillage des obstacles), des gradients de concentration et des instabilités naturelles de la flamme qui se développent à grande échelle.
 - Mélange et combustion des zones plus riches en combustible
5. Caractérisation des effets :
 - Rayonnement thermique induit par la combustion du nuage
 - Si la combustion est suffisamment rapide, production d'une onde de surpression aérienne.

4. THÉORIE

4.1. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE

Un UVCE comprend généralement les étapes suivantes :

- rejet dans l'atmosphère d'un liquide inflammable volatil avec ou sans aérosol,
- phase d'évaporation naturelle de la nappe liquide épandue,
- mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable,
- de manière concomitante, dilution et transport du nuage de vapeurs avec ou sans aérosol dont une partie du volume reste inflammable,
- en présence d'une source d'allumage, inflammation de ce nuage,
- propagation d'un front de flamme dans les parties inflammables du nuage. Ce front de flamme, associé à l'expansion des gaz brûlés, agit à la manière d'un piston sur le mélange combustible environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne,
- enfin, le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

Le vocabulaire distingue, selon les effets produits, l'**UVCE** du **Flash fire** ou **Feu de nuage**. De manière générale, le terme UVCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés, alors que le terme Flash fire est réservé aux situations où la combustion du nuage ne produit pas d'effets de pression. Cependant il s'agit dans les deux cas du même phénomène physique, à savoir la combustion d'un mélange inflammable.

4.2. ACCÉLÉRATION DES FLAMMES ET EFFETS DE PRESSION

Lors d'une explosion, plusieurs régimes de combustion des gaz sont susceptibles d'être observés successivement au cours du temps. La situation expérimentale suivante permet d'expliquer les mécanismes de production des effets de pression lors d'un UVCE. Il s'agit bien sûr d'un exemple, les configurations industrielles peuvent être beaucoup plus complexes, mais les mécanismes physiques mis en jeu sont les mêmes.

On considère un volume inflammable de forme hémisphérique, initialement au repos, dans lequel sont disposés des obstacles. Une source d'inflammation est placée au sol, au centre de l'hémisphère (image 1).

Juste après l'inflammation, le régime de combustion des gaz est généralement laminaire et un front de flamme se développe sphériquement autour du point d'allumage (image n°2). Ce front de flamme est lisse et caractérisé par une épaisseur relativement faible (de l'ordre de 0,1 mm) de sorte qu'il peut être assimilé à une interface réactive transformant le mélange inflammable en gaz brûlés. Ces derniers ont une densité moindre (d'un facteur 8 environ dans le cas des hydrocarbures) que le mélange initial, si bien qu'il s'ensuit une brusque expansion volumique capable de mettre en mouvement le mélange combustible, situé en aval devant les flammes. Ces dernières agissent comme un piston sur les gaz réactifs et provoquent leur écoulement (images n°3 et 4).

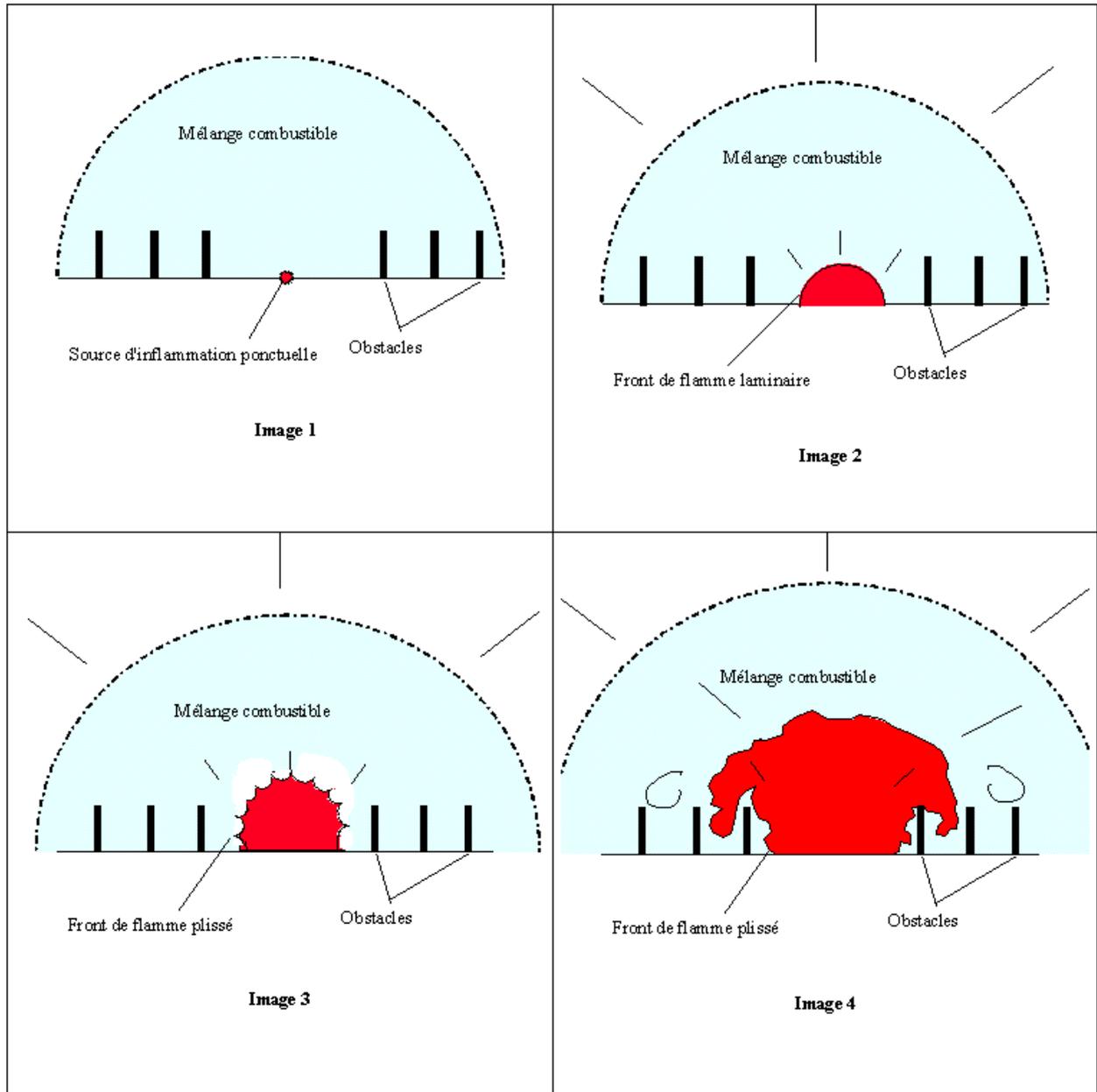
Tant que le régime de combustion est laminaire, la vitesse relative du front de flamme par rapport au mélange combustible, appelée vitesse fondamentale de combustion est de l'ordre de 0,5 m/s pour des mélanges vapeurs inflammables et air. La vitesse absolue (dans un repère fixe) du front de flamme correspond dans ce cas au rapport d'expansion des gaz multiplié par la vitesse fondamentale de combustion et est donc de l'ordre de quelques m/s.

Un front de flamme laminaire est très sensible aux perturbations de son environnement : variation de la vitesse des gaz, interaction avec des ondes de pression, variation locale

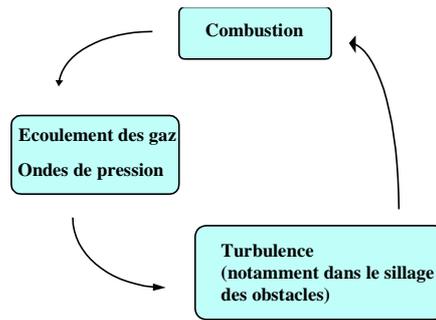
de la concentration du mélange... Rapidement, la flamme prend une structure plissée et instable (image 3), ce qui a pour effet d'accroître la surface de flamme, donc la consommation du mélange combustible, la production de gaz brûlés et la vitesse du front de flamme. Le frottement du fluide sur des parois ou son interaction avec des obstacles induit de la turbulence dans l'écoulement, ce qui accentue encore ce phénomène (image 4). En retour, cette accélération augmente la vitesse d'écoulement dans le mélange combustible et le niveau de turbulence de l'écoulement. Ainsi, par ce mécanisme auto-entretenu, la flamme s'accélère d'elle-même : il s'agit du régime de déflagration.

La présence d'un confinement partiel (mur, auvent, etc...) peut accentuer la montée en pression en bloquant l'expansion volumique des gaz dans une ou plusieurs directions.

Mécanismes d'accélération d'une flamme par les instabilités de flamme et la turbulence



Mécanisme d'accélération des flammes par la turbulence en régime de déflagration



La flamme ne peut toutefois s'accélérer indéfiniment. Lorsque le régime de déflagration devient suffisamment rapide, l'onde de choc qui se forme en avant du front de flamme peut comprimer le mélange combustible jusqu'à sa température d'auto-inflammation. Si tel est le cas, il peut se former derrière l'onde de pression une zone de combustion qui se propage à la même vitesse. La zone de combustion « entretient » l'onde en compensant son atténuation naturelle, tandis que l'onde « entretient » la flamme par auto-inflammation : il s'agit du régime de détonation. En pratique, la transition vers la détonation peut se produire dès lors que la vitesse de la flamme devient comparable à la vitesse du son dans les gaz brûlés, soit au moins 500 m/s. En régime de détonation stable, les vitesses de flamme sont de l'ordre de 2000 m/s. Dans le cas d'un UVCE de liquide inflammable, la détonation est exceptionnelle. Le régime d'explosion à retenir est celui de la déflagration.

5. DESCRIPTION DES CAUSES ET DES EFFETS

Les effets générés par un UVCE sont fortement dépendants des conditions locales dans lesquelles l'explosion a lieu :

1. Paramètres propres au mélange
 - Réactivité du mélange (vitesse fondamentale de combustion, taux d'expansion)
 - Gradient de concentration et homogénéité
 - Turbulence propre du rejet
2. Paramètres propres à l'environnement
 - Source d'inflammation (position par rapport au nuage, énergie)
 - Encombrement (nombre, position, taille des obstacles)
 - Confinement partiel

Nota : influence de l'énergie d'inflammation

Dans le parcours de la flamme au sein du nuage combustible, il est généralement admis que sa vitesse peut augmenter lorsque l'énergie d'inflammation croît.

Toutefois, en l'état des connaissances actuelles, il est difficile de dégager de manière prédictive des règles quantitatives précises quant à l'influence de l'énergie d'inflammation.

En revanche, qualitativement, il peut être retenu que le couplage entre la dynamique d'écoulement au sein du mélange et le régime de combustion s'amorce d'autant plus vite que la vitesse initiale des flammes est importante. Ainsi, lorsque l'énergie d'inflammation est augmentée :

- la vitesse de propagation des flammes peut être d'emblée importante,
- le mécanisme instable d'accélération des flammes est enclenché plus tôt,

ce qui peut conduire à des vitesses de propagation relativement élevées par rapport à ce qu'elles auraient été avec une énergie d'inflammation plus faible.

