

ANNEXE 5 : METHODOLOGIE QUANTIFICATION DE L'INTENSITE DES PHENOMENES DANGEREUX

Ce document comporte 13 pages

0	24/04/2023	Edition initiale	T. ROBERT	E. MAUNY
Rév.	Date	Objet	Rédaction	Vérification & Approbation

SOMMAIRE

1.	SEUILS D'EFFETS RETENUS.....	3
1.1	EFFETS THERMIQUES.....	3
1.2	EFFETS DE SURPRESSION	4
1.3	EFFETS TOXIQUES	5
2.	CHOIX DES MODELES	6
2.1	CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION CONSECUTIFS A L'ECLATEMENT D'UNE CAPACITE.....	6
2.2	CALCUL DES EFFETS THERMIQUES ET DE SURPRESSION CONSECUTIFS A UNE DISPERSION ATMOSPHERIQUE DE GAZ INFLAMMABLE ..	6
2.2.1	<i>Caractérisation du terme source.....</i>	6
2.2.2	<i>Calcul de la distance à la Limite Inférieure d'Explosivité (LIE).....</i>	6
2.2.3	<i>Calcul des effets thermiques lors d'un jet enflammé.....</i>	6
2.2.4	<i>Calcul des effets de surpression en cas d'explosion de nuage</i>	7
2.2.4.1	Préambule	7
2.2.4.2	Caractérisation de l'explosion en zone encombrée / confinée.....	7
2.2.4.3	Caractérisation de l'explosion en champ libre.....	11

1. SEUILS D'EFFETS RETENUS

Les seuils présentés ci-dessous sont issus de l'annexe 2 de l'arrêté 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 de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

1.1 EFFETS THERMIQUES

Dans le cas des expositions longues, l'approche retenue pour caractériser les effets est basée sur un flux thermique critique, flux au-delà duquel une cible exposée ressentira les effets caractéristiques.

Les valeurs retenues dans cette approche sont de 3 et 5 et 8 kW/m² respectivement pour les premiers effets irréversibles, les effets létaux et les effets létaux significatifs.

Cette approche est utilisée pour caractériser les effets d'un incendie en régime permanent, comme les feux de nappe, de solide, les jets enflammés et les incendies de stockage si la cible potentielle n'est pas en mesure de s'éloigner ou de se protéger en moins de deux minutes.

Dans le cas des expositions courtes, l'approche retenue est basée sur des doses thermiques reçues. Cette dose est obtenue par l'équation

$$E = \Phi^{4/3} \times t.$$

où Φ est le flux thermique reçu et t est le temps d'exposition à ce flux thermique.

L'effet thermique a lieu dès que E dépasse les valeurs retenues pour les effets caractéristiques.

Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques pour les installations classées sont décrites dans les tableaux ci-dessous pour les effets sur les structures et sur l'homme.

Effets sur les structures :

Valeurs de référence (kW/m ²)	Effets sur les structures
5	Seuil des destructions de vitres significatives
8	Seuil des effets domino et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures
16	Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
20	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton
200	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes

Tableau 1 : Valeurs de référence pour les effets sur les structures

Effets sur l'homme :

Valeurs de référence		Effets sur l'homme
kW/m ²	[(kW/m ²) 4/3].s	
3	600	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine »
5	1 000	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » - mentionnée à l'article L515-16 du code de l'environnement
8	1 800	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » - mentionnée à l'article L515-16 du code de l'environnement

Tableau 2 : Valeurs de référence pour les effets sur l'homme

1.2 EFFETS DE SURPRESSION

Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression pour les installations classées sont décrites dans les tableaux ci-dessous pour les effets sur les constructions et sur l'homme.

Effets sur les structures :

Valeurs de référence (mbar)	Effets sur les structures
20	Seuil des destructions significatives de vitres
50	Seuil des dégâts légers sur les structures
140	Seuil des dégâts graves sur les structures
200	Seuil des effets domino
300	Seuil des dégâts très graves sur les structures

Tableau 3 : Valeurs de référence pour les effets sur les constructions

Effets sur l'homme :

Valeurs de référence (mbar)	Effets sur l'homme
20	Seuil des effets correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme
50	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine »
140	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine »
200	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine »

Tableau 4 : Valeurs de référence pour les effets sur l'homme

Conformément à la disposition introduite dans l'arrêté du 29 septembre 2005 compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, les distances d'effets correspondant aux surpressions de 20 mbar sont prises égales au double de celles calculées pour une surpression de 50 mbar.

