



DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION POUR LA POURSUITE
D'EXPLOITATION DE L'ISDND DE PRECILHON (64)

Annexes de l'étude de dangers



A2/C/PEIP – Novembre 2016



1 Modélisation des effets de surpression

ANNEXE 1 :

MODELISATION DES EFFETS DE SURPRESSION

Annexe – Analyse du risque « explosion »

Modélisation des effets de surpression

1	MODELE DE CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION.....	2
1.1	PRELIMINAIRES – CHOIX DU MODELE	2
1.2	ÉTAPE 1 : DETERMINATION DE L'ÉNERGIE DE L'EXPLOSION	2
1.2.1	<i>Explosion en atmosphère confiné – Equation de Brode</i>	2
1.2.2	<i>Explosion en atmosphère non confiné</i>	3
1.3	ÉTAPE 2 : DETERMINATION DES DISTANCES DES EFFETS DE SURPRESSION – MODELE MULTI-ÉNERGIE	5
1.3.1	<i>Description du modèle multi-énergie</i>	5
1.3.2	<i>Choix de l'indice de violence</i>	6
1.3.3	<i>Détermination de la distance réduite R' pour une valeur de surpression donnée</i>	7
2	ANALYSE DU RISQUE EXPLOSION LIE A UN FUITE DE GAZ DANS UN LOCAL	10
2.1	DONNEES ET HYPOTHESES DE CALCUL.....	10
2.1.1	<i>Description du scénario d'explosion</i>	10
2.1.2	<i>Caractéristiques du combustible</i>	10
2.2	DETERMINATION DES ZONES DE DANGERS	11

1 MODELE DE CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION

1.1 Préliminaires – Choix du modèle

Les méthodes simples d'évaluation des conséquences des explosions ne sont jamais prévues pour traiter à la fois des aspects à la fois mécaniques (ondes de pression) et thermiques. Ainsi, dans cette étude ne seront abordés que les calculs dédiés aux ondes de pression.

La méthode permettant de déterminer les effets de pression dans le cas d'une explosion repose sur :

- la détermination de l'énergie disponible lors de l'explosion,
- la méthode multi-énergie pour évaluer l'atténuation des effets de pression.

Cette démarche a l'avantage d'être applicable aussi bien pour les explosions à l'air libre (UVCE) que pour l'évaluation des effets de surpression liés à l'éclatement d'un réservoir (atmosphère confinée).

L'idée centrale des méthodes basées sur le concept multi-énergie est qu'une explosion de gaz produit des effets d'autant plus importants qu'elle se développe dans un environnement encombré ou turbulent dans lequel la flamme peut se propager rapidement et qu'en dehors de ces zones, les effets de pression associés à la propagation de flamme sont minimes.

Le principe de la méthode multi-énergie et la méthodologie appliquée pour la détermination de l'énergie disponible d'explosion sont détaillées ci-après.

1.2 Etape 1 : Détermination de l'énergie de l'explosion

1.2.1 Explosion en atmosphère confinée – Equation de Brode

La détermination de l'énergie de l'explosion de gaz s'effectue à partir de l'équation de Brode :

$$E = \frac{1}{\gamma - 1} \times V \times (P_{ex} - P_{atm})$$

- Où :
- E = énergie de l'explosion (en Joule)
 - γ = Gamma (rapport des capacités thermiques massiques du gaz considéré)
 - V = Volume de l'enceinte considéré (en m³)
 - $P_{ex} - P_{atm}$ = Pression relative de l'explosion (en Pa)
 - P_{ex} = Pression absolue de l'explosion (en Pa)
 - P_{atm} = Pression atmosphérique (en Pa)

Dans une approche dimensionnante, on retiendra comme pression relative $P_{ex} - P_{atm}$ d'une explosion primaire :

- Si le volume est correctement éventé : $P_{ex} - P_{atm} = P_{redmax}$ (la pression d'explosion réduite utilisée pour calculer la surface d'évent).
- Si le volume est non éventé : $P_{ex} - P_{atm} = 2 * P_{rupture}$ (où $P_{rupture}$ est la pression statique de rupture de l'enceinte).