L'énergie d'inflammation peut provenir de :

- sources ponctuelles comme les décharges d'électricité statique, des surfaces chaudes,... Dans ce cas, l'énergie d'inflammation est un paramètre de second ordre pour caractériser l'environnement par rapport à l'encombrement et au confinement.
- une première explosion confinée ou « bang box », par exemple au sein d'un bâtiment rempli du mélange, qui libère soit une onde de choc susceptible de compresser le nuage à l'air libre jusqu'à sa température d'auto-inflammation soit un jet de gaz brûlés provoquant l'allumage.

5.1. DISPERSION

Pour obtenir un UVCE il faut deux conditions réalisées simultanément :

1. un mélange inflammable,
2. une source d'inflammation.

Toutes les émissions à l'atmosphère de liquides inflammables suffisamment volatils pour générer des vapeurs peuvent engendrer un UVCE.

La formation et la dispersion du nuage inflammable sont influencées par de nombreux phénomènes, qui ne sont pas toujours pris en compte dans les modèles :

- Le rejet d'un liquide sous pression produit, sous l'effet de la vitesse du fluide à la brèche et des frottements dans l'air, une fragmentation mécanique du jet en fines gouttelettes qui tombent généralement au sol où elles contribuent à la formation d'une flaque qui s'évapore. La fragmentation est d'autant plus grande, et les gouttelettes d'autant plus fines, que la pression du rejet est élevée. Dans ce cas, une partie du liquide formant ces gouttes s'évapore avant de toucher le sol, et les gouttelettes restent en suspension plus longtemps : il y a *formation d'un aérosol*.
- L'*évaporation* par épandage dépend principalement de la tension de vapeur de l'hydrocarbure à sa température de rejet. C'est cette propriété physique qui gouverne en effet le débit d'évaporation par tirage dû au vent qui est le mode d'action prépondérant. L'évaporation par apport énergétique (rayonnement solaire, sol) est moindre car :
 - le rayonnement est faible lors des conditions météo pénalisantes (stabilité F)
 - le sol est généralement à une température voisine de celle de l'hydrocarbure.

5.2. EFFETS THERMIQUES

L'expérience montre qu'en pratique, les effets thermiques de l'UVCE ne sont pas dus au rayonnement thermique (très court) du nuage enflammé, mais uniquement au passage du front de flamme. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours de la flamme est susceptible de subir l'effet létal, mais celui-ci n'excède pas la limite extrême atteinte par le front de flamme. Ainsi, l'effet thermique de l'UVCE ou du Flash Fire (rappelons qu'il s'agit du même phénomène physique) sur l'homme est dimensionné à partir de la distance à la Limite Inférieure d'Inflammabilité, LII.

De manière générale, l'effet thermique d'un UVCE sur les structures se limite à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures,...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, l'UVCE peut être initiateur d'un incendie.

Le phénomène de « feu torche » n'est pas pertinent dans le cas des dépôts de liquides inflammables du fait des faibles pressions de rejet.

5.3. EFFETS DE SURPRESSION

Ces effets sont produits par l'effet piston du front de flamme sur le mélange combustible. Plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude de l'onde de pression est importante. Celle-ci se propage dans l'environnement à la façon d'une onde acoustique dont l'amplitude s'atténue lorsque l'on s'éloigne du centre de l'explosion, de manière inversement proportionnelle à la distance.

En l'absence d'obstacles, on observe expérimentalement que la propagation de la flamme dans un mélange homogène et au repos est très faiblement accélérée, et que les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars. En revanche, la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés.

En présence d'obstacles, leur contournement géométrique et la turbulence induite dans leur sillage sont les principaux mécanismes d'accélération de flamme.

6. EVALUATION DES EFFETS

Il est important de rappeler que les méthodes de calculs présentées permettent d'obtenir des valeurs qui ne sont qu'un ordre de grandeur (cf. circulaire du 28 décembre 2006 page 3).

Le calcul d'un scénario d'explosion d'un nuage est réalisé en plusieurs temps :

- détermination du terme source,
- calcul de dispersion du nuage inflammable,
- calcul d'explosion.

6.1. CARACTÉRISATION DU TERME SOURCE

6.1.1. Paramètres à définir

- Caractéristiques de la capacité / du dispositif étudié :
 - Pression
 - Température
 - Diamètre / longueur

- Caractéristiques de la brèche retenue :
 - Diamètre de la brèche
 - Pertes de charge
 - Hauteur d'émission
 - Direction de l'émission : horizontale, verticale, impactant un obstacle ou non
 - Hauteur de liquide par rapport à la brèche
 - Inventaire(s) raccordé(s) à la capacité / au dispositif fuyard

- Caractéristiques des dispositifs de récupération ou confinement :
 - Surface de rétention

- Durée de fuite :
 - Elle est définie par l'analyse de risques
 - Elle est différente de la durée de l'évaporation naturelle de la nappe liquide

6.1.2. Substances étudiées dans le présent document

La volatilité des substances peut se mesurer par leur pression de vapeur² :

- essences : < 100 kPa à 35°C
- éthanol : 5,85 kPa à 20°C
- méthanol : 12,3 kPa à 20°C
- gazoles, fioul domestique : 1 kPa à 40°C
- carburant aviation (Jet A-1) : < 0,8 kPa à 20°C
- brut : de faible à élevée selon l'origine du brut
- naphta : < 90 kPa à 37,8°C

6.1.3. Configurations accidentelles

Trois cas distincts de fuite sont susceptibles d'engendrer un UVCE :

1. Les évaporations naturelles consécutives à un épandage de liquide au sol
2. Le débordement de capacité avec émission de liquide en hauteur
3. Les fuites sur des organes sous pression.

Pour les cas **d'évaporation naturelle**, en raison de leur faible pression de vapeur, l'éthanol, les gazoles, le fioul domestique ainsi que le Jet A-1 sont des liquides dont le taux d'évaporation est insuffisant pour former des nuages inflammables de volume important susceptible d'engendrer des explosions aux effets significatifs.

Le tableau suivant propose des caractéristiques des **essences** conformes aux spécifications françaises, à la date du document, au sortir de six raffineries françaises ; leur variabilité dépend de la qualité du pétrole brut de base, du procédé de raffinage et de la saison.

Composition massique % _{mass}		
	Essence hiver	Essence été
C ₄₋	6%	1%
C ₅	26%	26%
C ₆	8%	13%
C ₇	22%	22%
C ₈	25%	25%
C ₉	10%	10%
C ₁₀	2%	2%
C ₁₁₊	1%	1%
Domaine d'explosivité % _{vol}		
LII	1%	1%
LSI	8%	8%

Pour les cas de **débordements de capacité** ainsi que pour les cas de **fuites sous pression**, il reviendra à l'exploitant d'étudier dans l'analyse de risques de ses installations leur propension à l'UVCE en fonction des substances et des paramètres opératoires.

² La pression de vapeur est issue de la source Fiche de Données de Sécurité de chaque substance.

6.1.4. Hypothèses de calcul

Le calcul de la formation et de la dispersion d'un nuage inflammable fait intervenir un grand nombre d'hypothèses liées à la définition du scénario, dont certaines sont liées aux caractéristiques de la fuite et d'autres à l'environnement du rejet. Le choix des hypothèses faites doit être justifié explicitement par l'analyse des risques.

De manière générale, dans les cas de la rupture d'une tuyauterie, l'hypothèse majorante consiste à considérer les deux rejets dans le même sens et à additionner les débits. Cette hypothèse conservatrice est sans doute peu représentative de la réalité dans la plupart des cas, mais on ne dispose pas aujourd'hui de modèle conservatif plus précis décrivant la forme d'un nuage alimenté par deux fuites de sens opposés. Deux cas peuvent se présenter :

- les deux contributions sont alimentées (par exemple, lors de la rupture d'un bras de chargement en cours de dépotage si aucune barrière de sécurité n'est prise en compte : l'amont est alimenté par la vidange du camion, l'aval est alimenté par la vidange du réservoir) ;
- une seule contribution est alimentée, l'autre correspondant à la vidange d'un tronçon de canalisation. Dans ce cas, la durée de fuite des deux contributions peut être très différente.

Autant que possible (données disponibles, possibilités des outils de modélisation), on prendra en compte les pertes de charge générées par les différents équipements présents le long des canalisations (coudes, vannes, clapets internes, clapets de rupture...)

L'analyse des risques spécifiques à chaque installation est la méthodologie à employer pour définir les caractéristiques d'une fuite à examiner (localisation, nature du produit libéré, température, pression, dimension).

Les références suivantes indiquent, à titre informatif, les fuites aériennes susceptibles d'être représentatives des installations d'un dépôt de liquides inflammables.

Livraison par canalisation

- Fuite sous pression sur canalisation ou accessoires entraînant la formation d'aérosols et un épandage liquide avec évaporation de nappe.

Poste de déchargement de wagon-citerne

- Fuite sur wagon-citerne qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.
- Fuite sur dispositif de déchargement qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.
- Fuite sur collecteur ou accessoires qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.

Poste de déchargement de camion-citerne

- Fuite sur camion-citerne qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.
- Fuite sur dispositif de déchargement qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.
- Fuite sur canalisation ou accessoires qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.

Stockages, accessoires et canalisations raccordées

- Fuite sur capacité ou fuite sur canalisation qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.
- Fuite par débordement de capacité qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe et qui peut générer un aérosol et des vapeurs associées.

Pompe

- Fuite sur rupture de garniture ou du corps de pompe qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.
- Fuite sous pression sur rupture de garniture ou du corps de pompe qui génère des aérosols et vapeurs associées et un épandage liquide avec évaporation de nappe.

Poste de chargement de camions et wagons-citernes

- Chargement source
 - Fuite sous pression par soupape de citerne mobile qui génère des aérosols.
 - Fuite en phase vapeur sur canalisation de récupération vapeurs

- Chargement dôme
 - Fuite par trou d'homme ouvert de citerne mobile qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.

- Chargement source et dôme
 - Fuite sur dispositif de chargement qui génère un épandage liquide avec évaporation de nappe.

6.2. DISPERSION DU NUAGE

Pour le calcul de dispersion, les modèles connus par le GT DLI sont :

- des formules empiriques explicitées dans le Guide méthodologique UFIP – version Mai 2001,
- des logiciels de dispersion atmosphérique, par exemple PHAST (développé par DNV et utilisé par INERIS, TECHNIP,...), FRED (développé par SHELL), SIGMA (développé par IRSN),... valables en terrain plat qui ne tiennent pas compte d'obstacles comme les murs de rétention, des bâtiments,...
- des logiciels tridimensionnels de dispersion atmosphérique, par exemple FLACS,... qui tiennent compte des caractéristiques topographiques et des obstacles ; ils sont d'un emploi lourd et relativement coûteux ce qui justifie que leur utilisation soit réservée à des cas particuliers ou à des expertises.

