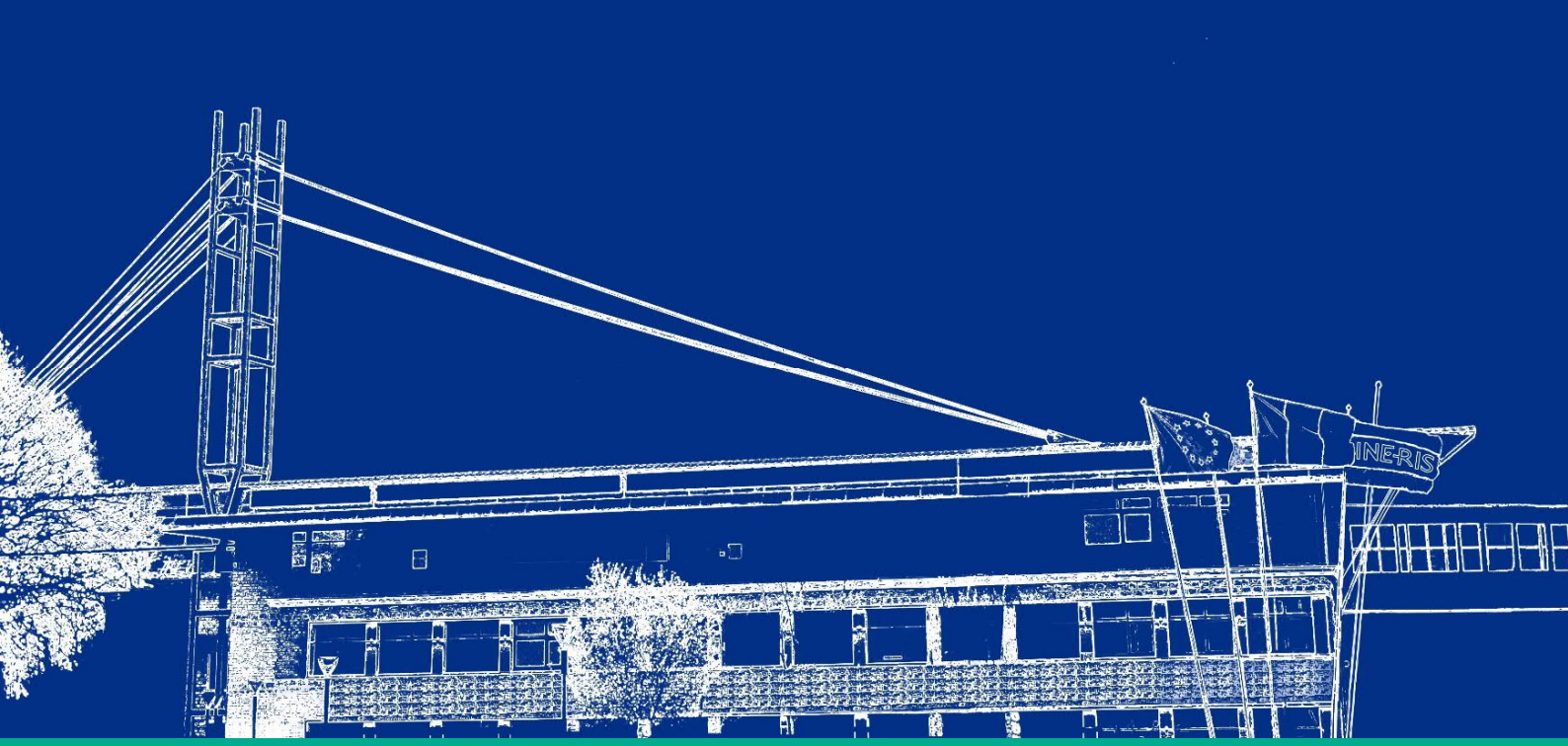


(ID Modèle = 454913)

Ineris - 201450 - 2508532 - v1.0

02/02/2021

Effet d'atténuation d'un mur sur les effets de surpression d'une explosion

Proposition d'un outil simple de prédiction de l'effet d'atténuation

MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE

Capitalisation des connaissances

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction des Risques Accidentels