1.2.2 Explosion en atmosphère non confiné

1. Détermination du débit de fuite

Le débit massique de fuite d'un gaz à travers un orifice peut être estimé à partir de l'équation généralisée suivante (Yellow Book, TNO, 2005) :

$$q_s = C_d \times A_h \times \Psi \times \sqrt{(\rho_0 \times P_0 \times \gamma \times (2/(\gamma + 1))^{(\gamma+1)/(\gamma-1)})}$$

Où :

- q_s = Débit massique de fuite (en kg/s)
- C_d = Coefficient de trainée (sans unité)
- A_h = Section de la brèche (en m²)
- Ψ = coefficient de fuite (sans unité)
- γ = Gamma
- $\rho_{réf}$ = Masse volumique du gaz aux conditions $T_{réf}$ et P_{atm} (kg /m³)
- ρ_0 = Masse volumique du gaz aux conditions T_o et P_o (kg /m³)
 - $\rho_0 = \rho_{réf} \times \frac{T_{réf}}{T_o} \times \frac{P_o}{P_{atm}}$
- P_o = Pression de service (en Pa)
- P_{atm} = Pression atmosphérique (en Pa)
- $T_{réf}$ = Température de référence (en K)
- T_o = Température de service (en K)

Le facteur Ψ^2 dépend de la nature du flux de gaz, s'il est critique ou non. Le flux est dit critique (ou supersonique) lorsque :

$$P_o/P_a \geq ((\gamma+1)/2)^{(\gamma/(\gamma-1))}$$

Si le flux est critique : $\Psi^2 = 1$

Si le flux est subsonique (ou sub-critique) :

$$\Psi^2 = 2/(\gamma-1) \times ((\gamma+1)/2)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \times (P_a/P_o)^{2/\gamma} \times (1-(P_a/P_o)^{((\gamma-1)/\gamma)})$$

2. Détermination de la masse explosive

La masse de gaz inflammable est déterminée suivant la formule :

$$m_{inf} = q_s \times \Delta t$$

Où :

- q_s = Débit massique de fuite (en kg/s)
- Δt = Délai d'ignition

Le délai d'allumage de la masse de gaz considéré est généralement de 60 s. Ce délai est justifié par l'étude de Lannoy (Analyse des explosions air – hydrocarbures en champs libre, 1984), qui indique que statistiquement, le délai d'allumage est généralement court, c'est-à-dire inférieur à 1 min dans 69% des cas étudiés. Les fuites de gaz sont en effet souvent associées à des interventions ou à des travaux, ou bien ont lieu en zone urbaine, qui offrent autant de sources d'ignition potentielles. On notera également qu'un nombre significatif de fuites de gaz ne rencontre pas de source d'ignition et ne produit pas d'explosion.

3. Détermination du volume du nuage à la stœchiométrie

Le volume du nuage de vapeurs dans les conditions stœchiométriques est déterminé comme suit (cf Yellow Book, TNO, 2005) :

$$V_n = \frac{m_{\text{inf}}}{\rho_{\text{réf}} \times C_s}$$

Où :

- V_n = volume du nuage de gaz dans les conditions stœchiométriques (en m^3)
- $\rho_{\text{réf}}$ = Masse volumique du gaz dans les conditions ambiantes (kg / m^3)
- C_s = Concentration de gaz à la stœchiométrie (en %)

4. Détermination de l'énergie d'explosion

L'énergie de combustion de la charge explosive, dans le cadre d'un espace libre de tout encombrement, est alors obtenue comme suit :

$$E = E_{\text{gaz}} = V_n \times \Delta H_c$$

Où :

- E = Energie disponible lors de l'explosion (en J)
- V_n = volume du nuage de gaz dans les conditions stœchiométriques (en m^3)
- ΔH_c = chaleur de combustion dans les conditions stœchiométriques (en J / m^3)

1.3 Etape 2 : Détermination des distances des effets de surpression – Modèle Multi-Energie

1.3.1 Description du modèle multi-énergie

Les principes de base sur lesquels repose cette méthode sont directement inspirés des mécanismes qui gouvernent le déroulement des explosions de gaz.

L'idée centrale des méthodes basées sur le concept multi-énergie est qu'une explosion de gaz produit des effets d'autant plus importants qu'elle se développe dans un environnement encombré ou turbulent dans lequel la flamme peut se propager rapidement et qu'en dehors de ces zones, les effets de pression associés à la propagation de flamme sont minimes.

Ainsi, pour comprendre la méthode Multi-Energie, il convient tout d'abord de garder à l'esprit qu'une explosion de gaz n'est susceptible d'engendrer de fortes surpressions que si :

- les flammes atteignent une vitesse de propagation importante (plusieurs dizaines de m/s),
- ou si les gaz sont confinés par des parois solides.