Rappel : il appartient à l'exploitant de préciser et de justifier le choix du modèle retenu pour le calcul de dispersion du nuage.

3 types de fuites sont à considérer :

1. une fuite qui génère uniquement des vapeurs par évaporation naturelle due à l'épandage,
2. une libération de liquide en hauteur par débordement qui génère des vapeurs par évaporation due à l'épandage et qui peut aussi être la source de formation d'aérosol et de vapeurs associées,
3. une fuite sous pression qui génère la formation d'aérosol et de vapeurs associées et des vapeurs par évaporation due à l'épandage.

Dans la suite du présent document, l'évaporation naturelle d'une nappe d'essence fait l'objet d'un abaque obtenu avec le logiciel Phast qui permet d'appréhender l'extension de la limite inférieure d'inflammabilité (paragraphe 6.2.3.) et d'un exemple de calcul des effets d'un UVCE (chapitre 10).

6.2.1. Paramètres à définir

Le calcul de la dispersion du nuage fait intervenir des paramètres liés :

1. aux conditions extérieures, comme l'état atmosphérique
2. à l'environnement du rejet.

Les **conditions météorologiques** sont généralement définies par trois paramètres :

- la stabilité atmosphérique,
- la vitesse du vent,
- la température ambiante.

La stabilité atmosphérique est souvent décrite à l'aide des classes de stabilité de Pasquill. On distingue 6 classes allant des atmosphères très instables (A, B), aux atmosphères très stables (E, F), en passant par des atmosphères neutres (C, D). Il existe cependant d'autres systèmes de classification comme celle de Doury qui ne définit que deux classes : les classes de diffusion normale (DN) qui regroupent les classes A à D de Pasquill et les classes de diffusion faible (DF) qui regroupent les classes E et F de Pasquill.

De plus certaines conditions de stabilité ne sont pas compatibles avec certaines vitesses de vent. Le tableau qui suit donne un exemple de la compatibilité des classes de stabilité de Pasquill avec certaines conditions météorologiques.

Vitesse du vent à 10 m	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident			Nébulosité	
[m/s]	Fort	Modéré	Faible	entre 4/8 et 7/8	<3/8
<2	A	A-B	B	F	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Il convient donc de se baser a minima sur les conditions météorologiques D 5 et F 3 et si nécessaire sur les éventuelles autres conditions pouvant se présenter sur le site. Celles-ci peuvent être plus stables que les précédentes (ex : situations de nuit, de brouillard, ...).

En revanche, dans ce dernier cas, il n'est pas pertinent de considérer des conditions plus stables que F 1,5 dans la mesure où il s'agit de la limite d'utilisation des modèles numériques.

En conclusion, les conditions de vent et de stabilité dépendant de la température, il peut, suivant les cas de figures rencontrés, être utilisé les conditions résumées dans le tableau suivant :

D - 5 - 20	F - 3 - 10	F - 1,5 - 10
Atmosphère neutre Vitesse du vent, à une altitude de 10 mètres, égale à 5 m/s Température ambiante égale à 20°C	Atmosphère très stable Vitesse du vent, à une altitude de 10 mètres, égale à 3 m/s Température ambiante égale à 10°C	Atmosphère très stable Vitesse du vent, à une altitude de 10 mètres, égale à 1,5 m/s Température ambiante égale à 10°C

Environnement du rejet : Les obstacles et les accidents topographiques perturbent la trajectoire du vent et modifient les caractéristiques moyennes et turbulentes de l'écoulement de l'air. Ces modifications sont, naturellement, fonction de la taille et de la forme des obstacles topographiques rencontrés par le vent. Les logiciels utilisant des modèles intégraux ne permettent pas de prendre en compte le relief, ni la présence d'obstacles à la dispersion des nuages (bâtiments), et supposent une direction et un profil de vent constants dans le temps. Lorsque les irrégularités au sol sont de faible taille par rapport à celle du nuage, les perturbations qu'elles engendrent affectent de façon globale la dispersion du nuage. L'hypothèse d'un terrain idéalement plat et de rugosité uniforme est généralement bien adaptée à cette problématique.

La rugosité peut être interprétée comme un coefficient de frottement du nuage sur le sol, et produit deux types d'effets antagonistes :

- elle augmente la turbulence, ce qui favorise la dilution,
- elle freine le nuage, ce qui favorise l'effet d'accumulation et la concentration.

La rugosité a une influence non négligeable sur la dispersion des nuages de liquides inflammables volatils, car ceux-ci ont un comportement « rampant » au sol, du fait de leur densité plus élevée que celle de l'air.

Un environnement de type champs est défavorable à la dilution du nuage alors qu'un environnement industriel plus encombré est plus favorable.

6.2.2. Résultats

Le calcul de dispersion permet d'obtenir trois types de résultats :

1. la distance maximale atteinte par le nuage inflammable à sa limite inférieure d'inflammabilité, ou distance à la LII,
2. la masse de vapeurs inflammables contenue dans le nuage (ou masse inflammable) : en théorie, il s'agit de la masse de vapeurs dont la concentration est comprise entre la LII et la Limite Supérieure d'Inflammabilité, LSI. En pratique, l'expérience montre que les parties du nuage initialement trop riches en combustible se diluent pendant l'expansion volumétrique du nuage et brûlent également. Il est donc préférable d'évaluer la quantité inflammable à partir de la masse de concentration supérieure à la LII.
3. la forme du nuage, en particulier sa largeur et sa hauteur. A titre d'exemple, le nuage généré dans le cas d'une évaporation naturelle est de faible hauteur (< 2 m).

La distance à la LII représente le rayon maximal, compté à partir du point de fuite, qui peut être atteint par le nuage inflammable. Cela ne signifie pas pour autant que le nuage inflammable recouvre la surface du cercle délimité par la distance à la LII, mais qu'il prend la forme d'un panache inflammable dont la longueur est au maximum égale à la distance à la LII.

Il revient à l'exploitant d'exposer dans l'analyse des risques de ses installations le modèle, les paramètres retenus ainsi que les résultats de la dispersion atmosphérique.

6.2.3. Abaque obtenu avec le logiciel Phast pour l'évaluation de l'extension de la LII dans le cas d'une évaporation naturelle d'un épandage consécutif à une fuite liquide d'essence

Les hypothèses pour la constitution de cet abaque sont les suivantes :

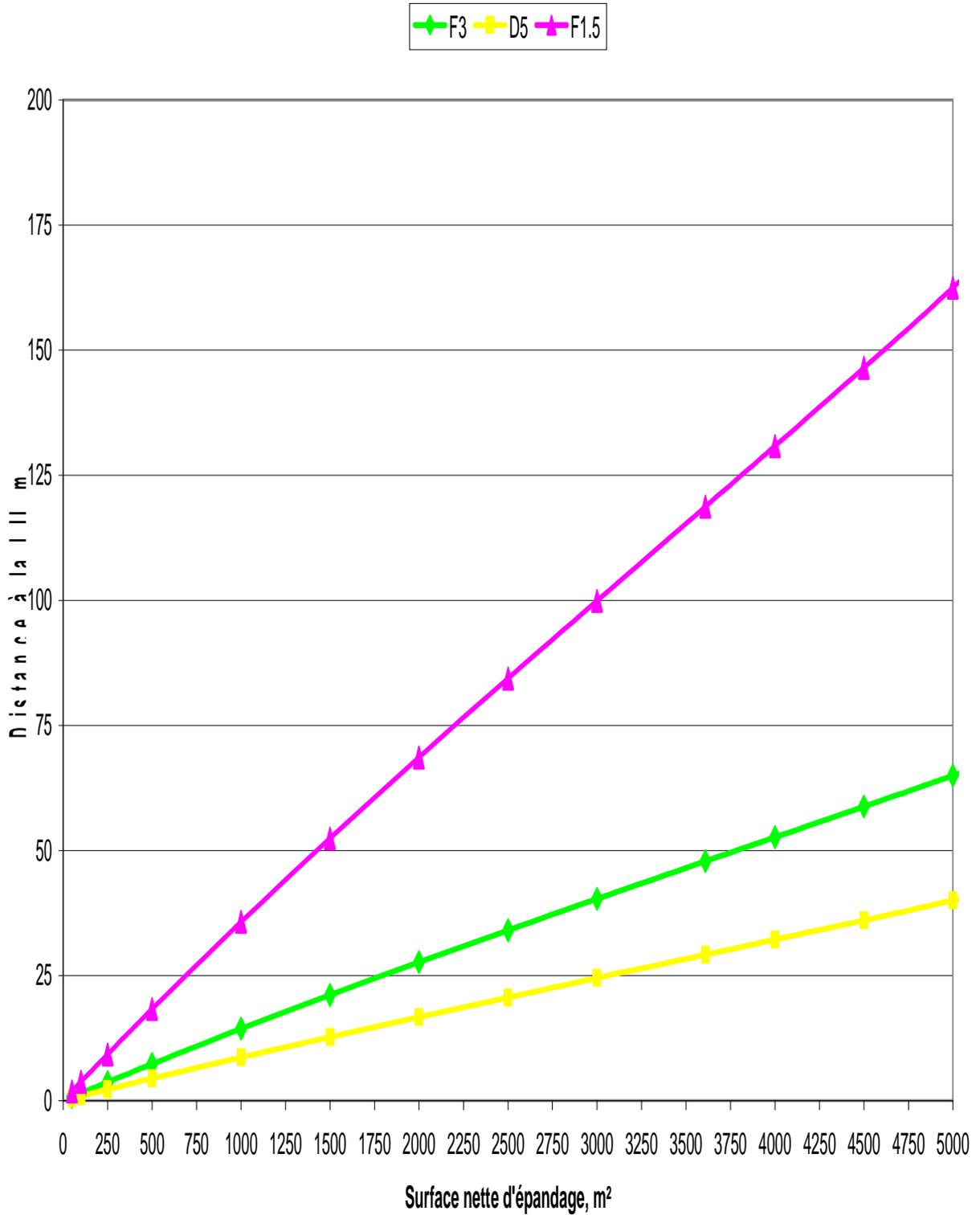
- Logiciel : PHAST 6.5
- Terme source : brèche en pied de réservoir d'une surface de l'ordre de la section de la plus grosse tuyauterie raccordée (250 mm), réservoir initialement rempli de liquide ; seule la pression statique due à la hauteur décroissante de liquide s'applique pour alimenter la nappe liquide
- Epandage **d'essence** de la composition de référence (composition hiver définie au § 6.1.3) dans une cuvette de rétention d'une surface nette (hors bacs) donnée
- Evaporation naturelle de la nappe liquide puis dispersion atmosphérique aux conditions météorologiques pouvant se présenter sur le site

Convention retenue par le GTDLI :

La distance à la LII obtenue par PHAST est directement reportée à partir du bord de la cuvette de rétention.