Rédaction : HEUDIER Laure - DAUBECH JEROME

Vérification : LEPRETTE EMMANUEL; PROUST CHRISTOPHE

Approbation : Document approuvé le 02/02/2021 par PIQUETTE BERNARD

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1 Contexte 4

2 Présentation succincte des essais réalisés 5

3 Proposition d'un outil simple de prédiction de l'effet atténuateur d'un mur sur les surpressions produites par une explosion 7

3.1 Estimer le ratio λ/Hmur 7

3.2 Calculer l'effet protecteur 8

3.2.1 Définition du coefficient d'atténuation 9

3.2.2 Présentation des abaques 9

4 Exemples d'utilisation 12

4.1 Cas de l'explosion d'un nuage de propane de 2000 m3 12

4.2 Cas de l'explosion d'un nuage de propane de 50 tonnes 12

5 Synthèse 14

1 Contexte

Afin de pouvoir répondre au mieux aux nombreuses sollicitations de l'administration ou d'industriels soucieux de connaître l'effet protecteur d'un mur sur les effets de pression produits par une explosion, l'INERIS a travaillé plusieurs années sur ce sujet dans le cadre du programme d'appui aux politiques publiques DRA 08, relatif à l'*Évaluation des phénomènes dangereux (dispersion, incendie, explosion) et leurs conséquences*.

L'objectif de ces travaux était de déterminer l'amplitude et l'étendue de l'éventuel effet protecteur d'un mur sur les niveaux de pression produits par une explosion, typiquement dans la zone 50-200 mbar.

L'analyse des données expérimentales de la littérature a permis d'identifier les paramètres estimés pertinents, tels que la hauteur du mur et la longueur d'onde de l'explosion, directement liée à sa durée. À l'issue de cette étude bibliographique, deux campagnes d'essais, à petite et moyenne échelle, ont été menées par l'INERIS pour produire des données expérimentales manquantes permettant de mieux appréhender le phénomène.

Ce programme expérimental a été complété par un programme de simulations numériques, calées sur l'expérience, qui ont permis d'extrapoler les résultats à des situations non testées.

L'exploitation de l'ensemble de ces données d'essais a permis d'établir des abaques de prédiction de l'effet protecteur d'un mur vis-à-vis des effets de surpression produits par une explosion, à destination des industriels et des inspecteurs des installations classées.

Ces abaques sont présentés dans ce rapport, après une rapide description des campagnes d'essais réalisées.

2 Présentation succincte des essais réalisés

À l'issue de l'étude bibliographique, le paramètre λ/H_{mur}, correspondant au rapport entre la longueur d'onde de l'explosion et la hauteur du mur, est apparu comme étant le paramètre clef pour prédire l'effet protecteur d'un mur sur les niveaux de surpression produits par l'explosion.

Pour pouvoir produire les données expérimentales manquantes et étudier l'influence de ce paramètre λ/H_{mur}**,** l'INERIS a mené deux campagnes expérimentales, mettant en œuvre des explosions de mélanges gazeux inflammables à base d'hydrogène ou d'explosifs, et une instrumentation permettant de mesurer les niveaux de pression en amont et en aval d'un mur de hauteur variable.

Les photographies suivantes illustrent les deux campagnes d'essais réalisées :

- une campagne expérimentale à petite échelle sur une table d'explosion (Figure 1) mettant en œuvre :
  - des mélanges inflammables de 2 L à 33 L ;
  - un mur de hauteur variable (10 à 70 cm) placé à 70 cm de l'inflammation ;
- une campagne expérimentale à moyenne échelle (Figure 2) mettant en œuvre :
  - des mélanges inflammables de 3,5 m^3 ou des charges explosives de 100 g de TNT ;
  - un mur de hauteur variable (1,80 m, 2,40 m ou 3,60 m) placé à 7 m de l'inflammation.

