

# L'impact des incertitudes sur les distances d'effets en maîtrise des risques

Laurent André, Dufaud Olivier, Perrin Laurent

► **To cite this version:**

Laurent André, Dufaud Olivier, Perrin Laurent. L'impact des incertitudes sur les distances d'effets en maîtrise des risques. Récents Progrès en Génie des Procédés, 2013, 14ième Congrès de la Société Française de Génie des Procédés, Lyon, 08-10 octobre, Thème A, Session A4, 104, pp.1-8. hal-01925944

**HAL Id: hal-01925944**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01925944>**

Submitted on 28 Nov 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## L'impact des incertitudes sur les distances d'effets en maîtrise des risques

LAURENT André<sup>a</sup>, DUFAUD Olivier<sup>a</sup> et PERRIN Laurent<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, CNRS, Université de Lorraine, ENSIC,  
1 Rue Grandville BP 20451 F-54001 Nancy Cedex

### Résumé

Dans le cadre de la prévention des risques, les études de dangers rapportent, entre autres, des éléments d'identification et de caractérisation des potentiels de dangers des produits, des équipements et des installations. Les résultats sont récapitulés dans des tableaux décrivant les scénarios accidentels, les phénomènes de danger et les distances d'effets retenues. Les incertitudes de ces dernières n'y sont jamais précisées, les valeurs étant pourtant indiquées au mètre près. Ce constat ne facilite pas leur appropriation par exemple au sein de certains collèges des CLIC. L'exemple d'une installation de stockage de chlorure de méthyle liquéfié sous pression est proposé pour tenter d'illustrer différentes incertitudes liées aux estimations des distances d'effets concernant certains phénomènes dangereux d'explosion, d'incendie et de dispersion.

**Mots-clés : Risques - phénomènes de danger - distances d'effet - incertitudes**

### 1. Introduction

La législation française, transcrite de la directive européenne dite Seveso II, impose aux industriels, en particulier pour les installations soumises à autorisation assortie de servitude d'utilité publique (Seveso AS), de réaliser une Etude De Dangers (EDD) et une étude d'impact pour obtenir l'autorisation d'exploitation. De même plus récemment, les Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) conduisent en principe à circonscrire l'urbanisation existante et future autour des ICPE à risque. Dans ce cadre des PPRT, il existe des Comités Locaux d'Information et de Concertation (CLIC) afin de promouvoir une meilleure information des acteurs de la sécurité aux problèmes des risques, en particulier les riverains des ICPE. Mais le déficit d'échange, d'explication et de concertation peut expliquer les difficultés d'appréhender les résultats de l'EDD. Comme les incertitudes des résultats présentés dans l'EDD ne sont jamais précisées, comment justifier par exemple que la frontière de l'effet d'un phénomène de danger soit située au milieu de la rue d'un village ?

Cet article a pour objectif de sensibiliser à l'impact de différentes incertitudes liées à l'évaluation des distances des effets des phénomènes accidentels à partir de l'étude de cas d'un stockage de chlorure de méthyle liquéfié sous pression en se limitant à une approche simple déterministe. Ces estimations sont le résultat d'une modélisation et/ou d'un traitement fondés sur un certain nombre d'hypothèses et de données, qui sont source d'incertitudes et parfois même de divergences entre les points de vue. Ces incertitudes devraient se retrouver en fin d'analyse dans l'estimation de l'intervalle de confiance relatif aux indicateurs utilisés. Une incertitude ou erreur, même modérée, sur une distance d'effet peut avoir une incidence importante sur l'incertitude du risque à la distance estimée comme pourtant suffisamment sûre.