Cas de l'essence

**Extension de la LII par rapport au bord de la nappe liquide
dans le cas d'une évaporation naturelle**



6.3. EXPLOSION DU NUAGE

Il existe plusieurs méthodes de calculs des surpressions aériennes, les plus largement répandues sont énumérées ci-après :

- équivalent TNT,
- modélisation analytique des déflagrations sphériques à vitesse de flamme constante ou variable,
- méthode TNO Multi-energy,
- méthode de Strehlow-Baker, du nom de ses principaux auteurs,
- méthode dite CAM pour « Congestion Assessment Method », proposée par Shell,
- modèles tridimensionnels, par exemple FLACS,...(ils sont d'un emploi lourd et relativement coûteux ce qui justifie que leur utilisation soit réservée à des cas particuliers ou à des expertises).

Parmi ces méthodes et les travaux compilés dans le Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – Juillet 1999 – INERIS DRA - YMo/YMo - 1999 – 20433, il convient de noter que :

- *Dans le cas de la méthode Multi-Energy, les derniers résultats obtenus au cours des projets GAME et GAMES laissent entrevoir des possibilités intéressantes pour déterminer la surpression maximale en champ proche.*
- *La détermination des surpressions aériennes en champ lointain doit être effectuée préférentiellement au moyen des modèles qui donnent l'atténuation des ondes de pression lancées par une explosion de gaz. A cet égard, les abaques fournis avec la méthode Multi-Energy apparaissent comme relativement adaptés à l'usage des analystes de risques.*

L'application de la méthode Multi-énergie ou d'une méthode équivalente (CAM, Baker Strehlow) qui prend en compte les zones en champ libre et les zones encombrées est recommandée.

Par la suite, c'est la méthode Multi-energy qui est présentée.

Les principales étapes de cette méthode sont les suivantes :

1. Calcul du profil du nuage inflammable
2. Assimilation du nuage à un hémisphère posé au sol, point d'inflammation localisé au centre, à la concentration stoechiométrique
3. Choix d'un niveau de sévérité en fonction du degré d'encombrement et de confinement de la zone d'extension du nuage ; la réactivité des vapeurs inflammables, ainsi que la turbulence propre du jet, doivent être prises en compte dans le choix de l'indice de sévérité d'explosion.

6.3.1. Effet thermique

L'expérience montre que l'effet du rayonnement thermique est assez limité, et que l'effet létal est dimensionné par la distance à la LII. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours des gaz brûlés est susceptible de subir un effet létal avec une probabilité élevée, et toute personne se trouvant en dehors du nuage inflammable ne peut pas subir d'effet thermique létal.

Dans le cas de l'explosion d'un nuage de gaz au repos en espace libre ou flash fire les seuils d'effets thermiques considérés sont :

- distance au seuil des effets létaux significatifs = distance à la LII
- distance au seuil des effets létaux = distance à la LII
- distance à l'effet irréversible = 1,1 x distance à la LII (formule forfaitaire).

Toutefois, lorsque un nuage inflammable sort d'un site, il est nécessaire d'étudier l'environnement voisin pour identifier la présence de sources d'inflammation éventuelles. En particulier, si dans certaines directions il est démontré que la possibilité que le nuage rencontre une source d'inflammation avant d'atteindre la distance maximale à la LII est très forte, la distance aux effets thermiques dans cette direction peut être réduite à la distance entre le point de fuite et le point d'inflammation.

On ne dispose pas de seuils d'effets thermiques sur les structures associés aux phénomènes rayonnants de courte durée. De manière générale, on peut considérer qu'il y a un risque de propagation d'un incendie aux matériaux combustibles. Dans le cas des matériaux incombustibles (cas de la plupart des structures et équipements industriels), le risque serait limité à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères.

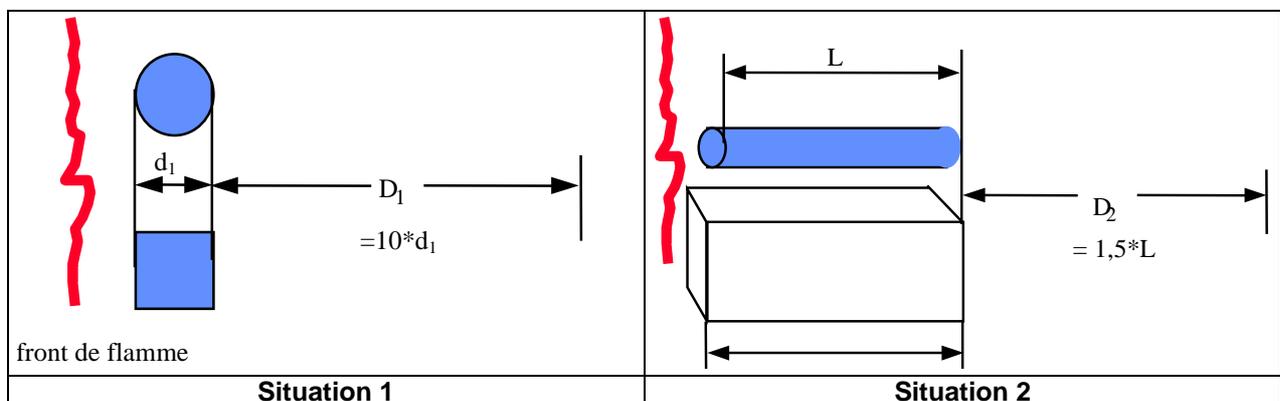
6.3.2. Effet de pression

6.3.2.1. Détermination des zones encombrées indépendantes

Le concept de la méthode Multi-energy consiste à considérer que, du fait des hétérogénéités du nuage inflammable (concentrations, turbulences), la combustion du nuage se traduit par la succession de plusieurs explosions élémentaires, potentiellement violentes, dans les zones de turbulence et réactivité élevées, dont les effets ne se cumulent pas. En pratique, cela revient à identifier les zones encombrées élémentaires, génératrices de turbulence, présentes dans le nuage.

Afin de déterminer le nombre d'explosions élémentaires, Multi-energy TNO propose les critères suivants :

- Deux obstacles appartiennent à la même zone si la distance qui les sépare est inférieure à :



- Deux zones séparées par plus de 25 m sont indépendantes.

Pour un dépôt de liquides inflammables, à titre indicatif, les zones encombrées indépendantes sont généralement :

- des postes de chargement et déchargement,
- des pomperies,
- des rétentions de réservoirs,
- des rétentions de réservoirs et des pomperies si elles sont mitoyennes,
- des zones de stationnement de véhicules.

Le volume encombré est calculé en retranchant le volume des obstacles.

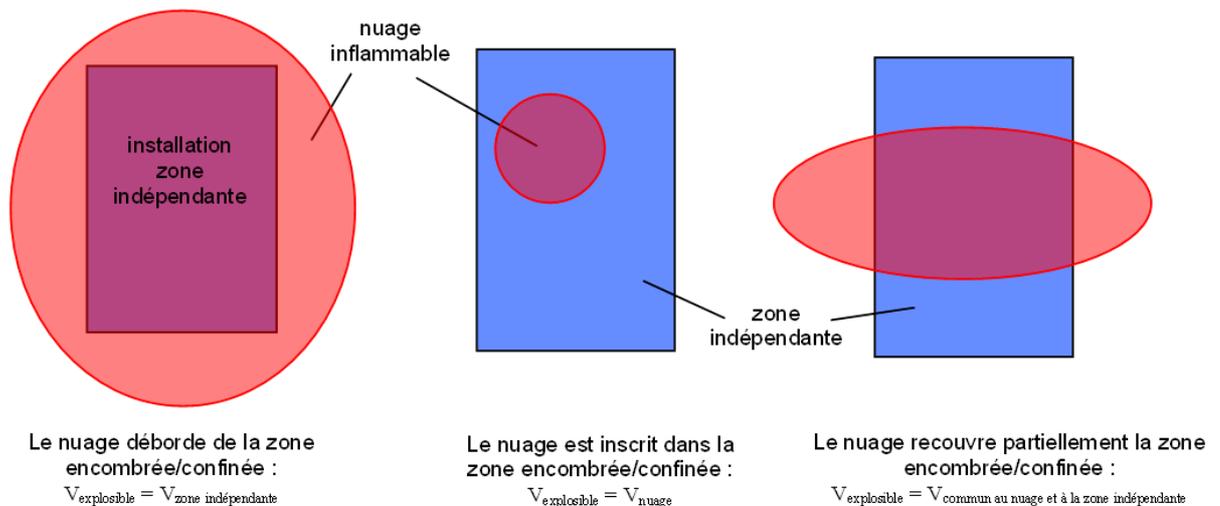
Il est néanmoins nécessaire dans chaque cas particulier d'examiner le positionnement relatif de ces zones pour valider leur caractère d'indépendance.

6.3.2.2. Détermination du volume explosible

Une fois les zones encombrées indépendantes connues, il s'agit de caractériser individuellement chaque explosion.

Le volume inflammable, calculé lors de la dispersion, doit être superposé au volume de la zone encombrée indépendante.

Plusieurs cas se présentent :



L'exercice de superposition doit également être réalisé en élévation. Les obstacles sont alors examinés uniquement au droit du nuage.

6.3.2.3. Détermination de l'énergie de l'explosion

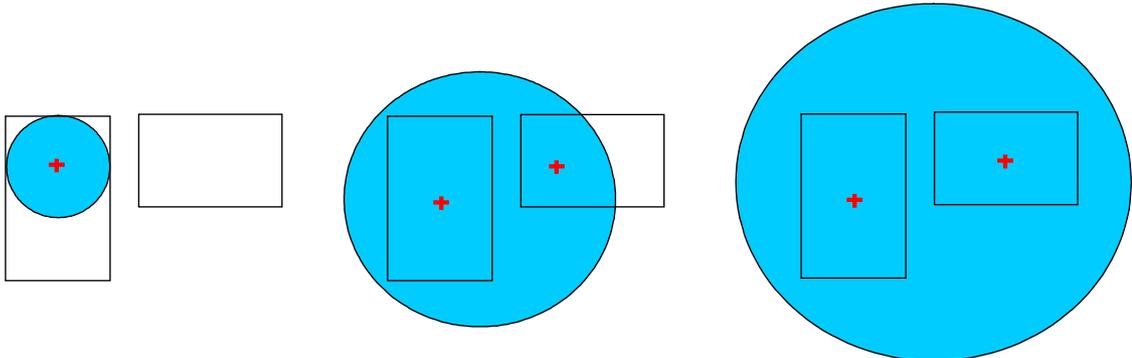
Une fois déterminé le volume explosible à considérer dans chaque zone encombrée, l'énergie de chacune des explosions élémentaire est aisément calculée en multipliant le volume explosible par la chaleur de combustion du produit gaz considéré, par exemple $3,5 \text{ MJ/m}^3$ pour les hydrocarbures à la stoechiométrie.