Figure 1 : Installation expérimentale pour la campagne d'essais à petite échelle

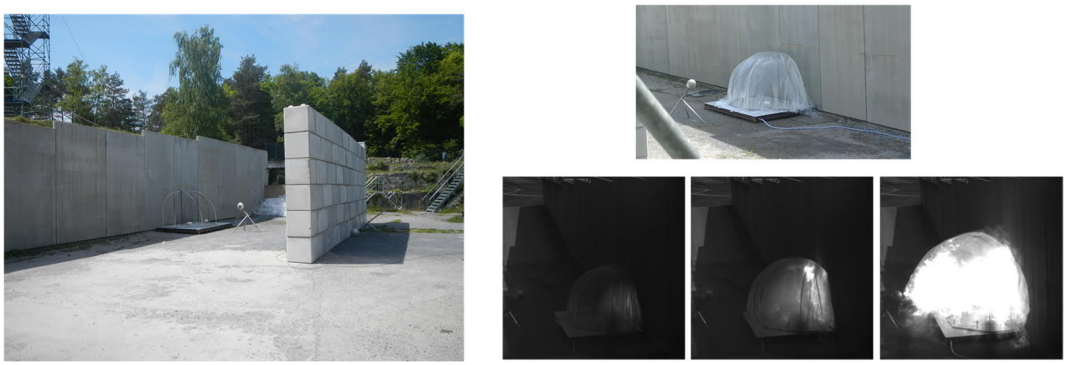


Figure 2 : Installation expérimentale pour la campagne d'essais à moyenne échelle

L'analyse des données d'essais a permis le développement d'un outil simple de prédiction de l'atténuation, derrière un mur, des niveaux de surpression produits par une explosion.

3 Proposition d'un outil simple de prédiction de l'effet atténuateur d'un mur sur les surpressions produites par une explosion

3.1 Estimer le ratio λ/Hmur

Les travaux menés ont permis de mettre en évidence que le ratio λ/H_{mur} (longueur d'onde / hauteur du mur) était un paramètre clef dans l'effet atténuateur d'un mur.

La première étape de prédiction de l'effet atténuateur d'un mur consiste donc à déterminer ce paramètre, et plus particulièrement la longueur d'onde, qui est directement liée à la durée de la phase positive de l'onde de pression.

La longueur d'onde correspond à la distance parcourue par le front d'onde pendant la durée de l'onde de pression. Etant donnés les niveaux de pression relativement faibles auxquels on s'intéresse (typiquement inférieurs à 200 mbar), on peut considérer que l'onde de pression se déplace à la vitesse du son, soit 340 m/s dans l'air.

La durée de l'onde de pression dépend de l'énergie d'explosion libérée (liée à la quantité de produit impliquée dans l'explosion), de la violence de l'explosion, et dans une moindre mesure, de la distance à la source.

Les durées des signaux de surpression mentionnées dans les tableaux du cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression[1] élaboré dans le cadre de la mise en œuvre des PPRT, peuvent être utilisées pour estimer les longueurs d'onde associées. Dans ce cahier applicatif, deux types d'explosions à l'air libre (UVCE) sont distingués, correspondant à deux niveaux de violence d'explosion :

- les UVCE de type 1, qui correspondent à des explosions présentant un indice de violence (selon la méthode multi-énergie)
  - inférieur ou égal à 5 (surpression maximale de 200 mbar) pour les gaz et les liquides inflammables,
  - compris entre 6 et 8 (surpression maximale comprise entre 500 mbar et 2 bar) pour une explosion d'hydrogène ;
- les UVCE de type 2, qui correspondent à des explosions présentant un indice de violence (selon la méthode multi-énergie)
  - supérieur ou égal à 6 (surpression maximale d'au moins 500 mbar) pour les gaz et les liquides inflammables,
  - compris entre 9 et 10 (surpression maximale supérieure à 5 bar) pour une explosion d'hydrogène.

Les tableaux suivants rassemblent les données des tableaux du cahier applicatif évoqué ci-dessus et les résultats obtenus en termes de longueurs d'ondes associées aux différentes sollicitations en surpression mentionnées.