1.3 EFFETS TOXIQUES

Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets toxiques pour l'homme par inhalation pour les installations classées sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Exposition	Type d'effets constatés	Concentration d'exposition
Exposition de 1 à 60 min	Létaux	SELS (CL 5%) SEL (CL 1%)
	Irréversibles	SEI
	Réversibles	SER

SELS : seuil des effets létaux significatifs ; SEL : seuil des effets létaux ; SEI : seuil des effets irréversibles ; SER : seuils des effets réversibles ; CL : concentration létale

Tableau 5: Valeurs de référence pour les effets toxiques pour l'homme par inhalation

Dans le cadre de la prévention des risques liés à des émissions accidentelles dans l'atmosphère de substances chimiques dangereuses, les gestionnaires de risques souhaitent disposer des seuils de toxicité aiguë qui seront le plus souvent utilisés associés à des accidents pour des études de dangers ou pour l'élaboration de plans d'urgence.

Les « effets réversibles » correspondent à un retour à l'état de santé antérieur à l'accident.

Les « effets irréversibles » correspondent à la persistance dans le temps d'une atteinte lésionnelle ou fonctionnelle, directement consécutive à une exposition en situation accidentelle (exposition unique et de courte durée ayant pour conséquence des séquelles invalidantes).

Les « effets létaux » correspondent à la survenue de décès chez la plupart des individus.

Le « seuil des effets irréversibles » correspond à la concentration maximale de toxique dans l'air pour un temps d'exposition donné en dessous de laquelle chez la plupart des individus on n'observe pas d'effets irréversibles. Les seuils des effets irréversibles (SEI) délimitent la « zone de dangers significatifs pour la vie humaine ».

Le « seuil des effets létaux » correspond à la concentration maximale de toxique dans l'air pour un temps d'exposition donné en dessous de laquelle chez la plupart des individus, on n'observe pas de décès. Les seuils des effets létaux (SEL) correspondant à une CL 1% délimitent la « zone des dangers graves pour la vie humaine ».

Les « seuils des effets létaux significatifs » (SELS) correspondant à une CL 5% délimitent la « zone des dangers très graves pour la vie humaine ».

2. CHOIX DES MODELES

2.1 CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION CONSECUTIFS A L'ECLATEMENT D'UNE CAPACITE

Les effets de surpression sont modélisés selon la méthode décrite dans le guide Q15 de l'INERIS « Les éclatements de réservoirs – Phénoménologie et modélisation des effets » - Octobre 2013.

La première phase du calcul consiste à déterminer l'énergie E libérée par la détente du gaz comprimé. Celle-ci est donnée par la formule suivante :

$$E = (P_1 - P_a) \cdot \frac{V_g}{\gamma_1 - 1}$$

Avec :

- E énergie libérée par la détente du gaz comprimé, en J,
- P₁ pression absolue du gaz à la rupture, en Pa,
- P_a pression atmosphérique, en Pa,
- V_g volume du gaz dans la capacité, en m³,
- γ₁ rapport des chaleurs spécifiques du gaz (capacités calorifiques).

La loi de décroissance de la surpression aérienne en champ lointain est donnée par la courbe d'indice 10 de la méthode Multi-Energy à partir de l'énergie ainsi calculée.

L'outil PROJEX de la plateforme PRIMARISK développé par l'INERIS est utilisé pour modéliser ce type de phénomène dangereux.

2.2 CALCUL DES EFFETS THERMIQUES ET DE SURPRESSION CONSECUTIFS A UNE DISPERSION ATMOSPHERIQUE DE GAZ INFLAMMABLE

Les calculs de dispersion sont effectués avec le logiciel PHAST 8.7 de DNVGL.

2.2.1 Caractérisation du terme source

Les modèles utilisés sont différents selon les configurations accidentelles étudiées. Les paragraphes ci-dessous développent des critères de choix couvrant les situations générales, mais des configurations particulières peuvent apparaître et doivent être étudiées au cas par cas.

Le modèle « Vessel / Pipe Source » permet de couvrir la majorité des configurations rencontrées habituellement. Il comporte plusieurs options, présentées brièvement ci-dessous.

- α l'option « Leak » permet de déterminer le débit d'une brèche ayant lieu sur la paroi d'une ligne,
- α l'option « Short Pipe » permet de modéliser les ruptures de ligne,
- α l'option « Long pipeline » est utilisée lorsque l'on souhaite étudier les conditions de vidange d'une canalisation, en sommant les contributions amont et aval.

2.2.2 Calcul de la distance à la Limite Inférieure d'Explosivité (LIE)

Les calculs sont effectués avec le logiciel PHAST.