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

- la densité d'obstacles,
- le degré de confinement,
- la forme et les dimensions du nuage inflammable,
- la réactivité du combustible,
- l'énergie et la position de la source d'inflammation,
- 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. A chaque indice correspond un niveau de surpression maximum.

Les niveaux maximum et les courbes d'atténuation de la surpression en fonction de la distance sont donnés, pour chaque indice, sur des abaques.

1.3.2 Choix de l'indice de violence

S'agissant de l'utilisation de la méthode Multi-Energie, déterminer la ou les surpressions maximales revient à choisir un « indice de violence » pertinent parmi les 10 proposés. Pour mémoire la correspondance entre les indices compris entre 1 et 10 et les niveaux de surpression maximum est rappelée dans le tableau suivant.

Tableau : Correspondance entre indices et surpressions maximales

Indice de la méthode (-)	Surpression maximale correspondante	
	(kPa)	(mbar)
1	1	10
2	2	20
3	5	50
4	10	100
5	20	200
6	50	500
7	100	1000
8	200	2000
9	500	5000
10	2000	20000

Au cours du temps, différentes recommandations ont été proposées pour les choix d'indice mais parmi les recommandations les plus largement employées se trouve celle proposée par Kinsella (Kinsella, 1993). En se basant sur l'analyse des accidents dits « majeurs » passés, Kinsella a proposé de choisir les indices de violence d'explosion en considérant :

- l'énergie d'inflammation,
- le degré d'encombrement dû aux obstacles solides,
- et le degré de confinement.

Ces recommandations sont traduites dans le tableau reporté en page suivante.

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

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

Le degré d'encombrement est :

- 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 ;
- faible lorsque des obstacles existent mais que les conditions précédentes ne sont pas simultanément satisfaites,
- et inexistant lorsqu'il n'y a pas d'obstacle dans le nuage inflammable.

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

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

Tableau : Choix de l'indice de violence selon Kinsella (1993)

Energie d'inflammation		Le degré d'encombrement			Le degré de confinement		Indice
faible	forte	fort	faible	inexistant	existant	inexistant	
	×	×			×		7 - 10
	×	×				×	7 - 10
×		×			×		5 - 7
	×		×		×		5 - 7
	×		×			×	4 - 6
	×			×	×		4 - 6
×		×				×	4 - 5
	×			×		×	4 - 5
×			×		×		3 - 5
×			×			×	2 - 3
×				×	×		1 - 2
×				×		×	1

1.3.3 Détermination de la distance réduite R' pour une valeur de surpression donnée

Dans le cas de la méthode multi-énergie, à chaque indice de violence, noté de 1 à 10, est associée une courbe de décroissance des surpressions aériennes.

Les paramètres d'explosion représentés sur l'abaque en page suivante sont :

- la surpression maximale rapportée à la pression atmosphérique :

$$P_s' = \frac{\Delta P}{P_{atm}}$$

- la distance réduite r' (en m) qui est le rapport entre la distance R (en m) (entre le point considéré et le centre de l'explosion) sur la racine cubique de l'énergie de combustion de la charge explosive E (en J) sur la pression atmosphérique (en Pa) :