[1] Cahier applicatif du complément technique de la vulnérabilité du bâti aux effets de surpression, référencé INERIS-DRA-08-99461-15249A, téléchargeable sur www.Ineris.fr

Type d'explosion	Type de produits	Masse / (Volume inflammable)	Typologie du signal		Longueur d'onde (m)
			Forme du signal	Temps d'application (ms)	
UVCE type 1	Gaz inflammables Liquides inflammables	< 400 g (5 m3)	Déflagration	0 – 20	0 – 7
		400 g (5 m3) – 5 kg (65 m3)		20 – 50	7 – 17
		5 kg (65 m3) – 50 kg (650 m3)		50 – 100	17 – 34
		50 kg (650 m3) – 150 kg (2000 m3)		100 – 150	34 – 51
		150 kg (2000 m3) – 50 t (650 000 m3)		150 – 1000	51 – 340
		> 50 t (650 000 m3)		> 1000	> 340
	Hydrogène	< 2 kg (80 m3)	Déflagration	0 – 20	0 – 7
		2 kg (80 m3) – 30 kg (1500 m3)		20 – 50	7 – 17
		30 kg (1500 m3) – 230 kg (10000 m3)		50 – 100	17 – 34
		230 kg (10 000 m3) – 830 kg (38 000 m3)		100 – 150	34 – 51
		830 kg (38 000 m3) – 250 t (12 000 000 m3)		150 – 500	51 – 170

Tableau 1 : Caractéristiques des UVCE de type 1 et des ondes de pression associées

Type d'explosion	Type de produits	Masse / (Volume inflammable)	Typologie du signal		Longueur d'onde (m)
			Forme du signal	Temps d'application (ms)	
UVCE type 2	Gaz inflammables Liquides inflammables	< 5 kg (65 m3)	Déflagration	0 – 20	0 – 7
		5 kg (65 m3) – 100 kg (1300 m3)		20 – 50	7 – 17
		100 kg (1300 m3) – 700 kg (9000 m3)		50 – 100	17 – 34
		700 kg (9000 m3) – 2,5 t (32000 m3)		100 – 150	34 – 51
		2,5 t (22000 m3) – 750 t (10 000 000 m3)		150 – 1000	51 – 340
	Hydrogène	< 2 kg (80 m3)	Onde de choc	0 – 20	0 – 7
		2 kg (80 m3) – 30 kg (1500 m3)		20 – 50	7 – 17
		30 kg (1500 m3) – 230 kg (10000 m3)		50 – 100	17 – 34
		230 kg (10000 m3) – 830 kg (38000 m3)		100 – 150	34 – 51
		830 kg (38000 m3) – 250 t (12000000 m3)		150 – 500	51 – 170

Tableau 2 : Caractéristiques des UVCE de type 2 et des ondes de pression associées

Une fois la longueur d'onde λ estimée, le ratio λ/H_{mur} se calcule directement à partir de la hauteur de mur considérée.

3.2 Calculer l'effet protecteur

L'effet protecteur d'un mur au regard des effets de surpression produits par une explosion correspond :

- à l'atténuation des niveaux de surpression derrière le mur, en comparaison avec les niveaux de surpression atteints aux mêmes endroits en l'absence de mur ;
- à l'étendue de la zone de protection derrière le mur.

Des abaques permettant de prédire l'atténuation de la surpression en fonction de l'éloignement derrière le mur, ont été établis sur la base de données expérimentales et de modélisations, pour des ratios λ/H_{mur} compris entre 0 et 10.

3.2.1 Définition du coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation φ est défini comme étant le rapport entre la surpression engendrée en un point *x* donné en tenant compte de la présence du mur, et la surpression engendrée au même point en l'absence de mur, pour un même scénario d'explosion.

$$\varphi = \frac{\Delta P_{avec\ mur}(x)}{\Delta P_{sans\ mur}(x)}$$

Le coefficient d'atténuation est donc, par définition, compris entre 0 et 1.

Afin de tenir compte d'incertitudes liées aux données expérimentales et modélisations, on considère, de façon prudente, que si le coefficient d'atténuation est supérieur à 0,8, l'effet protecteur du mur devient négligeable.

3.2.2 Présentation des abaques

Les abaques de prédiction sont représentés sur la figure suivante. Chaque courbe tracée représente l'évolution du coefficient d'atténuation en fonction du ratio λ/H_{mur} pour une position derrière le mur, au sol, exprimée en nombre de hauteurs de mur.