### 2. Données concernant l'installation de stockage

Le chlorure de méthyle liquéfié sous pression est stocké dans une sphère de 480 m<sup>3</sup> avec un taux de remplissage de 80% à la température de 275 K. Les données numériques nécessaires à l'évaluation des risques sont :

Volume de combustible  $V = 384 \text{ m}^3$       Masse volumique du liquide  $\rho_L = 1002,3 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de la vapeur  $\rho_V = 2,134 \text{ kg/m}^3$  (1,013 bar ; 15 °C)

Pression de vapeur saturante  $P_V = 2,8 \times 10^5 \text{ Pa}$       Masse molaire  $M = 0,050 \text{ kg/mole}$

Pression d'ouverture des soupapes  $P_S = 1,2 P_V$

Température de stockage  $T = 275 \text{ K}$

Température d'ébullition sous 1,013 bar  $T_{EB} = 249 \text{ K}$

Température critique  $T_C = 416,1 \text{ K}$

Pression critique  $P_C = 66,8 \text{ bar}$

Température limite de surchauffe  $T_{SL} = 372$  K

Enthalpie de combustion  $H_C = 1,524 \times 10^4$  kJ/kg      Enthalpie de vaporisation  $H_V = 420$  kJ/kg

Capacité thermique massique liquide  $C_{PL} = 1,6$  kJ. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>

Capacité thermique massique vapeur  $C_{PV} = 0,84$  kJ. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>

IDLH = 2000 ppm ;    LII = 8,1 % ;    LSI = 17,2 %

### 3. Etude de l'explosion et inflammation d'un nuage de gaz

Les étapes successives du calcul des effets d'un scénario d'explosion-inflammation d'un nuage combustible comportent la détermination du terme source (débit d'émission), le calcul de dispersion du nuage inflammable et toxique et l'estimation de son inflammation et de son explosion.

#### 3.1 Terme source

Le cas considéré propose d'examiner une explosion à l'air libre d'un nuage de chlorure de méthyle engendré par la dispersion continue, pendant une durée de 20 minutes, d'un rejet résultant d'une brèche franche de 0,05 m de diamètre en pied de sphère. La caractérisation du terme source a permis d'estimer en écoulement isotherme (coefficient de débit = 0,6) un débit moyen de fuite de 26,2 kg/s, soit une masse totale rejetée de 31440 kg. Le coefficient de débit, plutôt que d'être déterminé à partir des coefficients de pertes de charge singulières, est souvent fixé arbitrairement à 0,9 ou 0,6 en fonction du type d'orifice. Une seconde incertitude est due à l'estimation de la masse de chlorure de méthyle contribuant effectivement à la formation du nuage. L'évaluation du taux massique de flash isenthalpique peut être calculée par la relation classique :

$$\text{Flash} = 1 - \exp [(- C_{PL} \Delta T) / H_V]$$

où  $\Delta T$  est l'écart entre la température initiale du liquide dans le stockage soit 275 K et sa température d'ébullition à la pression atmosphérique soit 249 K. Le taux de flash est dans ce cas de l'ordre de 10 %. Il est considéré comme un paramètre prédictif médiocre de la masse de combustible contribuant au nuage en raison de la présence possible d'aérosol, seconde incertitude. La pratique commune de la prise en compte de la formation d'un aérosol (une à deux fois le taux de flash) amène à considérer que la contribution massique du rejet à la formation du nuage est ici de 20 à 30 % du rejet. De plus, certaines modélisations omettent également de prendre en considération le terme source lié à l'évaporation de la flaque générée lors du rejet. Des erreurs de 20 à 50 % sont là encore commises.

#### 3.2 Effets thermiques

Le calcul des effets thermiques générés par l'inflammation et la combustion du nuage est basé sur le modèle initial de Raj et Emmons (1975). CCPS (1989) en a proposé une forme modifiée pour tenir compte de la contribution éventuelle des conditions d'expansion des gaz brûlés aux effets. Les distances des effets thermiques sur l'homme suivant les auteurs sont liées à la valeur de la LII ou à une fraction de cette valeur. En France la limite des premiers effets létaux et des effets létaux significatifs correspond à la distance à la LII alors que celle des effets irréversibles est établie pour 1,1 fois la distance à la LII (Michel, 2010).

La distance maximale pour laquelle le nuage formé est inflammable (distance à la LII), est évaluée par le modèle Aloha (gaz dense) de dispersion en champ libre. Les deux ensembles classiques de conditions météorologiques, repérés (D-5-20) et (F-3-15), où la première lettre correspond à la classe de stabilité atmosphérique, le chiffre en seconde position à la vitesse du vent et le troisième à la température ambiante ont été retenus pour le calcul. Le tableau 1 récapitule les distances des effets thermiques ainsi obtenues.