$$r' = \frac{R}{(E / P_{atm})^{1/3}}$$

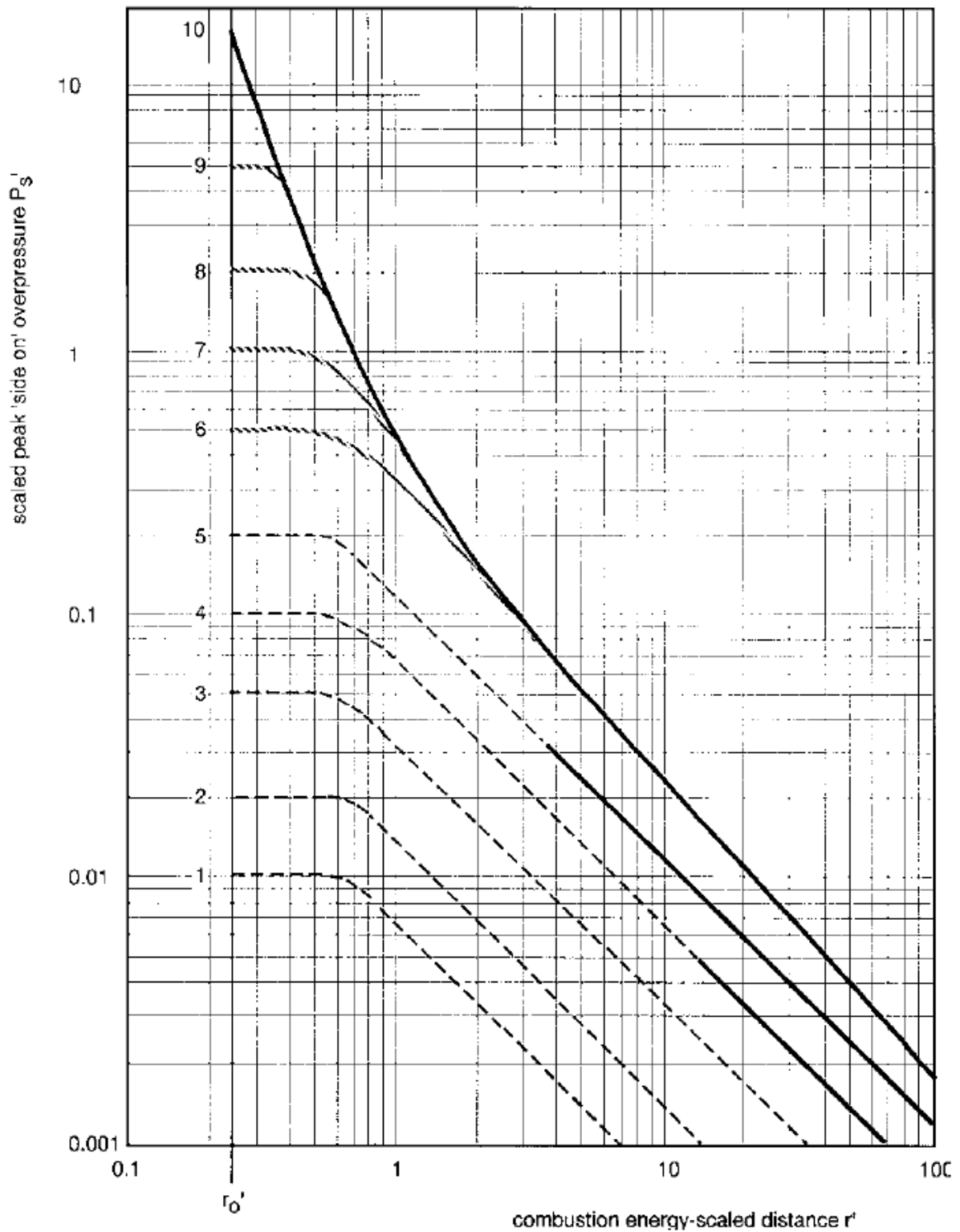
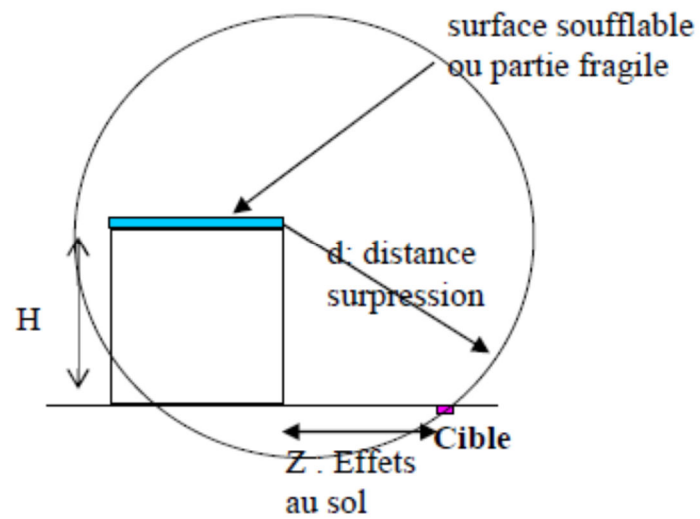


Figure : Abaque relatif à la méthode multi-énergie de décroissance des surpressions aériennes

Lors de l'explosion de cellules, l'onde de surpression qui se forme est de forme sphérique centrée sur le toit de la cellule. Les effets au sol sont alors évalués en retranchant la hauteur des cellules à la distance d'effets calculée ci-avant. Il convient de souligner que ce raisonnement ne peut être accepté que s'il est démontré que le fût de la cellule résistera à l'onde de surpression partant du toit (si le fût résiste, il canalise en effet l'explosion vers le haut).