Ainsi, la courbe rouge 0H correspond au point situé au pied du mur, juste derrière le mur. La courbe bleu turquoise 1H correspond au point situé derrière le mur, à une distance par rapport au mur de 1 fois la hauteur du mur. La courbe verte 2H correspond au point situé derrière le mur, à une distance par rapport au mur de 2 fois la hauteur du mur, et ainsi de suite… jusqu'à une distance derrière le mur de 6 fois la hauteur du mur.

Une fois le ratio λ/H_{mur} calculé, ces abaques permettent d'estimer le coefficient d'atténuation en différents points au niveau du sol, derrière le mur.

La droite en pointillés noirs représente la limite effective de l'atténuation, supposée négligeable pour des coefficients d'atténuation supérieurs à 0,8.

On constate ainsi qu'à partir d'un ratio λ/H_{mur} de 10, l'effet d'atténuation est négligeable.

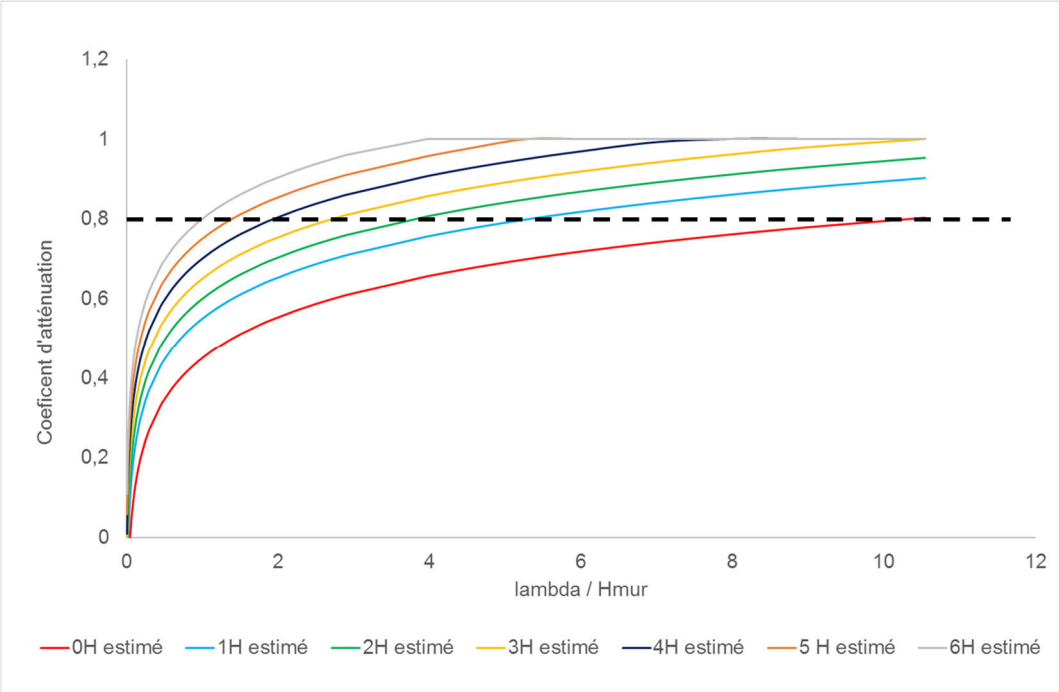


Figure 3 : Abaques de prédiction du coefficient d'atténuation derrière un mur en fonction du ratio λ/H_{mur}

La lecture de ces abaques montre que plus le ratio λ/H_{mur} est important, moins l'effet protecteur est important :

- l'étendue de la zone protégée derrière le mur diminue lorsque le ratio augmente ;
- le coefficient d'atténuation calculé au pied du mur (juste derrière le mur, à $0H_{mur}$) augmente lorsque le ratio augmente.

Le tableau suivant rassemble les principaux enseignements tirés des abaques.