6.3.2.4. Identification du centre de l'explosion

L'identification du centre de l'explosion est une étape primordiale, car c'est à partir de ce point que sont comptées les distances d'effet.

Explosions dans des zones encombrées :

Trois cas théoriques se présentent, appliqués à l'exemple suivant de deux cuvettes de rétention suffisamment éloignées pour être indépendantes :



Cas 1 : le nuage est contenu dans la zone encombrée :
Centre d'explosion = centre du nuage

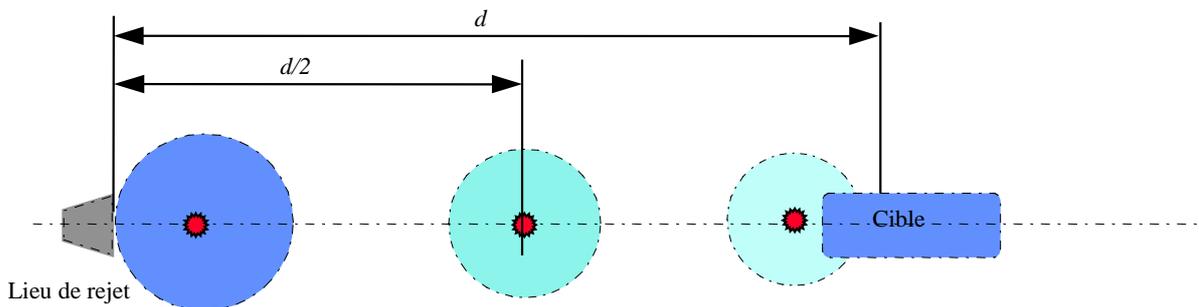
Cas 2 : le nuage couvre partiellement plusieurs zones indépendantes encombrées :
Centres d'explosion = centre de chaque zone encombrée

Cas 3 : le nuage couvre totalement plusieurs zones indépendantes encombrées :
Centres d'explosion = centre de chaque zone encombrée

Dans le cas d'une explosion en champ libre, la totalité de la masse inflammable doit être considérée, et les deux situations suivantes peuvent se présenter.

Cas des nuages dérivants en champ libre :

Lors d'un rejet massif de produit pendant une durée très courte (ruine de réservoir, ou jet transitoire sous pression), il se forme un nuage dérivant, dont le volume inflammable diminue au fur et à mesure du déplacement du nuage. On suppose que le nuage dérive en champ libre c'est à dire qu'il ne rencontre pas d'obstacle à sa dispersion, ni de zone encombrée qui favoriserait une explosion violente.



Situation 1	Situation 2	Situation 3
Inflammation à proximité immédiate du rejet	Inflammation au cours de la dérive du nuage	Inflammation à la distance à la LII
Volume inflammable maximum	Volume inflammable intermédiaire	Volume inflammable minimum
Explosion loin de la cible	Explosion à mi-distance entre la source et la cible	Explosion proche de la cible

Les trois situations méritent d'être étudiées, sans qu'il soit possible de déterminer a priori la plus pénalisante. Dans la situation 1, le volume inflammable est important et la surpression maximale élevée, mais l'explosion se produit loin de la cible, si bien que l'effet de pression sur cette cible peut être de faible ampleur. A l'opposé, dans la situation 3, le volume inflammable a beaucoup diminué, la surpression maximale est faible car le nuage est peu turbulent, mais l'explosion se produit au niveau de la cible. Tout dépend, dans ces cas, de l'éloignement de la cible et du seuil d'effet étudié.

6.3.2.5. Choix de l'indice de sévérité

L'indice de sévérité correspond à la vitesse de propagation de la flamme dans le nuage, à laquelle est directement liée le niveau de surpression maximal produit par l'explosion. A chaque valeur de cet indice est associée une courbe de décroissance des surpressions aériennes en fonction de la distance. Multi-Energy propose les indices de 1 à 10 représentatifs du voisinage de l'émission auxquels sont associés les niveaux de surpression suivants :

Indice Multi-Energy	Seuil de surpression associé (bar)	Abaques de décroissance en fonction de la distance adimensionnée par l'énergie de l'explosion
1	0,01	<p>Abaque relatif à la méthode Multi-Energie donnant les surpressions engendrées par des déflagrations à vitesse de flamme constante de volumes explosibles hémisphériques posés au sol</p>
2	0,02	
3	0,05	
4	0,1	
5	0,2	
6	0,5	
7	1	
8	2	
9	5	
10	10	

En abscisse, la distance R est adimensionnée par l'énergie de l'explosion et la pression atmosphérique P_{at} . En ordonnée, la surpression ΔP est adimensionnée par la pression atmosphérique P_{at} .

Les courbes d'indice supérieur ou égal à 6 sont confondues pour les niveaux de surpression inférieurs à 0,2 bar.

A noter qu'à un niveau de surpression doit être associée une durée de propagation de l'onde afin de pouvoir déterminer le comportement mécanique d'une structure ou le niveau d'atteinte physiologique d'un individu.

Suivant la méthode TNO Multi-Energy et à titre indicatif, le GT DLI retient les indices de sévérité représentatifs suivants pour l'inflammation à l'air libre d'un nuage combustible :

Zone indépendante siège d'explosion	Indice de sévérité et pic de pression correspondant
Zone dépourvue d'obstacle et d'installation avec un nuage homogène	Jusqu'à 3 (50 mbar)
Intérieur des cuvettes	4 (surpression = 100 mbar) à 5 (200 mbar) pour une cuvette encombrée
Pomperie	4 à 5 (200 mbar)
Poste de chargement / déchargement	4 à 6 (500 mbar) selon l'encombrement lié aux équipements en place (bras, tuyauteries,...) et nombre de citernes (wagons et camions-citernes) pouvant être présents côte à côte aux postes
Zone de stationnement des véhicules	4 à 6 (500 mbar) selon configuration (supérieur à 5 au-dessus de 5 camions-citernes côte à côte)
Intérieur bâtiment de conception légère (ex : bardage...)	4 à 6 (500 mbar) pour un bâtiment de conception légère Selon aménagement intérieur
Intérieur autre bâtiment	La méthode TNO Multi-Energy est inadaptée Un modèle spécifique peut être requis

Nota : La méthode TNO Multi-Energy suppose un nuage homogène. Dans le cas d'un nuage de grande dimension, par exemple une extension de la LII de l'ordre de 150 m par rapport à la fuite, la présence d'obstacles perturbe le champ de concentration. L'application de la méthode TNO Multi-Energy doit alors être considérée comme une approche prédictive qui indique des ordres de grandeur des distances d'effets susceptibles d'être observés.

Dans le cas d'une explosion de vapeurs d'une substance, qu'elle quelle soit, à la concentration stoechiométrique, les abaques validés par le GT DLI des chapitres 7, 8, 9 et 10 permettent de déterminer le champ de propagation des surpressions dans l'environnement selon la méthode TNO Multi-Energy.

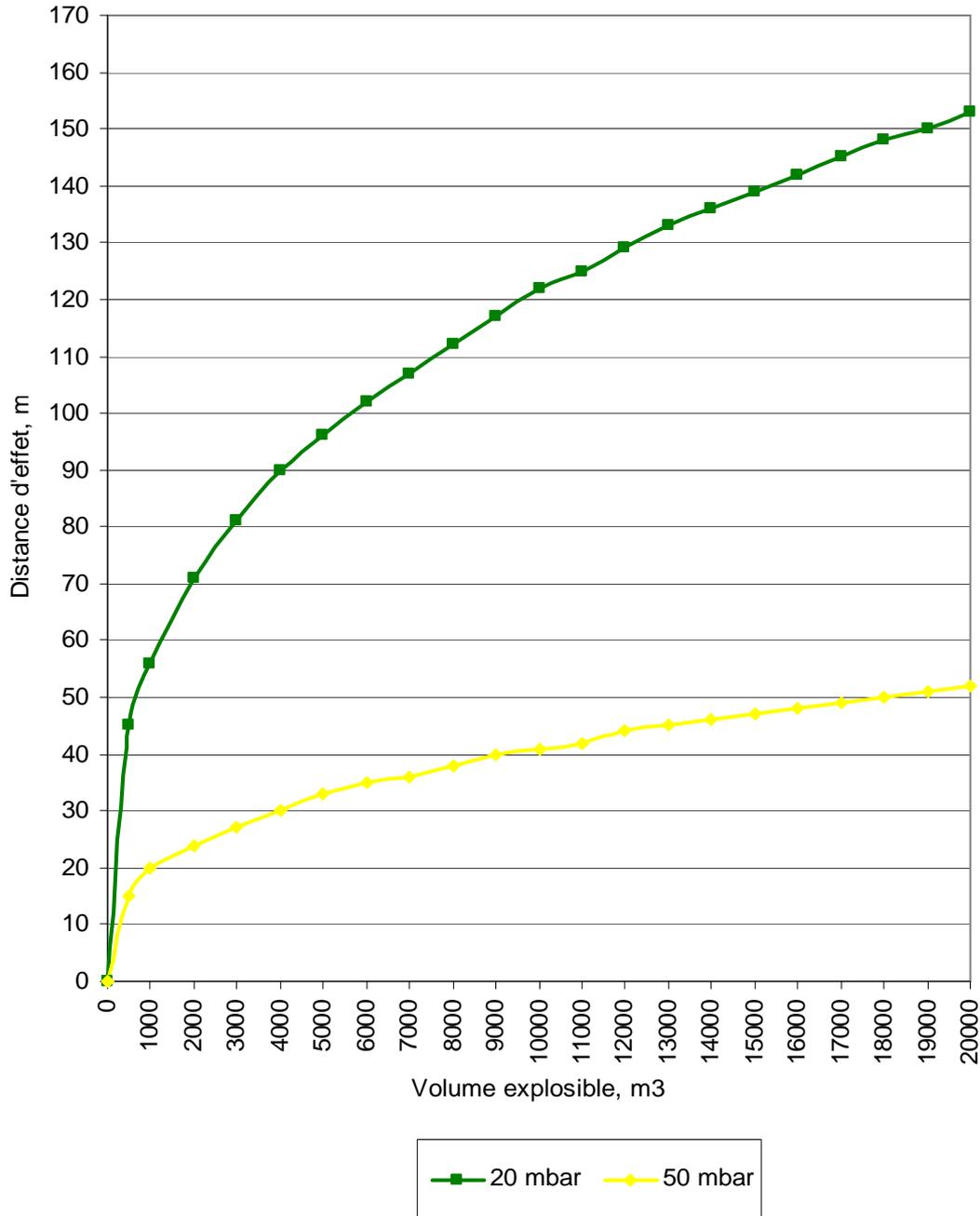
En particulier il convient de déterminer l'explosion en champ libre pour les zones non encombrées situées dans la LIE comme le prévoit le tableau ci-dessus précisant les indices de sévérité : jusqu'à l'indice 3 pour une zone sans obstacles.