2.2.3 Calcul des effets thermiques lors d'un jet enflammé

Les modèles à retenir varient selon le type de rejet :

- α pour un rejet gazeux non horizontal : Chamberlain,
- α pour un rejet gazeux horizontal : Johnson,
- α pour un rejet liquide ou diphasique : Cook.

2.2.4 Calcul des effets de surpression en cas d'explosion de nuage

2.2.4.1 Préambule

Les effets de surpression d'une explosion d'un nuage de gaz sont évalués à l'aide de la méthode multi énergie développée par le TNO. La description de la méthode présentée ci-après est issue de la fiche 3 de la 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.

Selon la méthode Multi-Energy, l'explosion de gaz est considérée comme un ensemble « d'explosions élémentaires » se déroulant chacune dans les diverses zones qui composent le nuage explosible.

Elle a des conséquences différentes selon qu'elle se déroule en champ libre ou en milieu encombré et / ou confiné.

Lorsque l'explosion a lieu en champ libre, les seuls effets de surpression attendus pourraient être dus aux turbulences engendrées par la vitesse du jet. Cela concerne la partie du nuage la plus proche du rejet.

En présence d'obstacles augmentant la turbulence et/ou de surfaces freinant l'expansion des gaz brûlés, les surpressions peuvent être sensiblement augmentées.

2.2.4.2 Caractérisation de l'explosion en zone encombrée / confinée

L'explosion est principalement caractérisée par le volume inflammable (ou la masse explosible) et sa sévérité.

Choix de l'indice de sévérité :

Pour choisir l'indice, il convient de tenir compte des nombreux paramètres qui ont une influence sur la vitesse de propagation des flammes, parmi lesquels peuvent être cités :

- α la densité d'obstacles,
- α le degré de confinement,
- α la forme et les dimensions du nuage inflammable,
- α la réactivité du combustible,
- α l'énergie et la position de la source d'inflammation,
- α et la turbulence du mélange réactif avant allumage.

Dans le cadre d'une application de la méthode Multi-Energie, la « violence » de chaque explosion élémentaire peut ensuite être caractérisée par un indice compris entre 1 et 10. L'indice 10 correspond à une détonation, les indices intermédiaires correspondant à des déflagrations à des vitesses de flammes d'autant plus rapides que l'indice est élevé. En d'autres termes, ces indices caractérisent la puissance avec laquelle l'énergie des gaz inflammables est consommée pour engendrer des surpressions aériennes.

La correspondance entre les indices compris entre 1 et 10 et les niveaux de surpression maximum est rappelée dans le tableau suivant.

Indice de la méthode	Surpression maximale correspondante en mbar	Indice de la méthode	Surpression maximale correspondante en mbar
1	10	6	500
2	20	7	1000
3	50	8	2000
4	100	9	5000
5	200	10	10000

Tableau 6 : Correspondance entre indices et surpressions maximales

Des méthodes sont proposées pour aider au choix de l'indice à retenir. Elles sont issues des travaux de Kinsella [1993] et de Baker [1994] présentés ci-dessous.

Méthode de Kinsella :

Energie d'inflammation		Degré d'encombrement			Degré de confinement		Indice
Faible	Forte	Fort	Faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
	X	X			X		7 - 10
	X	X				X	7 - 10
X		X			X		5 - 7
	X		X		X		5 - 7
	X		X			X	4 - 6
	X			X	X		4 - 6
X		X				X	4 - 5
	X			X		X	4 - 5
X			X		X		3 - 5
X			X			X	2 - 3
X				X	X		1 - 2
X				X		X	1

Tableau 7 : Choix de l'indice de violence d'explosion selon (Kinsella, 1993)

Dans ce tableau, l'énergie d'inflammation est à considérer comme :

- α forte lorsqu'une explosion confinée peut être à l'origine de l'inflammation du nuage,
- α faible lorsque la source d'inflammation potentielle se limite aux sources courantes comme les surfaces chaudes, les étincelles,...

Le degré d'encombrement est :

- α fort lorsque le volume des obstacles correspond à plus de 30 % du volume total de la zone encombrée, l'espace entre obstacles étant inférieur ou égal à 3 m,
- α faible lorsque des obstacles existent mais que les conditions précédentes ne sont pas simultanément satisfaites,
- α et inexistant lorsqu'il n'y a pas d'obstacle dans le nuage inflammable.

Le confinement est à considérer de façon « binaire » comme :

- α existant lorsque le nuage inflammable est confiné par des surfaces solides sur 2 à 3 faces,
- α et inexistant si la seule surface solide à considérer est le sol.

A noter que cette méthode ne tient pas compte de la réactivité du produit.

Méthode de Baker :

Expansion de flamme dans une dimension				
Réactivité	Haute Moyenne Faible	Densité d'obstacle		
		Elevée	Moyenne	Faible
		> 10000 mbar	> 10000 mbar	> 10000 mbar
		8000 mbar	4000 mbar	2000 mbar
		8000 mbar	2000 mbar	400 mbar
Expansion de flamme dans deux dimensions				
Réactivité	Haute Moyenne Faible	Densité d'obstacle		
		Elevée	Moyenne	Faible
		4000 mbar	2000 mbar	1000 mbar
		3000 mbar	1200 mbar	70 mbar
		1200 mbar	700 mbar	40 mbar
Expansion de flamme dans trois dimensions				
Réactivité	Haute Moyenne Faible	Densité d'obstacle		
		Elevée	Moyenne	Faible
		1000 mbar	150 mbar	40 mbar
		200 mbar	70 mbar	10 mbar
		150 mbar	70 mbar	10 mbar

Tableau 8 : Choix de l'indice de violence d'explosion selon (Baker, 1994)

La réactivité est donnée par la vitesse laminaire. La méthode de Baker propose trois classes de combustibles :

- α les combustibles très réactifs au nombre de 4, à savoir l'hydrogène, l'acétylène et les oxydes d'éthylène ou de propylène,
- α les combustibles faiblement réactifs que sont les seuls méthane et monoxyde de carbone,
- α et les combustibles de réactivité moyenne qui correspondent à tous les autres gaz combustibles que ceux susmentionnés.

La densité d'obstacles est définie à partir des variables :

- α BR pour « Blockage Ratio », qui représente l'aire occupée par les solides sur l'aire totale offerte aux gaz dans les différentes directions de propagation des flammes,
- α et P pour « pitch » qui correspond à la distance entre 2 rangées successives d'obstacles.

Trois classes de densité d'obstacles sont aussi considérées :

- α une densité d'obstacles faible lorsque BR est inférieur à 10 % et que le lieu d'explosion ne comporte qu'une à deux rangées d'obstacles,
- α une densité forte lorsque BR est supérieur à 40 % et qu'il existe au moins 3 rangées d'obstacles,
- α et une densité moyenne dans tous les autres cas.

Détermination du volume inflammable :

Il s'agit dans cette étape de superposer le profil du nuage inflammable à la cartographie des zones encombrées. Plusieurs cas peuvent se présenter :

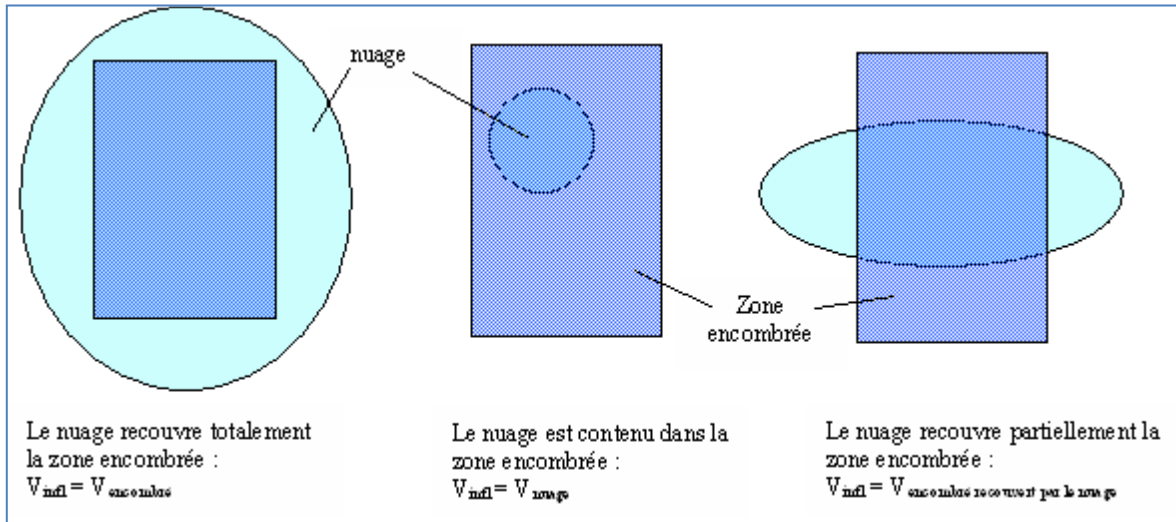


Figure 1 : Cas de superposition du nuage inflammable sur les zones encombrées

Cette comparaison doit également être effectuée dans la hauteur. Les obstacles ne sont pris en compte que sur la hauteur du nuage.