λ/Hmur	Distance maximale de protection (n x H)	Coefficient d'atténuation au pied du mur
$\lambda/H_{mur} < 1$	5 H	0,4
$1 < \lambda/H_{mur} < 2$	4 H	0,5
$2 < \lambda/H_{mur} < 4$	2 H	0,6
$4 < \lambda/H_{mur} < 5$	1 H	0,7
$5 < \lambda/H_{mur} < 10$	Pied du mur (0 H)	0,8
$10 < \lambda/H_{mur}$	Pas d'effet protecteur	Pas d'atténuation

Tableau 3 : Principaux enseignements relatifs à l'effet protecteur tirés des abaques

Les lois analytiques qui ont permis de tracer ces abaques sont rassemblées dans le tableau suivant, et peuvent être mises en œuvre directement, sans passer par la lecture des abaques, en veillant à limiter la valeur maximale du coefficient d'atténuation φ à 1.

La position des points où peuvent être calculés les coefficients d'atténuation est comptée à partir du mur et exprimée en nombre de fois la hauteur du mur.

Position derrière le mur, à partir du mur	Coefficient d'atténuation φ
$0H_{mur}$	$\varphi = 0,15 * \ln(\lambda/H_{mur}) + 0,45$ si $\varphi < 1$, sinon $\varphi = 1$
$1H_{mur}$	$\varphi = 0,15 * \ln(\lambda/H_{mur}) + 0,55$ si $\varphi < 1$, sinon $\varphi = 1$
$2H_{mur}$	$\varphi = 0,15 * \ln(\lambda/H_{mur}) + 0,60$ si $\varphi < 1$, sinon $\varphi = 1$
$3H_{mur}$	$\varphi = 0,15 * \ln(\lambda/H_{mur}) + 0,65$ si $\varphi < 1$, sinon $\varphi = 1$
$4H_{mur}$	$\varphi = 0,15 * \ln(\lambda/H_{mur}) + 0,70$ si $\varphi < 1$, sinon $\varphi = 1$
$5H_{mur}$	$\varphi = 0,15 * \ln(\lambda/H_{mur}) + 0,75$ si $\varphi < 1$, sinon $\varphi = 1$
$6H_{mur}$	$\varphi = 0,15 * \ln(\lambda/H_{mur}) + 0,80$ si $\varphi < 1$, sinon $\varphi = 1$

Tableau 4 : Lois analytiques permettant de calculer le coefficient d'atténuation

4 Exemples d'utilisation

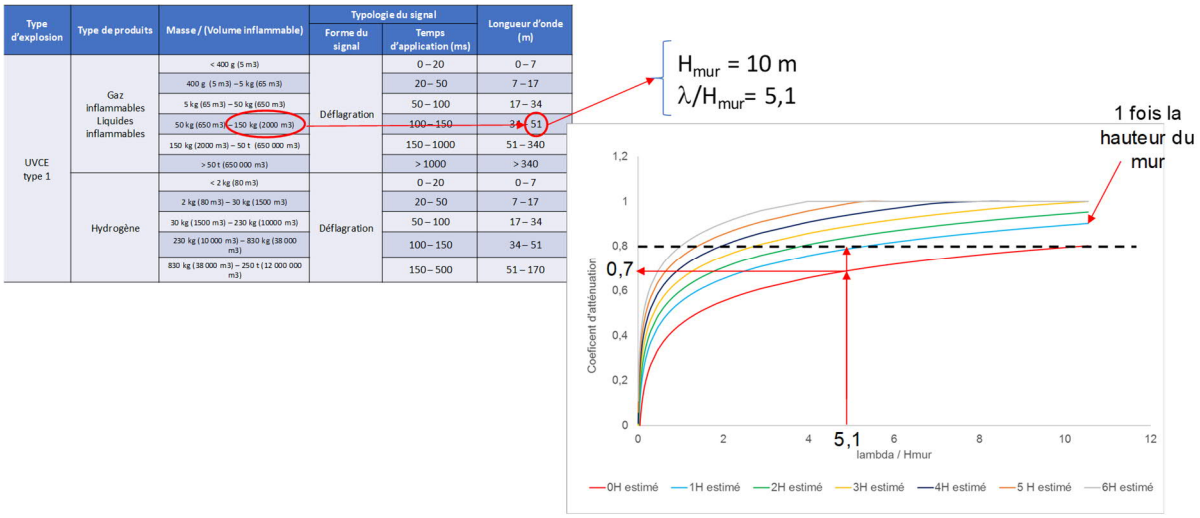
Ce chapitre présente deux exemples de mise en œuvre de l'outil simple de prédiction proposé dans ce rapport.