A noter que compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, il peut être adopté pour la surpression de 20 mbar une distance d'effets égale à deux fois la distance d'effets obtenue pour une surpression de 50 mbar comptée à partir du point d'inflammation, conformément à l'arrêté du 29 septembre 2005. **Attention, cette règle n'est applicable que pour les indices de violence d'explosion supérieurs ou égaux à 4.**

6.3.3. Abaques

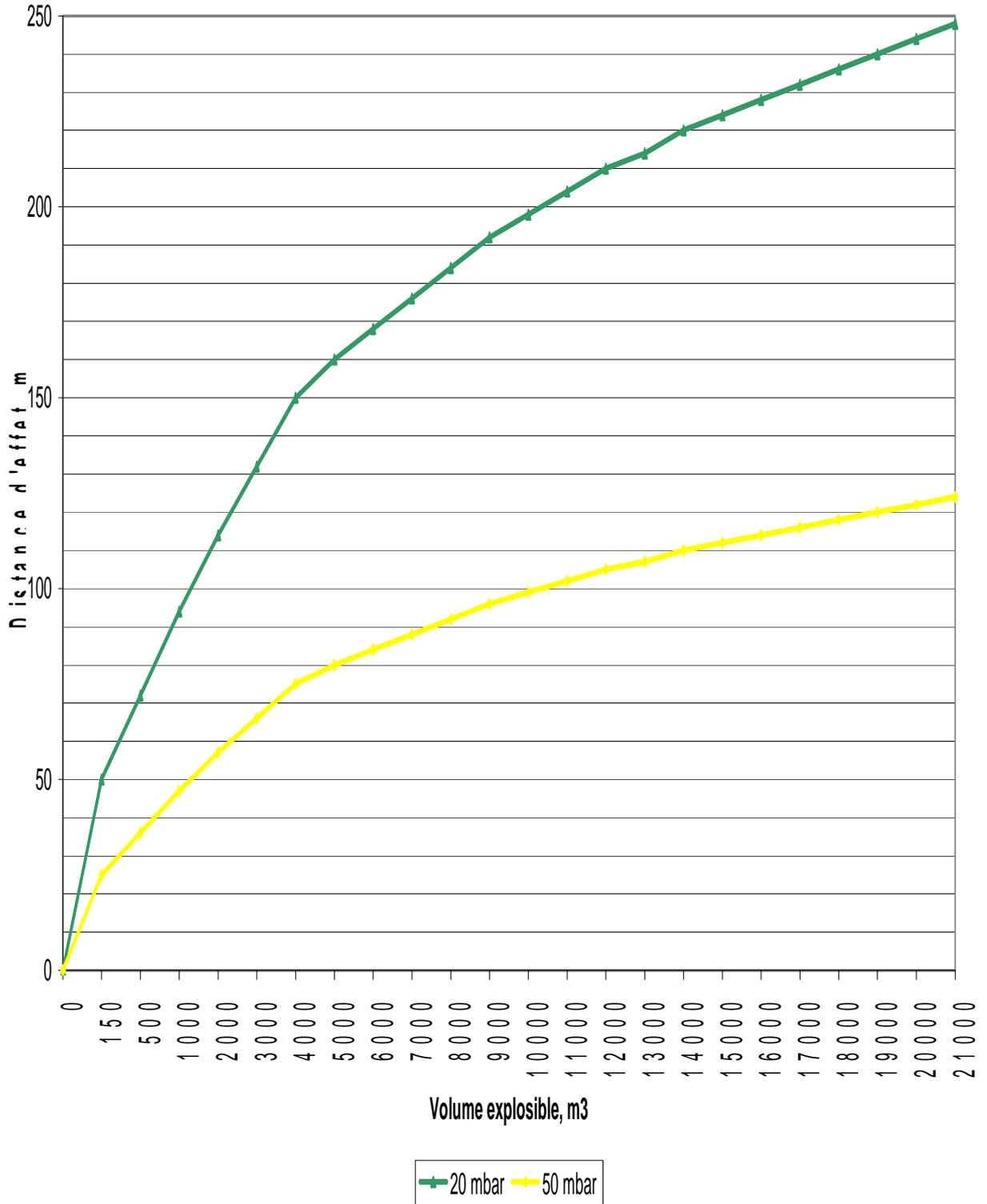
6.3.3.1. Abaque pour l'évaluation des distances d'effet à 50 et 20 mbar pour un indice de sévérité 3 à la concentration stoechiométrique

Distance d'effets par rapport au centre du nuage explosible pour un indice de sévérité 3 à la concentration stoechiométrique



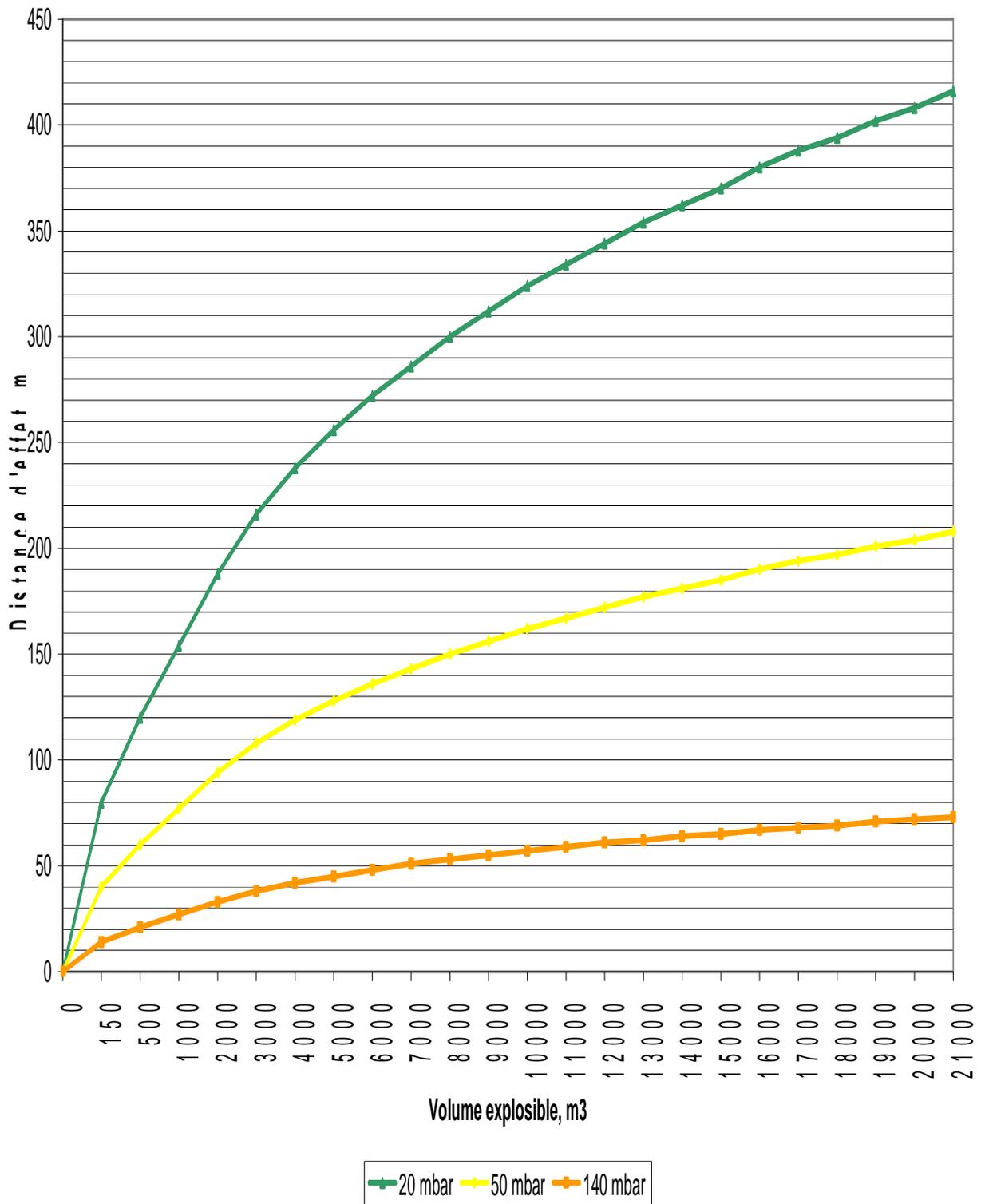
6.3.3.2. *Abaque pour l'évaluation des distances d'effet à 50 et 20 mbar pour un indice de sévérité 4 à la concentration stoechiométrique*

Distances d'effets par rapport au centre du nuage explosible pour un indice de sévérité 4 à la concentration stoechiométrique



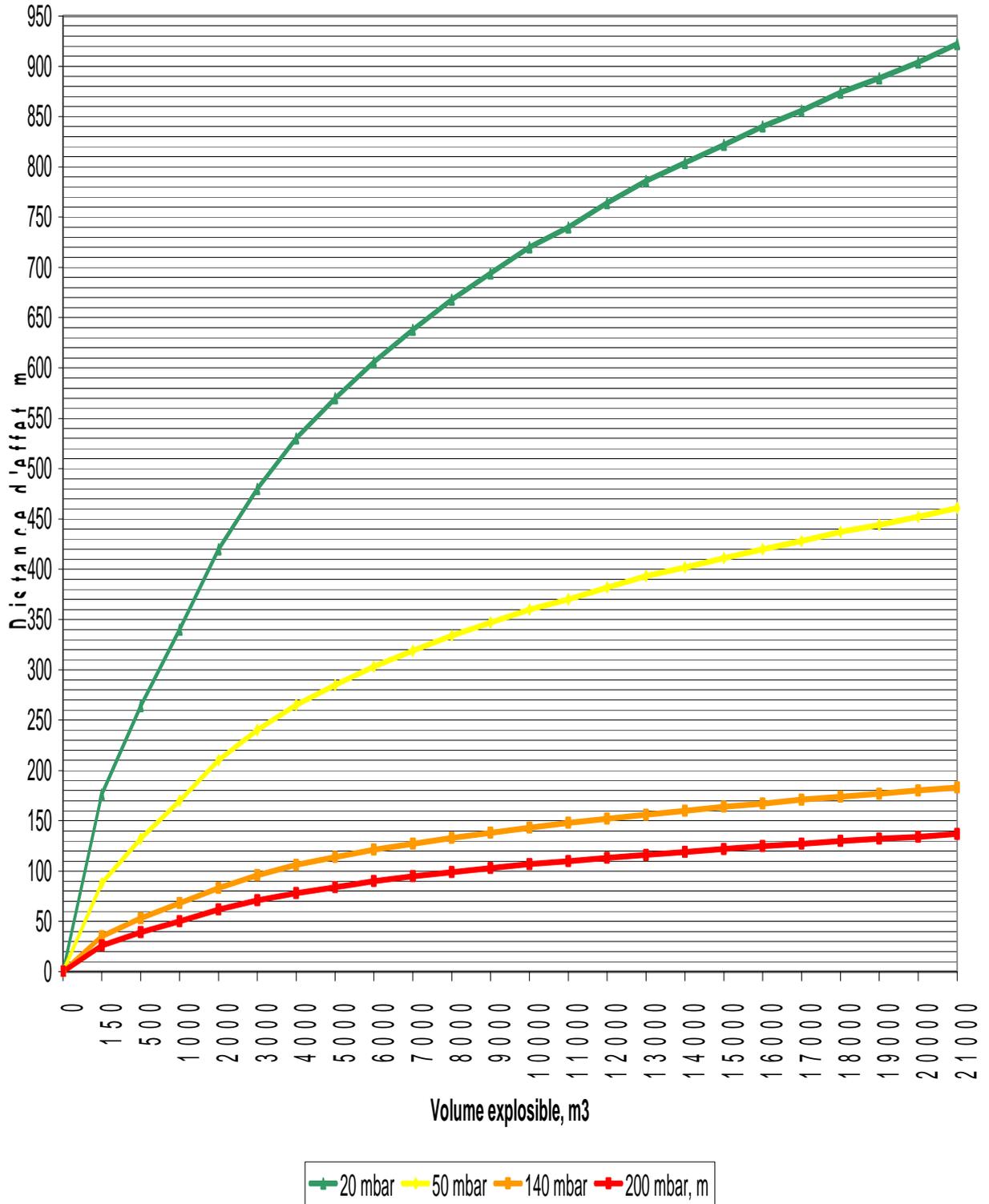
6.3.3.3. *Abaque pour l'évaluation des distances d'effet à 140, 50 et 20 mbar pour un indice de sévérité 5 à la concentration stoechiométrique*