Si la distance des effets est inférieure à la hauteur de la cellule, la distance d'effet en pied de cellule est de 0 mètre.

Si la distance des effets est supérieure à la hauteur de la cellule, la distance d'effet en pied de cellule est alors de $Z = \sqrt{d^2 - H^2}$ (application du théorème de Pythagore).



2 ANALYSE DU RISQUE EXPLOSION LIE A UN FUITE DE GAZ DANS UN LOCAL

2.1 Données et hypothèses de calcul

2.1.1 Description du scénario d'explosion

Le volume de la poche de gaz est déterminé à partir du scénario suivant : une explosion dans le local suite à une rupture de la canalisation de gaz.

Le volume libre dans les locaux est pris égal à 100 m³.

Deux types d'évènements peuvent être envisagés au cours du fonctionnement de l'installation :

- rupture guillotine de la canalisation d'amenée du gaz provenant d'une agression mécanique (véhicules, travaux ...)
- fuites au niveau des brides, de presse-étoupe de vannes ou de joints.

Le principal risque de formation d'une ATEX est lié à des défauts d'étanchéité des brides, de presse-étoupe de vannes ou des joints. Le scénario de type rupture guillotine est quant à lui très peu probable.

Dans le cadre de l'étude, on considère donc une fuite au niveau des joints de la canalisation de gaz (assimilé dans tous les cas à 50 % de méthane – hypothèse majorante, le biogaz sur le site de Précilhon ayant en moyenne une teneur de 41 % de CH₄), le volume en méthane dans le local augmente ensuite jusqu'à atteindre la LIE, volume de gaz qui explose en présence d'une source d'ignition.

Remarque : Ce scénario suppose que :

- la pression dans la canalisation de gaz ne chute pas car une baisse de pression entraînerait l'arrêt de l'alimentation en gaz,
- le système de détection de CH₄ dans le local ne fonctionne pas.

2.1.2 Caractéristiques du combustible

Dans le cadre du projet, le combustible considéré est le méthane dont les caractéristiques sont rappelées dans le tableau suivant :

Tableau : Caractéristiques du méthane (Source : Yellow Book, TNO, 2005)

Masse volumique (à 15 °C et à P = 1 atm)	Gamma	Température d'auto-inflammation	Caractéristiques d'explosivité			Chaleur de combustion pour un mélange stœchiométrique avec l'air
			Limite inférieure d'explosivité	Concentration stœchiométrique avec l'air	Limite supérieure d'explosivité	
0,68 kg/m ³	1,305	595 °C	5 %	9,5 %	15 %	3,23 MJ / m ³

2.2 Détermination des zones de dangers

1. Détermination du volume du nuage à la LIE et de l'énergie de combustion

	Valeurs	Commentaires
Concentration en méthane à la LIE (en %)	5 %	Caractéristiques du méthane
Chaleur de combustion du mélange air / méthane à la LIE (en J)	1 700 000	
Masse volumique du méthane (en kg/m ³)	0,68	Données pour des conditions ambiantes (T = 15 °C et P = P _{atm})
Volume du nuage de vapeurs (en m ³)	100	-
Masse de gaz inflammable (en kg)	3,4	
Energie d'explosion (en J)	1,7E+08	Pas d'obstacle considéré
Energie d'explosion (en MJ)	170	

2. Détermination de l'indice de violence

En se basant sur les recommandations de Kinsella, l'indice de violence retenu est de 5 dans le cas de figure considéré :

- énergie d'inflammation = faible,
- degré d'encombrement dû aux obstacles solides = fort,
- nuage inflammable en milieu confiné (cependant parois des locaux de combustion facilement soufflables).

3. Résultats de la modélisation des effets de surpression

Les résultats de la modélisation des effets de surpression obtenus avec les hypothèses spécifiées ci-dessus sont présentés dans le tableau suivant :

Energie d'explosion (en J)	170 000 000		
Pression atmosphérique (en Pa)	101 325		
Indice de violence	5		
Surpression (en mbar)	200 mbar	140 mbar	50 mbar
Distance réduite (en m)	0,5	0,9	1,2
Distance R (en m)	5,9	10,7	14,3



IDE Environnement®

Siège Social :

4, rue Jules Védrières – 31 031 Toulouse Cedex 04

Tél : 05 62 16 72 72 - fax : 05 62 16 72 79

Agence de Bordeaux :

Rue des Terres Neuves Bat 19 – 33130 Bègles

Tél : 05 40 13 03 44 - fax : 05 62 16 72 79