4.1 Cas de l'explosion d'un nuage de propane de 2000 m3

Un industriel souhaite protéger une cible des effets de l'explosion d'un nuage de propane de 2000 m^3, en construisant un mur de 10 m de haut.

En considérant qu'il s'agit d'un UVCE de type 1, on déduit du Tableau 1 que la longueur d'onde d'une telle explosion est de 51 m, ce qui entraîne un ratio λ/H_{mur} de 5,1.

La lecture des abaques, illustrée sur la figure suivante, prédit un coefficient d'atténuation juste derrière le mur, au pied du mur (à 0Hmur), de 0,7. Etant donné que l'on considère que l'effet d'atténuation est négligeable au-delà d'un coefficient d'atténuation de 0,8, la position de la droite en pointillés noirs montre que la zone de protection s'étend jusqu'à une fois la hauteur du mur.



Type d'explosion	Type de produits	Masse / (Volume inflammable)	Typologie du signal		Longueur d'onde (m)
			Forme du signal	Temps d'application (ms)	
UVCE type 1	Gaz inflammables Liquides inflammables	< 400 g (5 m3)	Déflagration	0 – 20	0 – 7
		400 g (5 m3) – 5 kg (65 m3)		20 – 50	7 – 17
		5 kg (65 m3) – 50 kg (650 m3)		50 – 100	17 – 34
		50 kg (650 m3) – 150 kg (2000 m3)		100 – 150	34 – 51
		150 kg (2000 m3) – 50 t (650 000 m3)		150 – 1000	51 – 340
		> 50 t (650 000 m3)		> 1000	> 340
	Hydrogène	< 2 kg (80 m3)	Déflagration	0 – 20	0 – 7
		2 kg (80 m3) – 30 kg (1500 m3)		20 – 50	7 – 17
		30 kg (1500 m3) – 230 kg (10000 m3)		50 – 100	17 – 34
		230 kg (10 000 m3) – 830 kg (38 000 m3)		100 – 150	34 – 51
		830 kg (38 000 m3) – 250 t (12 000 000 m3)		150 – 500	51 – 170

Figure 4 : Illustration de la mise en œuvre de l'outil pour le cas d'un UVCE de type 1 de 2000 m3 et un mur de 10 m de haut

4.2 Cas de l'explosion d'un nuage de propane de 50 tonnes

Nous nous intéressons ici au cas d'un industriel souhaitant protéger une cible des effets de l'explosion d'un nuage de 50 tonnes de propane, en construisant un mur de 10 m de haut.

En considérant qu'il s'agit d'un UVCE de type 1, on déduit du Tableau 1 que la longueur d'onde d'une telle explosion est de 340 m, ce qui entraîne un ratio λ/H_{mur} de 34. La lecture des abaques, illustrée sur la figure suivante, montre que pour un tel ratio, le mur n'entraîne pas d'atténuation des effets de surpression. La présence d'un mur de 10 m n'aurait aucun effet sur la propagation de l'onde, le mur étant vu par l'onde de pression comme une « rugosité », et non comme un « obstacle à franchir ».

Type d'explosion	Type de produits	Masse / (Volume inflammable)	Typologie du signal		Longueur d'onde (m)
			Forme du signal	Temps d'application (ms)	
UVCE type 1	Gaz inflammables Liquides inflammables	< 400 g (5 m3)	Déflagration	0 – 20	0 – 7
		400 g (5 m3) – 5 kg (65 m3)		20 – 50	7 – 17
		5 kg (65 m3) – 50 kg (650 m3)		50 – 100	17 – 34
		50 kg (650 m3) – 150 kg (2000 m3)		100 – 150	34 – 51
		150 kg (2000 m3) – 50 t (650 000 m3)		150 – 1000	51 – 340
		> 50 t (650 000 m3)		> 1000	> 340
	Hydrogène	< 2 kg (80 m3)	Déflagration	0 – 20	0 – 7
		2 kg (80 m3) – 30 kg (1500 m3)		20 – 50	7 – 17
		30 kg (1500 m3) – 230 kg (10000 m3)		50 – 100	17 – 34
		230 kg (10 000 m3) – 830 kg (38 000 m3)		100 – 150	34 – 51
		830 kg (38 000 m3) – 250 t (12 000 000 m3)		150 – 500	51 – 170