Distances d'effets par rapport au centre du nuage explosible pour un indice de sévérité 5 à la concentration stoechiométrique



6.3.3.4. *Abaque pour l'évaluation des distances d'effet à 200, 140, 50 et 20 mbar pour un indice de sévérité 6 à la concentration stoechiométrique*

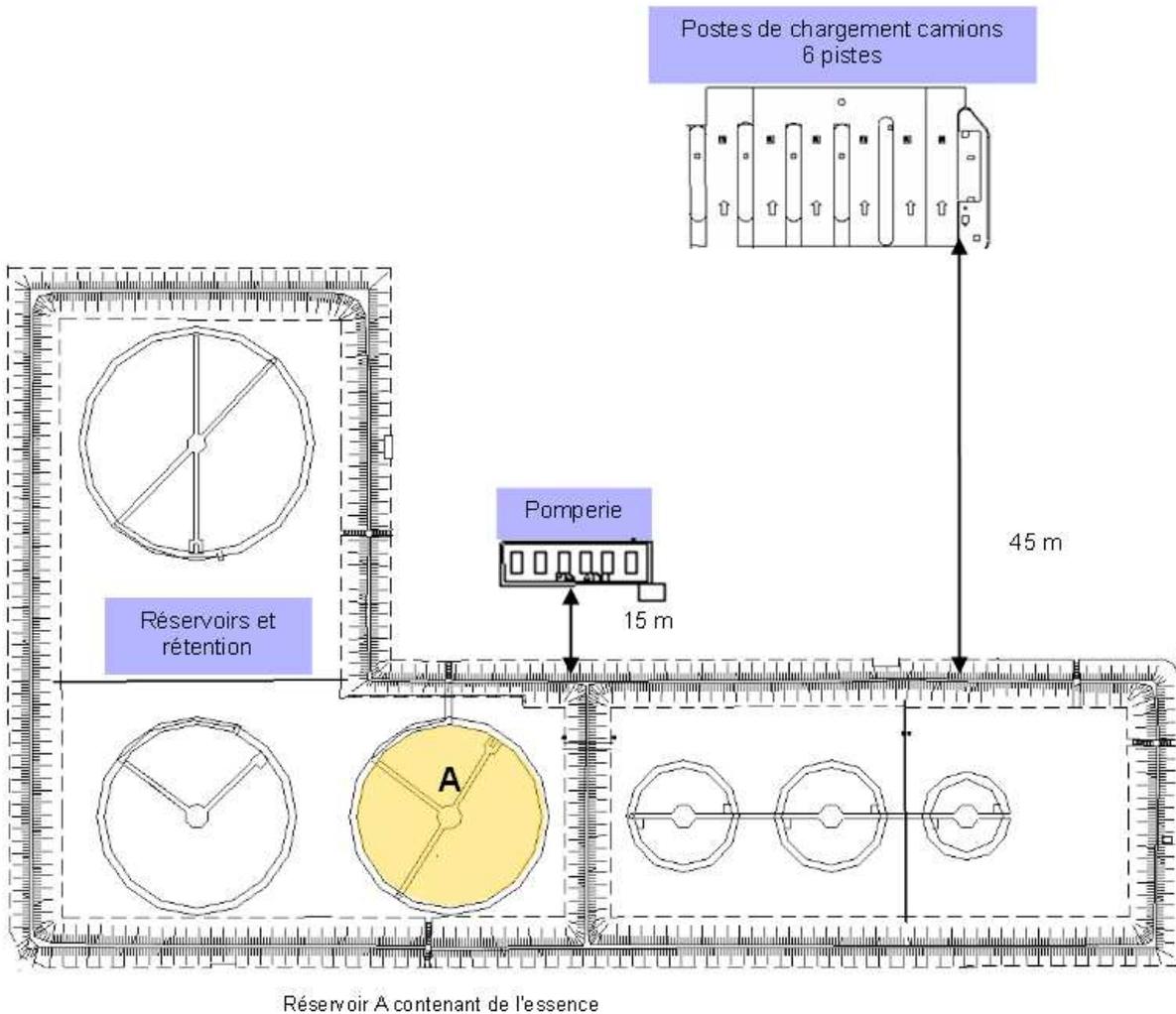
Distances d'effets par rapport au centre du nuage explosible pour un indice de sévérité 6 à la concentration stoechiométrique



7. EXEMPLE DE CALCUL DES EFFETS D'UN UVCE DANS UN DÉPÔT DE LIQUIDE INFLAMMABLE

Les applications suivantes sont données à titre illustratif pour la configuration du dépôt imaginaire suivant, composé d'une cuvette de rétention, d'une pomperie, d'un poste de chargement des camions-citernes de 6 pistes.

7.1. PLAN MASSE D'UN DÉPÔT FICTIF



7.2. CARACTÉRISATION DU TERME SOURCE

Suite à une perte de confinement sur un accessoire du réservoir A contenant de l'essence, une nappe liquide se forme au sein de l'ensemble de la cuvette d'une surface hors réservoirs de 4 000 m².

7.3. DISPERSION DU NUAGE

Les experts du GT DLI ont utilisé le logiciel Phast pour déterminer les contours du nuage inflammable dans ce cas d'évaporation naturelle.

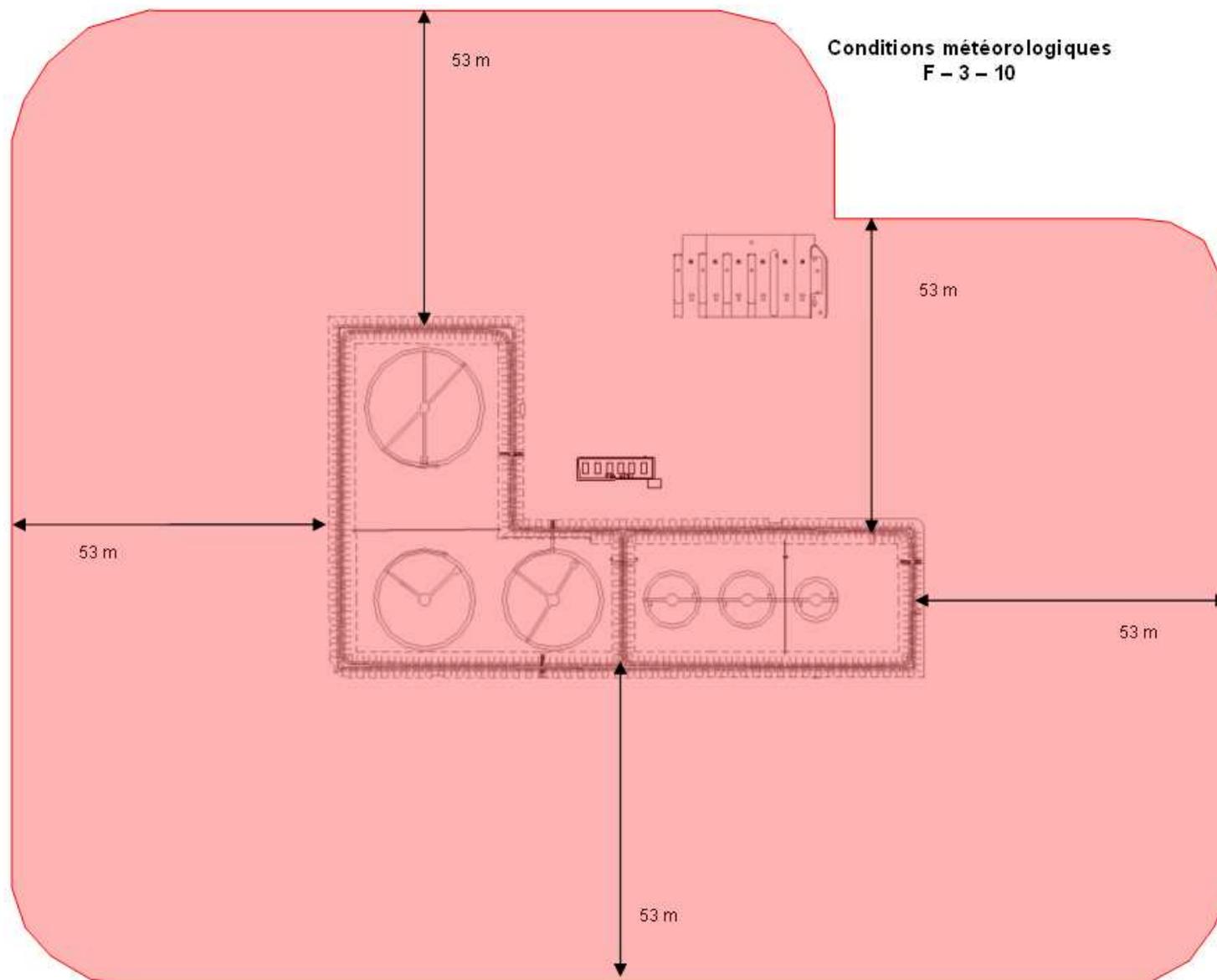
Les résultats obtenus selon les conditions météorologiques sont :

D - 5 - 20	F - 3 - 10	F - 1,5 - 10
distance LII = 32 m du bord de la nappe liquide Hauteur du nuage inflammable : 2 m	distance LII = 53 m du bord de la nappe liquide Hauteur du nuage inflammable : 1,5 m	distance LII = 131 m du bord de la nappe liquide Hauteur du nuage inflammable : 1 m

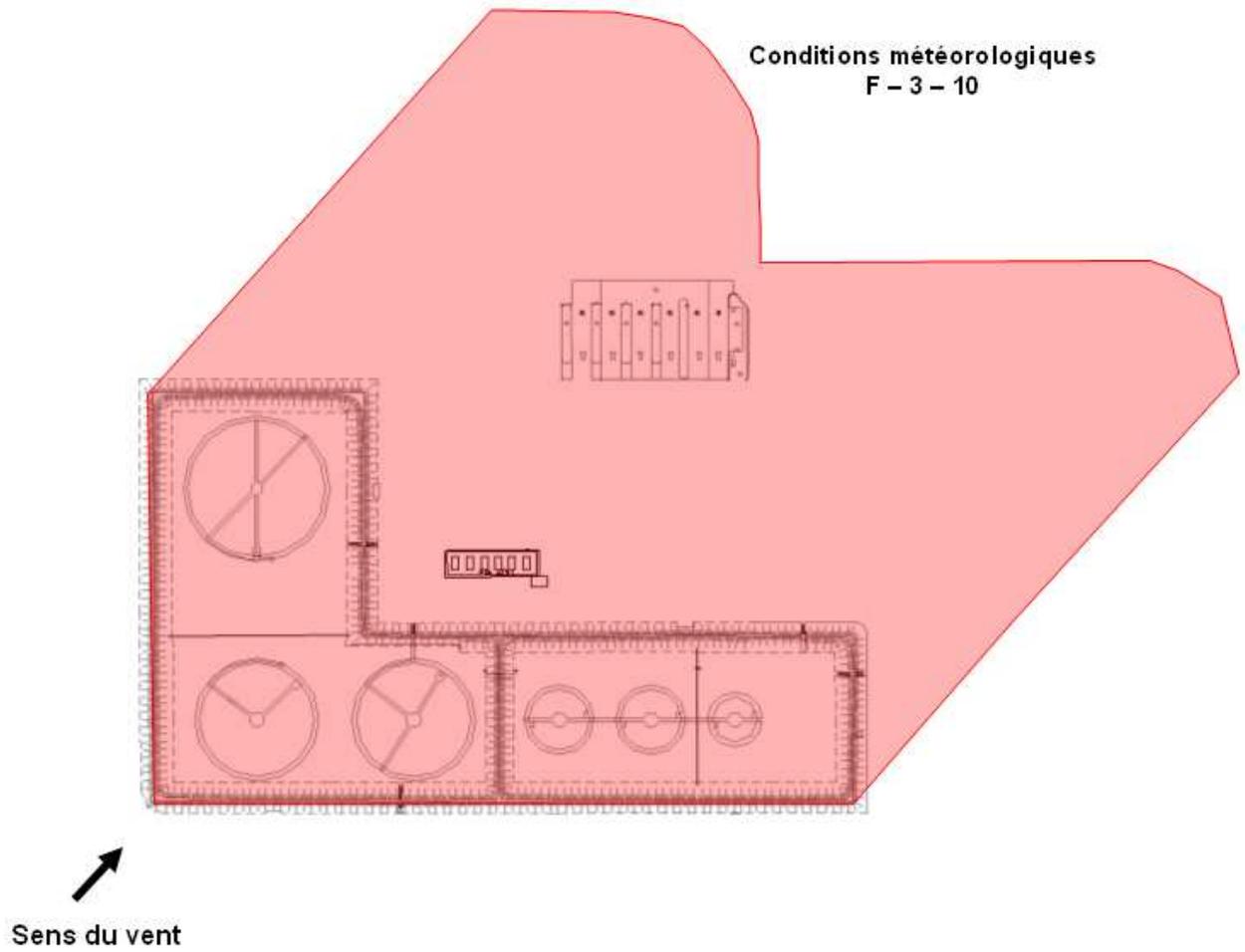
Trois phénomènes dangereux distincts sont donc à considérer.

A titre illustratif, le cas F – 3 – 10 est traité.

L'enveloppe du nuage inflammable, toutes directions de vent confondues, peut être schématisée comme suit :



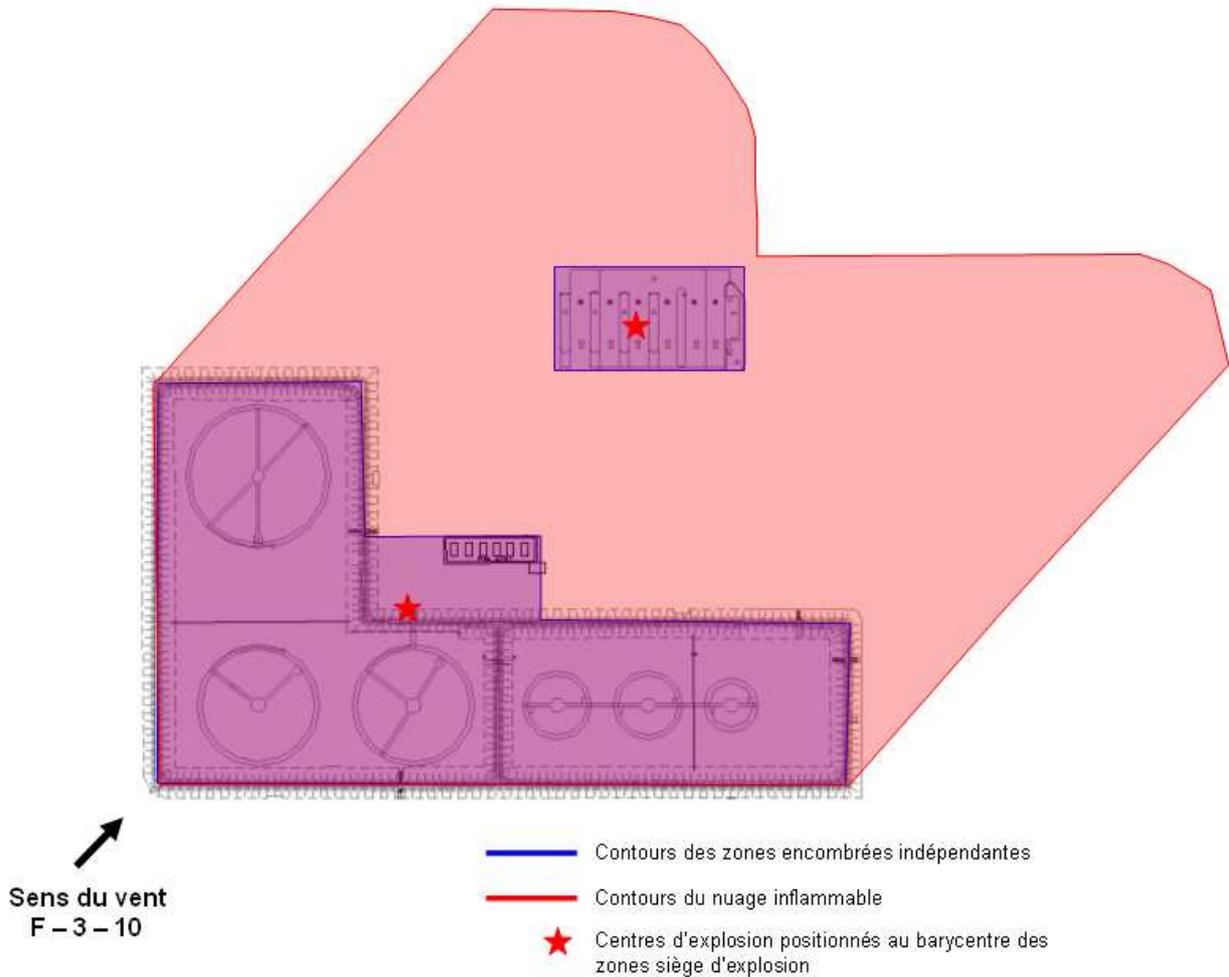
Le contour du nuage inflammable, pour une direction de vent donnée, peut être schématisé comme suit :



7.4. EXPLOSION DU NUAGE

Par superposition du nuage inflammable (une orientation du vent et combinaison météorologique F – 3 – 10) et des zones encombrées indépendantes, les volumes explosibles sont :

1. l'intégralité de la cuvette de rétention et la pomperie
2. l'intégralité du poste de chargement des camions-citernes



Le nuage recouvrant l'intégralité de la cuvette de rétention et la pomperie sur une hauteur de 1,5 m représente un volume explosible de $1,5 \times (4000 \text{ m}^2 + 300 \text{ m}^2)$, soit $6\,450 \text{ m}^3$.

Le nuage recouvrant l'intégralité du poste de chargement des camions-citernes, avec camions présents à chacun des 6 îlots, sur une hauteur de 1,5 m (arrivant à mi-hauteur des camions) représente un volume explosible de $(1,5 \times 250 \text{ m}^2) - (6 \times 18 \text{ m}^3)$, soit 265 m^3 .

Les effets thermiques

Les seuils des effets létaux et létaux significatifs sont atteints à une distance de l'ordre 53 m du bord de la nappe liquide.

Les seuils des effets irréversibles sont atteints à une distance de l'ordre 58 m du bord de la nappe liquide.

Les effets de pression

Les indices de sévérité, déterminés au regard des équipements présents au sein de chaque volume explosible, sont :

- Intégralité de la cuvette de rétention et la pomperie : 4
- Intégralité du poste de chargement avec camions présents à chaque îlot : 5

En fonction de l'indice de sévérité et pour un centre des effets de l'explosion positionné au barycentre des zones d'explosion, les abaques pour l'évaluation des distances d'effets de l'explosion à la concentration stoechiométrique permettent d'obtenir :

		Cuvette de rétention et pomperie	Poste de chargement des camions
Volume explosible		6 450 m ³	265 m ³
Indice de sévérité		4	5
Distances par rapport au centre de l'explosion	D _(140 mbar)	Non atteint	17 m
	D _(50 mbar)	85 m	48 m
	D _(20 mbar)	170 m	96 m

Nota : pour rappel, les distances D_(20 mbar) sont calculées comme 2 fois les distances D_(50 mbar) comptées à partir du centre de l'explosion.

Cas de l'explosion en champ libre

Toujours sur cet exemple, on peut imaginer qu'avec une direction du vent différente, le nuage dérive vers une zone de champ totalement libre. Si l'évaporation et les conditions météorologiques sont telles que le nuage peut être considéré comme homogène et au repos, les effets de l'explosion en champ libre peuvent être calculés en retenant un indice 3 sur l'échelle Multi-Energy. Les distances d'effets peuvent être lues directement à partir de l'abaque §7, en considérant que le volume explosible est égal au volume du nuage. Attention, dans le cas de l'indice 3, les distances à 20 mbar ne peuvent pas être obtenues en multipliant par 2 les distances à 50 mbar.