Tableau 1 - Distance (m) sur la base de la LII

Conditions météorologiques	D - 5 - 20	F - 3 - 15
Seuil des effets irréversibles	19	37
Seuil des effets létaux	17	34

Les résultats des distances montrent que les conditions (D-5-20) correspondant à une atmosphère neutre associée à une vitesse de vent mettent en évidence les effets d'advection par rapport aux conditions (F-3-15) conjuguant une très forte stabilité. Raj (2007) indique toutefois que la principale incertitude réside dans le choix de l'émittance de la flamme, notamment liée à la teneur en suies, pouvant conduire pour un seuil thermique fixé à des variations d'un facteur 3 sur la distance d'effet.

### 3.3 Effets de surpression aérienne en champ lointain

Le calcul du champ de pression aérienne engendrée par une explosion accidentelle de gaz nécessite en principe la détermination de l'énergie d'explosion, de la pression maximale en champ proche et de l'atténuation de la propagation de cette surpression en champ lointain.

Plusieurs méthodes analytiques simples et rapides sont proposées dans la littérature pour déterminer les effets de surpression. Ainsi, la quantification de la source d'explosion peut être exprimée soit en équivalent massique d'explosif, par exemple le plus souvent en équivalent TNT (modèle TNT), soit en charge énergétique de combustible (modèle de Baker-Strehlow, Modèle Multi Energie MEM etc.). Afin de faciliter la comparaison entre les méthodes, Quest (1999) a transformé l'équivalent TNT du diagramme TNT en charge énergétique de combustible. Les erreurs potentielles les plus importantes d'application de la quantification énergétique de la source sont constituées par les incertitudes sur la charge de combustible du nuage (cf. terme source) et aussi sur la valeur  $\alpha$  du rendement d'explosion de combustible, qui peut varier suivant les auteurs de 1 à 15 %. HSE (1986) par exemple préconise la valeur de 3 %. Le tableau 2 compare les distances d'effet de surpression des modèles TNT et MEM pour un nuage résultant d'un rejet massique de 30 %.

Tableau 2 - Distances (m) aux seuils de surpression

Seuil de surpression (mbar)	Modèle TNT			Modèle MEM	
	$\alpha=1\%$	$\alpha=3\%$	$\alpha=10\%$	$i=2$	$i=3$
20	139	201	309	35	88
50	63	91	139	na	29
100	37	53	80	non atteint (na)	

Normalement en champ libre les niveaux de surpression associés à un UVCE n'excèdent pas quelques dizaines de millibars. Bien que très connue la méthode TNT est inadaptée à l'estimation des surpressions engendrées par des explosions accidentelles de gaz, en particulier pour les explosions de faible intensité (Mouilleau et Lechaudel, 1999 ; Michel, 2010 ; Champassy, 2013).

En raison de la dispersion de la modélisation MEM pour les faibles surpressions, il est possible de retenir une valeur maximale de 1 à 3 pour l'indice de sévérité  $i$  dans une zone dépourvue d'obstacle avec un nuage homogène (TNO, 1997). Les incertitudes sur les distances d'effets proviennent donc également du choix pertinent de cet indice  $i$  qui doit représenter au plus juste le mode de propagation de l'explosion et le degré de confinement de l'environnement (Kinsella, 1993).

### 3.4 Effets de toxicité aiguë

D'après MEEDDAT (2009) le chlorure de méthyle n'induisant pas de mortalité, mais seulement des effets cliniques mineurs, il n'existe pas de seuils d'effets létaux. L'incertitude relative à sa toxicité dans un nuage dépend de l'incertitude résultant de l'application du modèle de dispersion, mais aussi de l'incertitude sur les valeurs de SEI. Par exemple pour un temps d'exposition de 30 minutes, les valeurs de SEI et de l'IDLH sont respectivement 2520 ppm et 2000 ppm. Le tableau 3 compare ainsi pour deux conditions météorologiques les distances d'effet toxique suivant l'axe de dispersion sous le vent pour ces deux valeurs différentes de concentration.

Tableau 3 - Distances (m) au SEI et à l'IDLH

Conditions météorologiques	D - 5 - 20	F - 3 - 15
IDLH = 2000 ppm	231	392
SEI = 2520 ppm	200	344

L'incertitude sur les valeurs de seuils de toxicité entraîne ici une variation de l'ordre de 15 % sur les distances d'effet toxique. Par ailleurs, l'utilisation d'un modèle de gaz dense induit également une incertitude supplémentaire quant à la transition entre ce modèle et un modèle de dispersion gaussien ; ceci n'excluant pas les incertitudes, importantes, dues aux modèles eux-mêmes.

En résumé cet exemple montre que les méthodes de modélisation des effets d'une dispersion, inflammation et explosion d'un nuage combustible ne permettent d'obtenir au plus que des ordres de grandeur sur lesquels la marge d'erreur, qui reste difficilement quantifiable, peut être relativement importante.

#### 4. Examen des effets du BLEVE

La modélisation des dommages générés par un BLEVE devrait résulter de la prise en compte des effets de surpression, de projection (fragments), de rayonnement thermique et de dispersion toxique.

Abbasi et Abbasi (2007) ont proposé une revue de synthèse des méthodes d'estimation des différents effets et signalé les difficultés d'application et de cohérence des différents modèles répertoriés. Pour un taux de remplissage important du réservoir de stockage (environ supérieur à 20 %), Michel (2010) considère de façon générale que les distances d'effet de surpression sont moindres que les distances aux seuils d'effets thermiques, qui sont alors considérées comme des enveloppes. Toutefois l'évaluation des effets de projection, voire de surpression, n'est pas à négliger en raison de la fragmentation de la sphère susceptible d'engendrer des effets domino. Or, il faut noter que l'arrêté dit PCIG du 29 septembre 2005, signale sur ce point que « les connaissances [sont] limitées en matière de détermination et de modélisation des effets de projection ».

La démarche d'évaluation des effets thermiques nécessite la connaissance de la dimension du diamètre maximal de la boule de feu, de sa durée de combustion, de sa hauteur d'élévation, de la densité de flux thermique rayonnée (émittance) par la flamme, celle reçue par la cible exposée et des effets sur l'homme.

##### 4.1 Diamètre et durée de la boule de feu

Abbasi et Abbasi (2007) ont recensé une vingtaine de corrélations empiriques et analytiques d'estimation du diamètre  $D$  et de la durée  $t$  de la boule de feu sous la forme :

$$D = A m^a \quad t = B m^b$$

où  $m$  est la masse de combustible de la boule de feu et  $a$ ,  $b$ ,  $A$  et  $B$  sont des coefficients empiriques, qui ne sont pas connus avec précision. Les valeurs moyennes sont respectivement :  $A=5,60$  ( $\sigma=0,90$ ) –  $a=0,323$  ( $\sigma=0,018$ ) –  $B=1,26$  ( $\sigma=0,80$ ) et  $b=0,224$  ( $\sigma=0,089$ ). L'application au stockage de la masse totale de chlorure de méthyle des expressions moyennes et de celles recommandées par le TNO (1997) et CCPS (1989) conduit aux résultats proches :

<i>Expressions moyennes</i>	$D = 5,6 m^{0,323} = 357 m$	$t = 1,26 m^{0,224} = 22,5 s$
<i>Modèle CCPS (1989)</i>	$D = 5,8 m^{0,33} = 422 m$	$t = 2,6 m^{1/6} = 22 s$
<i>Modèle TNO (1997)</i>	$D = 6,48 m^{0,225} = 423 m$	$t = 0,852 m^{0,26} = 24 s$

L'incertitude de la procédure de calcul de ces deux paramètres est aussi associée à l'estimation de la masse  $m$  de combustible instantanément relâchée lors de la rupture du réservoir. CCPS (1989) et TNO (1997) considèrent que le flash de la totalité du contenu de la sphère de stockage contribue à la génération

de la boule de feu. Par contre Roberts (1982) ne retient pour le flash qu'une valeur de 30 % de la masse totale du stockage.

#### 4.2 Hauteur d'élévation

La hauteur d'élévation  $H$  du centre de la boule de feu par rapport au sol est aussi différente suivant la pratique des auteurs. CCPS (1989) propose  $H = D/2$  ; TNO (1997) indique  $H = D$  et Prugh (1994) retient  $H = 0,75 D$ . Ces différences entraînent une incertitude sur le calcul géométrique du facteur maximal de forme, donc de la densité de flux thermique reçue par la cible, qui s'atténue en fonction de la distance d'éloignement de la cible à la boule de feu.

#### 4.3 Modèles thermiques

Le rayonnement de la boule de feu dépend de la distribution des températures de flamme, de la composition des gaz réactifs et produits, de la géométrie de la boule de feu, de l'absorption du rayonnement dans la boule de feu et dans l'atmosphère et du facteur géométrique de forme sous lequel la cible voit l'émetteur. La quantification de ces paramètres, en particulier celle de l'émittance  $E$  de la flamme, est difficile dans le cas d'un BLEVE.

L'application respective des modèles thermiques de la source ponctuelle et de la surface dite solide de la flamme permet d'évaluer la densité de flux thermique émise par la flamme. Ces deux modèles, qui considèrent le BLEVE dans un état stationnaire, sont largement utilisés. Le modèle de la flamme solide considère que l'émittance de la flamme assimilée à une surface solide est constante et ne dépend pas de la masse de combustible. Par exemple CCPS (1989) adopte la valeur  $E = 350 \text{ kW/m}^2$  alors que TNO (1979) retient  $E = 180 \text{ kW/m}^2$ . Le modèle de la source ponctuelle suppose que l'émittance de la flamme rayonnée dans toutes les directions de l'espace dépend de la masse  $m$  de combustible, du diamètre  $D$  et de la durée  $t$  de la boule de feu et d'une fraction  $f$  de l'enthalpie de combustion  $H_c$ . L'émittance de la flamme de boule de feu peut être estimée à l'aide des relations suivantes :

$$\begin{array}{ll} \text{CCPS (2000)} & E = (f H_c m) / \pi D^2 t \\ \text{Pape et al (1988)} & E = 235 P v^{0,39} \end{array} \quad \begin{array}{ll} \text{Elia (2002)} & E = (0,27 m H_c P_0^{0,32}) / \pi D^2 t \\ \text{TNO (1997)} & E = (f \Delta H m) / \pi D^2 t \end{array}$$

Le résultat de l'application des différentes équations empiriques au stockage du chlorure de méthyle est indiquée dans le tableau 4.

Tableau 4 - Emittance rayonnée par la flamme de la boule de feu

Source	TNO (1979)	CCPS (1989)	TNO (1997)	CCPS (2000)	Pape et al (1998)	Elia (2002)
$E \text{ (kW/m}^2\text{)}$	180	350	65	183	154	82

Mis à part les valeurs initiales anciennes du modèle de la flamme solide, il faut noter une variation du simple au triple des valeurs de l'émittance. La plus faible valeur obtenue recommandée par la méthode TNO (1997) s'explique par l'enthalpie nette  $\Delta H$  obtenue en retranchant à l'enthalpie de combustion  $H_c$  l'enthalpie de vaporisation  $H_v$  et celle de la chaleur sensible. En terme de comparaison TNO (1997) rapporte pour des feux de flaque de chlorure de méthyle, de 1 m et 10 m de diamètre, de rapport hauteur de flamme sur diamètre de 2,4 et 4,9 des valeurs d'émittance de 15 et 27  $\text{kW/m}^2$ , mais précise qu'il est difficile de comparer les émittances d'une boule de feu d'un BLEVE et de la flamme d'un feu de flaque (présence de suies - luminosité de la flamme, ...).

Finalement la densité de flux thermique  $q$  reçue par la cible est calculée selon la formule

$$q = E \tau F_G$$

où  $F_G$  est le facteur géométrique de forme sous lequel la cible voit la boule de feu et  $\tau$  est le facteur de transmission de l'atmosphère en raison de l'absorption d'une partie du rayonnement par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

L'intensité des effets thermiques sur l'homme est caractérisée par des valeurs de référence exprimées sous forme de seuils d'effets thermiques. Dans le cas d'un BLEVE où la durée d'exposition est inférieure à 120 s, l'effet thermique est « dose-dépendant ». Le facteur causal correspondant est défini par l'expression  $q^{4/3}t$  où  $q$  est la densité de flux thermique et  $t$  le temps d'exposition. Les valeurs réglementaires actuelles sont 600 – 1000 et 1800  $(kW/m^2)^{4/3}.s$  pour les seuils respectifs des effets irréversibles, des effets létaux graves et des effets létaux très graves.

#### 4.4 Examen de certaines incertitudes concernant le BLEVE

En pratique, les trois incertitudes potentielles les plus importantes présentes dans l'évaluation des effets thermiques d'un BLEVE résident dans l'estimation de la masse de combustible mise en jeu, dans l'évaluation de l'émittance de la flamme de la boule de feu et dans l'influence de la hauteur d'élévation.

En effet, il est difficile de calculer de façon précise la *masse de combustible* contribuant au BLEVE. Le déroulement du scénario du BLEVE et surtout la rupture du réservoir dépendent fortement de la température atteinte par la charge de liquide contenue dans la sphère entourée par les flammes d'un incendie externe. L'intervalle de température peut évoluer entre la température initiale de stockage et la température limite de surchauffe  $T_{SL}$ . L'évaluation du taux massique global de flash du chlorure de méthyle en fonction de la température initiale du liquide de la sphère est indiquée dans le tableau 5. Ce tableau montre aussi l'incidence correspondante du taux de flash sur la masse de combustible, le diamètre et la durée de la boule de feu et sur les distances radiales d'effet thermique au seuil des effets létaux de  $1000(kW/m^2)^{4/3}.s$ .

Tableau 5 - Influence du taux global de flash

Taux global de flash (%)	30,6	50	75	100
Température du liquide (K)	275	289,5	306	321
Masse combustible ( $10^5$ kg)	1,177	1,924	2,886	3,848
Diamètre boule (m)	280	330	378	416
Durée boule (s)	16	19	22	24
Distance SEL (m)	(172)	227	275	310

Il faut noter que la prise en compte de la masse totale de chlorure de méthyle présente dans le stockage pour l'estimation du BLEVE constitue une enveloppe conséquente par rapport à des taux globaux de flash de 30 à 50 %.

Examinons maintenant l'influence de la variation des valeurs des *émittances* sur les effets thermiques du BLEVE. Le tableau 6 récapitule les distances des effets thermiques par rapport aux trois seuils réglementaires pour les différentes valeurs estimées des émittances dans le cas d'un facteur de transmission unité.

Tableau 6 - Distances radiales (m) aux différents seuils des effets thermiques de la boule de feu

E ( $kW/m^2$ )	180	350	65	183	154	82
$1800(kW/m^2)^{4/3}.s$	356	643	-	363	287	-
$1000(kW/m^2)^{4/3}.s$	543	861	-	551	476	-
$600(kW/m^2)^{4/3}.s$	718	1083	270	726	645	374

La variation des ordres de grandeur des distances source – cible est considérable pour un même seuil d'effet thermique. Initialement TNO (1979) et CCPS (1989) avaient proposé des valeurs empiriques de l'émittance fondées sur l'expérience et indépendantes de la masse de combustible, ce qui permettait de s'affranchir de son incertitude. Depuis toutes les valeurs de l'émittance résultent du modèle de source ponctuelle. Les sources d'erreurs identifiées sont donc les incertitudes sur la masse de combustible, sur le diamètre et la durée de la boule de feu mais aussi sur la fraction rayonnée lors de la combustion.

Papazoglou et Aneziris (1999) ont ainsi montré que le modèle de la source ponctuelle conduisait à un plus large degré d'incertitude sur les distances d'effets thermiques.

Il faut aussi noter que la circulaire ministérielle du 10 mai 2010 propose pour le chlorure de méthyle trois relations déduites du modèle Shell TRC exprimant les distances aux trois seuils thermiques réglementaires en fonction de masse maximale de gaz liquéfié contenu dans la sphère pour un taux de remplissage de 85 %. Leur application numérique conduit aux distances de 592 m, 475 m et 346 m pour les seuils respectifs de 600 - 1000 et 1800 (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>.s.

Le facteur géométrique maximal de forme  $F_G$  est calculé par la relation  $F_G = (D/2X)^2$  où  $X$  est la distance normale à la cible depuis le centre de la boule de feu. L'expression  $X = [d^2 + (\gamma D)^2]^{0.5}$  est fonction de la hauteur d'élévation  $\gamma D$  et de la distance  $d$  de la trace au sol du centre de la boule de feu à la cible. Le tableau 7 regroupe les valeurs de  $F_G$  en fonction de la distance  $d$  pour les différentes valeurs de  $\gamma$  recommandées par les modèles TNO (1997), CCPS (1989) et Prugh (1994).

Tableau 7 - Variation du facteur géométrique de forme en fonction de la distance radiale

Distance d (m)	300	500	1000	1500
$F_G$ (CCPS $\gamma = 0,5$ )	0,331	0,151	0,043	0,019
$F_G$ (Prugh $\gamma = 0,75$ )	0,234	0,127	0,040	0,019
$F_G$ (TNO $\gamma = 1$ )	0,166	0,104	0,038	0,018

La hauteur d'élévation de la boule de feu est donc un paramètre important pour l'évaluation des distances d'effet thermique. Le modèle CCPS (1989), qui considère une boule stationnaire au sol, présente un caractère majorant en particulier à faible distance (de l'ordre d'une à deux fois le diamètre de la boule de feu). Toutefois Leprette (2002) signale que le modèle TNO (1997) pourrait sous estimer la densité de flux thermique reçue aux faibles distances. Notons enfin que la géométrie parfaitement sphérique de la boule de feu, hypothèse de base des modèles, n'est pas toujours vérifiée en réalité.

En résumé, tous les résultats des calculs des deux exemples relatifs au nuage et au BLEVE de chlorure de méthyle sont présentés ici à l'état brut avec des valeurs affichées au mètre près. Nous avons vu qu'il ne faut surtout pas en conclure que la précision des modèles est de l'ordre du mètre. Il est aussi toutefois bon de rappeler que la plupart des corrélations utilisées ici pour le chlorure de méthyle font référence à des essais impliquant des GPL et plus particulièrement du propane.

## 5. Conclusions

L'évaluation du risque suppose d'identifier et de décrire toutes les relations de cause à effet qui peuvent entrer en jeu entre un événement initial et ses effets consécutifs. L'exercice comporte de nombreuses incertitudes : il est possible de soupçonner l'influence d'un facteur sans qu'elle ait été clairement mise en évidence (incertitude d'identification), d'hésiter entre des représentations alternatives d'une relation de cause à effet (incertitude de modélisation), ne pas connaître précisément une valeur numérique entrant en jeu dans une relation (incertitude paramétrique). Ces différents types d'incertitude, qui peuvent affecter chacune des étapes de l'évaluation des risques, relèvent de traitements différents. L'incertitude paramétrique est déterminée habituellement par des méthodes statistiques auxquelles une large littérature scientifique se rapporte. Dans le cas d'incertitudes sur les résultats d'une modélisation, un traitement classique consiste à utiliser des hypothèses conservatrices (c'est-à-dire maximisant le risque). L'incertitude dans ce cas n'est pas évaluée, mais elle apparaît comme simplement bornée. Ces méthodes sont par exemple d'usage courant dans l'estimation des expositions et la caractérisation des relations dose-effet. L'incertitude sur la structure même du modèle est plus délicate à évaluer, car l'ensemble des modèles possibles est en général difficile à définir. Les techniques de vérification de modèles permettent en principe de trouver les modèles acceptables au sein d'un ensemble de taille restreinte, mais cette incertitude fait rarement l'objet d'une véritable estimation.

Ainsi, pour l'ensemble de la démarche d'évaluation du risque, les différentes formes d'incertitude prises en compte interfèrent et se cumulent. L'estimation de l'incertitude globale est réalisable par la mise en œuvre



de techniques dites de propagation, par exemple en choisissant aléatoirement la valeur de chaque paramètre à l'intérieur d'un ensemble de valeurs possibles, en effectuant l'évaluation du risque pour ce jeu de valeurs, en recommençant cette opération un très grand nombre de fois et enfin en collectant l'ensemble des valeurs du risque ainsi estimées (méthode dite de Monte Carlo). Sous ces formes quantitatives, l'analyse de l'incertitude peut être utilement couplée à une analyse de sensibilité globale.

### Références

- Abbasi, T. et S.A. Abbasi, 2007, The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): mechanism, consequence assessment, management, *Journal of Hazardous Materials*, 141, 489-519.
- CCPS, 1989, Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVES, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, USA.
- CCPS, 2000, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, Second Edition, New York, USA.
- Champassy, A., 2013, Méthodes de modélisation des explosions de gaz, *Techniques de l'Ingénieur, Sécurité et gestion des risques*, SE 28, Paris.
- HSE (Health and Safety Executive), 1986, The effects of explosions in the process industries, *Loss Prevention Bulletin*, 68, 37-47.
- Kinsella, K.G., 1993, A rapid assessment methodology for the prediction of VCE explosion overpressure, *Health, Safety and Loss Prevention in the oil, chemical and process industries*, Singapore.
- Leprêtre, E., 2002, Le BLEVE – Phénoménologie et modélisation des effets thermiques, Rapport Ω5, DRA INERIS.
- MEEDDAT, 2009, Seuils de toxicité aiguë du chlorure de méthyle, Groupe d'experts toxicologues.
- Michel, L., 2010, Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003, BO du MEEDDM n° 2012/12 du 10 juillet 2010.
- Mouilleau, Y. et J.F. Lechaudel, 1999, Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre, Rapport final INERIS DRA n°20433, Verneuil en Halatte.
- Papazoglou, I.A. et O.N. Aneziris, 1999, Uncertainty quantification in the health consequences of the boiling liquid expanding vapour explosion phenomenon, *Journal of Hazardous Materials*, A67, 217-235.
- Quest, 1999, Vapor cloud explosion models – Part II, *The Quest Quarterly*, 4 (2), 1-4.
- Prugh, R. W., 1994, Quantitative evaluation of fireballs hazards, *Process Safety Progress*, 13(2), 83-91.
- Raj, P. K., 2007, LNG fires: a review of experimental results, models and hazard prediction challenges, *Journal of Hazardous Materials*, 140, 444-464.
- Raj, P. K., et H. W. Emmons, 1975, On the burning of a large flammable vapour cloud, Joint Technical Meeting of the Western and Central States – Section of the Combustion Institute, San Antonio, Texas, USA.
- Tellez, C. et J.A. Pena, 2002, Boiling liquid expanding vapour explosion: an introduction to consequences and vulnerability analysis, *Chemical Engineering Education*, Summer, 206-211.
- TNO, 1997, Methods for the calculation of physical effects of escape of dangerous materials (Yellow Book), Committee for the Prevention Disasters, Third Edition, Second revised print 2005, Voorburg, Nederland.

---

## Uncertainty in the estimation of the hazard distances in risk assessment

LAURENT André<sup>a</sup>, DUFAUD Olivier<sup>a</sup> et PERRIN Laurent<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, CNRS, Université de Lorraine, ENSIC,  
1 Rue Grandville BP 20451 F-54001 Nancy Cedex

### Abstract

In France for the risk assessment a part of the report entitled "Etude de dangers" summarizes the results obtained for the effects and consequences analysis including physical models for fire, explosion and dispersion of flammable or toxic materials. An output table recapitulates the list of the representative scenarios, the effect models and the hazard distances. But the uncertainties concerning the hazard distances or the effect zones for each type of effects to the human target are not indicated. A case study of a spherical tank containing liquefied methyl chloride (flammable and toxic) is used to try to illustrate the identification of some uncertainties in physical modeling, in physical model data and especially in effects modelling.

**Keywords: Risk – Consequence analysis – Hazard distances - Uncertainties**