Cependant, lorsqu'un nuage envahit une zone encombrée avec une vitesse élevée (supérieure à celle du vent), des phénomènes de déflexion et de re-circulation induits par les obstacles peuvent conduire celui-ci à occuper un volume supérieur à celui qui serait calculé par la stricte superposition du nuage sur le plan des zones encombrées. Ces phénomènes sont à considérer au cas par cas.

En théorie, le volume des zones encombrées est calculé en retranchant le volume des obstacles. Le taux d'encombrement est souvent difficile à estimer, mais il est en général plus faible que l'intuition le laisserait supposer.

La précision requise sur le calcul du volume inflammable est assez relative. Comme il intervient à la puissance 1/3 dans le calcul de la surpression, un écart de 10 % sur le volume inflammable induit une erreur d'environ 3 % sur le calcul de la distance à un seuil de surpression donnée.

2.2.4.3 Caractérisation de l'explosion en champ libre

En champ libre, la totalité de la masse explosible contenue dans le nuage participe à l'explosion dont le centre se situe à la distance à la moitié de la LIE.

En champ libre, comme indiqué précédemment, la turbulence du jet peut conduire localement à des surpressions. Sur la base de la littérature spécialisée consultée, il est considéré qu'un indice 3 permettrait de prendre en compte ce phénomène. Cependant, le retour d'expérience indique qu'un indice de 4 est souvent retenu dans une approche majorante. Celui-ci sera donc retenu bien qu'aucune donnée n'ait pu être trouvée dans la bibliographie pour conforter cette approche.

Les valeurs indiquées pour les zones de danger associées aux pertes de confinement correspondent donc à :

$$D50 = d50 + \text{distance à la LIE} / 2$$

$$D20 = d50 \times 2 + \text{distance à la LIE} / 2$$

Avec :

d50 : distance d'effet de surpression associée au seuil de 50 mbar depuis le centre de l'explosion,
D50 / D20 : distance d'effet de surpression associée aux seuils de 50 mbar / 20 mbar depuis le point de rejet.

Ces éléments sont représentés sur le schéma ci-après.

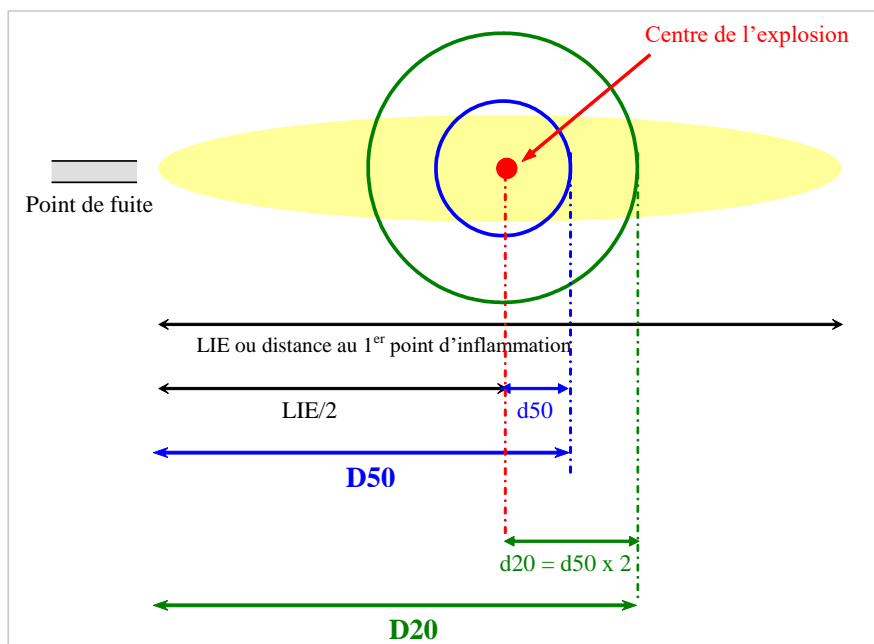


Figure 9 : Distances d'effets pour l'explosion en champ libre

Dans l'étude de dangers, les distances sont données à partir du point de rejet.



24 avenue Georges Brassens - 31700 Blagnac

+ 33 (0) 5 34 36 88 22

info@alphare-fasis.fr – www.alphare-fasis.fr