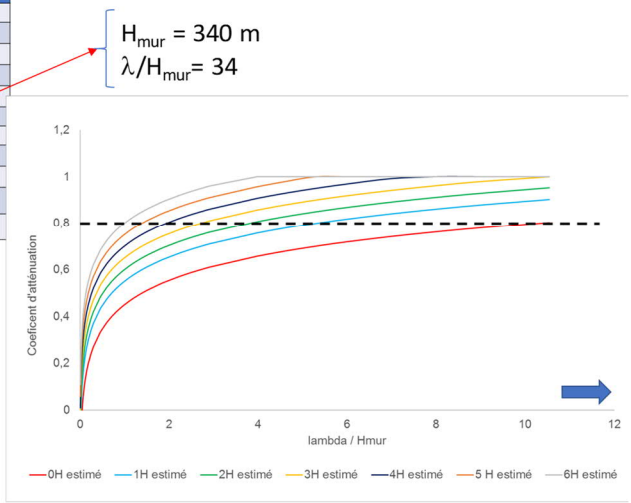


Figure 5 : Illustration de la mise en œuvre de l'outil pour le cas d'un UVCE de type 1 de 50 T de propane et un mur de 10 m de haut

5 Synthèse

Afin de pouvoir répondre au mieux aux nombreuses sollicitations de l'administration ou d'industriels, soucieux de connaître l'effet protecteur d'un mur sur les effets de pression produits par une explosion, l'INERIS a travaillé plusieurs années sur ce sujet dans le cadre du programme d'appui aux politiques publiques DRA 08, relatif à l'*Évaluation des phénomènes dangereux (dispersion, incendie, explosion) et leurs conséquences*.

L'objectif de ces travaux était de déterminer l'amplitude et l'étendue de l'éventuel effet atténuateur d'un mur sur les niveaux de pression produits par une explosion, typiquement dans la zone 50-200 mbar.

À l'issue de l'étude bibliographique réalisée dans le cadre de ces travaux, le paramètre λ/H_{mur} correspondant au rapport entre la longueur d'onde (directement liée à la durée de l'onde de pression) de l'explosion et la hauteur du mur, est apparu comme étant le paramètre clef pour prédire l'effet protecteur de l'obstacle sur les niveaux de surpression produits par l'explosion.

Pour pouvoir produire les données expérimentales manquantes et étudier l'influence de ce paramètre λ/H_{mur}**,** l'INERIS a mené deux campagnes expérimentales, à petite et moyenne échelle, mettant en œuvre des explosions de mélanges gazeux inflammables à base d'hydrogène et une instrumentation permettant de mesurer les niveaux de pression en amont et en aval d'un mur de hauteur variable.

L'exploitation de l'ensemble de ces données d'essais, croisée avec des simulations numériques, a permis d'établir un outil simple de prédiction de l'effet d'atténuation d'un mur sur les effets de surpression d'une explosion. Cet outil est constitué d'abaques permettant d'estimer le coefficient d'atténuation derrière le mur, à différentes distances du mur, exprimées en nombre de hauteurs du mur.

L'étude montre les limites de l'effet protecteur d'un mur sur la propagation d'une onde de surpression. Il apparaît en effet que l'effet protecteur d'un mur est négligeable pour les explosions impliquant un volume inflammable très important. En effet, pour des grosses explosions industrielles telles que le ratio λ/H_{mur} est de l'ordre de 10, voire 100, le recours à la modélisation numérique permet de vérifier que le mur est vu comme une simple rugosité et non comme un obstacle protecteur.

Dans le meilleur cas, c'est-à-dire pour des ratios de λ/H_{mur} inférieurs à 1, l'effet protecteur pourrait être tel que la surpression engendrée derrière le mur serait de l'ordre de 40% de la surpression engendrée au même endroit en l'absence de mur, et l'étendue de la zone protégée par le mur serait alors de 5 fois la hauteur du mur.

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc technologique Alata • BP 2 • F-60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 66 77 • ineris@ineris.fr • www.ineris.fr

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable