

Ce document a été réalisé avec la participation de



43 rue Sedaine
75 011 PARIS



Site de Saint-Jean sur Sauves (86)

MODELISATIONS DES SCENARIOS D'EXPLOSION

PREAMBULE

Le présent document est élaboré dans le cadre de l'étude de dangers, qui a identifié différents scénarios d'explosions de poussières dans les installations du Silo Bio de Terrena Poitou sur son site de Saint-Jean de Sauves.

Le but du présent document est d'évaluer les conséquences d'une explosion de poussières en terme de :

- Surpressions extérieures : différentes valeurs de surpressions au sol selon la distance ;
- Projections de débris : distance de projectiles « types ».

Dans certaines conditions, cette évaluation requiert un dimensionnement préalable des événements d'explosion (surfaces minimales pour que l'installation soit correctement protégée).

Différentes méthodes de calculs permettent de déterminer les effets de pression consécutifs à une explosion de poussières :

- Les normes dites de « dimensionnement d'événements » :
 - La norme allemande : VDI 3673 version 2002 ;
 - La norme américaine : NFPA 68 version 2007 ;
 - La norme européenne : NF EN 14491 version 2006 ;
- La méthode associant un calcul de Brode et un indice multi-énergie.

Ces méthodes sont toutes préconisées par l'INERIS dans le « Guide de l'état de l'art sur les silos »¹ et possèdent chacune des domaines d'applications spécifiques. Ainsi, le choix de la méthode de calcul est directement lié aux caractéristiques de l'enceinte considérée.

Ces différentes méthodes, ainsi que leurs domaines de validité, sont présentés de manière synthétique dans les premières parties du présent document.

Pour chaque explosion d'enceinte étudiée, le choix de la méthode de calcul repose sur des critères représentés sous forme logigramme.

Les simulations effectuées permettent de déterminer des zones de dangers.

¹ INERIS, Guide de l'état de l'art sur les silos, avril 2005.

SOMMAIRE

Préambule.....	2
Sommaire.....	3
I. Généralité concernant les explosions de poussières	4
I.1 Mécanismes des explosions de poussières.....	4
I.1.1 Explosion primaire.....	4
I.1.2 Explosion secondaire	5
I.2 Caractérisation d'une explosion	6
I.2.1 Paramètres influençant la puissance d'une explosion	6
I.2.2 Caractéristiques d'une explosion	6
I.3 Principe de l'événement d'explosion.....	7
I.3.1 Caractéristiques d'un événement.....	7
I.3.2 Effets résiduels d'explosion.....	7
I.4 Caractéristiques des effets.....	8
I.4.1 Effets thermiques	8
I.4.2 Effets mécaniques.....	8
I.4.3 Projections de débris.....	9
II Présentation des méthodes de calcul d'explosion.....	10
II.1 Protection d'une enceinte isolée	10
II.1.1 Calcul de la surface d'événement.....	10
II.1.2 Détermination des conséquences de l'explosion de poussières.....	11
II.2 La Méthode INERIS : Calcul de Brode + Indice Multiénergie.....	13
II.2.1 Etape 1 : Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières.....	13
II.2.2 Etape 2 : Détermination des distances des effets de surpression	14
II.3 Choix de la méthode	15
III Présentation de la méthode de calcul de projections	16
III.1 Nature des débris.....	16
III.2 Vitesse initiale du projectile.....	16
III.2.1 Vitesse de poussée.....	16
III.2.2 Vitesse de déformation	17
III.2.3 Angle de projection	17
III.3 Trajectoire du projectile.....	17
IV Modélisation d'explosion	19
IV.1 Choix et hypothèses.....	19
IV.2 Caractéristiques des enceintes	20
IV.3 Caractéristiques des poussières	21
IV.4 Pressions de destruction des structures et pressions réduites max (Pred, max).....	21
IV.5 Caractéristiques de débris	21
IV.6 Résultats	22

I. GENERALITE CONCERNANT LES EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES

I.1 MECANISMES DES EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES

L'explosion d'une suspension de poussières dans l'air est définie comme étant un phénomène par lequel le système réactionnel constitutif d'une atmosphère explosive (mélange air-combustible) donne lieu à une réaction de combustion rapide et fortement exothermique, avec production de gaz portés à haute température dont l'expansion peut produire des effets mécaniques (surpressions)².

I.1.1 EXPLOSION PRIMAIRE

I.1.1.1 CONDITIONS D'OCCURRENCE

Pour que des poussières puissent exploser, il faut :

- Qu'elles soient combustibles ;
- Qu'elles aient une granulométrie suffisamment fine ;
- Qu'elles forment avec l'air (comburant de la réaction) un nuage, mélange relativement homogène, de concentration convenable ;
- Que le nuage soit enflammé par une source d'énergie suffisante ;
- Que la réaction ait lieu en milieu confiné.

I.1.1.2 EFFETS D'UNE EXPLOSION

L'inflammation du nuage se traduit par la pyrolyse de la poussière, accompagnée d'émission de gaz combustibles qui s'enflamment. La flamme se propage alors de proche en proche dans le mélange provoquant l'expansion thermique des gaz chauds formés par la combustion et des surpressions en milieu confiné. D'une manière générale, les explosions de poussière prennent le régime de déflagration.

En milieu non confiné, l'inflammation d'un nuage de poussières prend la forme d'un incendie à caractère très rapide, appelé « *Flash Fire* » : il n'y a pas d'effets de pression dans ce cas.

I.1.1.2.1 Effets thermiques

Les effets thermiques sont liés à la production de gaz chauds et se traduisent par l'émission d'une flamme.

I.1.1.2.2 Effets mécaniques

Les effets mécaniques, ou effets de pression, sont liés à l'expansion des gaz de combustion et se traduisent par l'émission d'une onde aérienne de surpression.

Les effets de pression ne peuvent être produits que si l'atmosphère explosive initiale est au moins partiellement confinée et si son volume représente une fraction suffisante du volume de confinement.

I.1.1.2.3 Projections de débris

Les structures non résistantes aux effets de pression peuvent générer des projections débris.

² INERIS, MEDD, Sécurité des procédés mettant en œuvre des pulvérulents combustibles (DRA-35 Ω-14), décembre 2004.

I.1.2 EXPLOSION SECONDAIRE

Une explosion est dite primaire lorsqu'elle prend naissance dans l'équipement considéré.

L'explosion peut se propager dans des équipements dans lesquels de la poussière est présente sous la forme d'un nuage explosible. On parle ainsi d'explosion secondaire lorsqu'une explosion, dans une enceinte B, est provoquée par une explosion primaire dans une enceinte A.

Une explosion secondaire peut être beaucoup plus violente que l'explosion primaire qui l'a provoquée. En effet, l'explosion primaire génère de fortes turbulences et des conditions de pression initiales beaucoup plus élevées dans l'enceinte qui sera le siège de l'explosion secondaire.

Une explosion peut également se propager par mise en suspension de dépôts de poussière. Si le dépôt de poussière est peu important, l'explosion se propage sans renforcement de la pression ; cette propagation prend la forme « Flash Fire ». Si le dépôt de poussière est suffisamment important pour créer un nuage explosible dans tout le volume de l'enceinte, une explosion secondaire a lieu.

Sous certaines conditions, il est possible de considérer qu'il n'y a pas d'augmentation de la violence d'une explosion secondaire. Par exemple, si une enceinte est dotée d'un évent en hauteur et d'une petite surface fragile sur ses parois, l'explosion sera déchargée en hauteur, ce qui permettra une détente de pression, mais une flamme peut tout de même se transmettre à une enceinte voisine par la surface fragile longitudinale. Plusieurs cas sont ainsi illustrés sur la figure suivante.

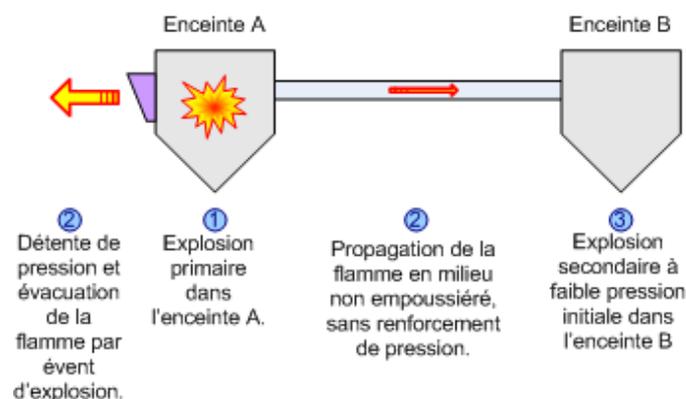


Figure 1 : Propagation d'explosion d'une enceinte A, munie d'un évent, à une enceinte B

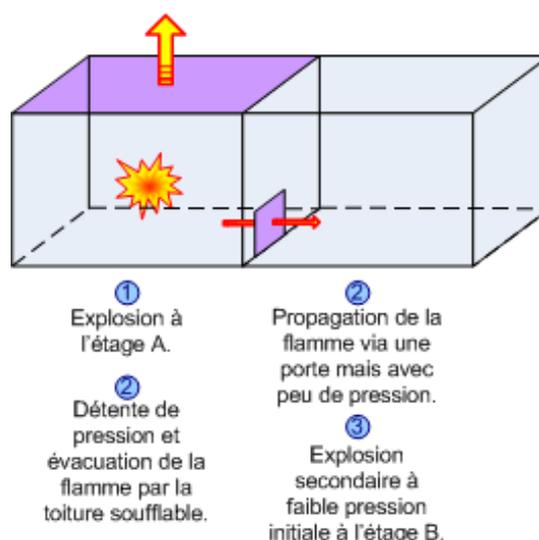


Figure 2 : Propagation d'explosion d'un étage A, à toiture soufflable, à un étage B

I.2 CARACTERISATION D'UNE EXPLOSION

I.2.1 PARAMETRES INFLUENÇANT LA PUISSANCE D'UNE EXPLOSION

Les paramètres suivants jouent un rôle important sur la puissance de l'explosion (en termes de surpressions) :

- Nature des poussières (granulométrie) ;
- Homogénéité du mélange air-poussières (ou mise en suspension) ;
- Concentration des poussières (ou domaine d'explosivité) ;
- Humidité du mélange air-poussières en suspension ;
- Energie d'inflammation ;
- Degré de confinement (présence de surfaces fragiles) ;
- Pression ;
- Température ambiante, etc.

I.2.2 CARACTERISTIQUES D'UNE EXPLOSION

La violence d'une explosion de poussières est caractérisée par les composantes suivantes :

- P_{max} , la pression maximale atteinte durant l'explosion (valeur maximale de la surpression) en bar ;
- $(dP/dt)_{max}$, la vitesse maximale de montée en pression en bar.s⁻¹.

Pour des volumes d'enceintes de forme peu allongée de plus d'un mètre cube, la vitesse de montée en pression de l'explosion est reliée au volume de l'enceinte (V) et à la nature de la poussière par la relation suivante :

$$(dP/dt)_{max} = K_{st}.V^{-1/3}$$

Le K_{st} est une constante, appelée indice d'explosion, dépendant de la nature de la poussière et de la forme de l'enceinte³.

Sur la base de la loi cubique ci-dessus, le K_{st} est déterminé, pour une poussière donnée, en laboratoire⁴ dans des conditions normalisées (enceintes d'1 m³ de formes identiques, concentrations les plus dangereuses...).

Ainsi, le K_{st} permet de caractériser la violence de l'explosion pour une poussière donnée et de classer les poussières en 3 catégories (voir tableau suivant).

Classe d'explosion	K_{st}	Exemple de poussière
St 1	$\leq 200 \text{ bar.m.s}^{-1}$	Poussière de grain
St 2	$\leq 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$	Poussière de bois
St 3	$> 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$	Poudre d'aluminium

Tableau 1 : Définition des classes d'explosion des poussières

(source : VDI 3673, 2002)

P_{max} est également déterminé, pour une poussière donnée, au moyen d'essais : elle correspond à la pression maximale atteinte dans l'enceinte sur une large gamme de concentrations de poussière en suspension.

³ INRS, Les mélanges explosifs, Paris, 1994.

⁴ VDI 3673- Part 1 : « Pressure venting of dust explosion, Novembre 2002.

I.3 PRINCIPE DE L'EVENT D'EXPLOSION

I.3.1 CARACTERISTIQUES D'UN EVENT

Un événement d'explosion est un dispositif de protection passif d'une enceinte contre la surpression résultant d'une explosion à l'intérieur de celle-ci : équipant la paroi de l'enceinte, ce dispositif constitue une surface fragile, caractérisée par une pression d'ouverture suffisamment faible et une surface suffisamment grande pour qu'il s'ouvre à un stade précoce de l'explosion et qu'ainsi :

- Les gaz d'explosion et les gaz non brûlés soient déchargés à l'extérieur ;
- La surpression maximale atteinte dans l'enceinte reste inférieure à la surpression qui l'endommagerait.

Un événement est caractérisé par :

- Sa surface **A** ;
- Sa surpression statique d'activation P_{stat} (surpression qui déclenche l'ouverture ou la rupture de l'événement), en bar.

I.3.2 EFFETS RESIDUELS D'EXPLOSION

La présence d'un événement convenablement dimensionné permet de concevoir et de mettre en œuvre des enceintes plus légères, capables de résister aux effets de la pression d'explosion réduite.

La décharge par événement n'évite pas les explosions et ne les éteint pas, elle se borne à limiter la surpression d'explosion. Aussi, les effets résiduels peuvent être les suivants :

- La décharge d'explosion libère en extérieur des matériaux enflammés et des matériaux imbrûlés, qui peuvent s'enflammer en extérieur ; une flamme se forme à partir de l'événement et peut se développer dans le sens de la décharge ;
- Une onde de pression se formera à l'extérieur à partir de l'événement ;
- Des débris d'événements peuvent être projetés vers l'extérieur si le dispositif n'est pas « non fragmentant ».

Il convient donc de positionner l'événement de façon à ce que la zone où s'effectuera la décharge ne soient pas fréquentées ou ne soit pas occupées par des installations potentiellement dangereuses.

On définit alors :

- L_{Flamme} , la longueur des flammes à l'extérieur de l'enceinte (en m) ;
- $P_{red,max}$, la pression d'explosion réduite : pression maximale générée par l'explosion dans l'enceinte munie de l'événement (en bar) ;
- P_{ext} , la pression maximale, en un point donné situé à l'extérieur de l'enceinte (en bar).

Le schéma suivant illustre l'influence d'un événement sur l'allure des surpressions générées par une explosion dans une enceinte.

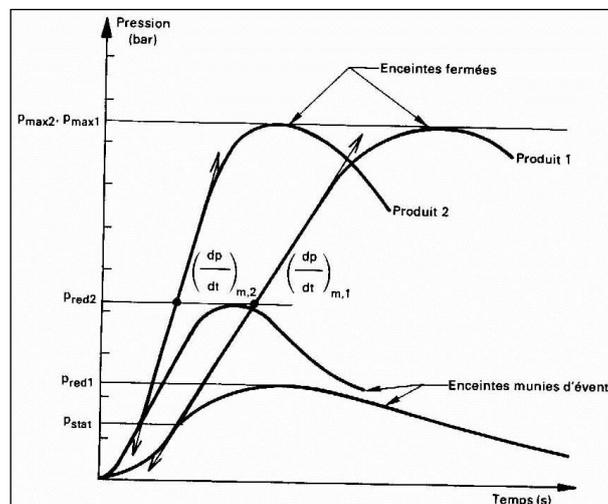


Figure 3 : Représentation des courbes de montées en pression, avec ou sans événements
(Source NF U 54-540 (1986))

I.4 CARACTERISTIQUES DES EFFETS

I.4.1 EFFETS THERMIQUES

Les effets thermiques sur les personnes sont les suivants :

- Une personne qui se trouverait dans la flamme subirait très probablement un effet léthal ;
- En revanche, la durée de la combustion est suffisamment brève pour que soit indemne de tout effet thermique une personne qui se trouverait en dehors du volume occupé par les gaz de combustion et qui ne serait donc exposée qu'au flux rayonné par la flamme.

I.4.2 EFFETS MECANIQUES

Le tableau suivant relate les effets de surpressions brutales sur l'homme telles qu'indiquées dans la littérature.

Surpression	Effets sur l'homme
200 mbar	Sans danger.
300 mbar	Rupture de tympan.
500 mbar	Limite du supportable (avec protection des oreilles).
1000 mbar	Effet léthal.

Tableau 2 : Effets potentiels de la surpression sur l'homme

(Source : CLEUET A., GROS P., PETIT J.-M., Les Mélanges Explosifs, INRS, 1994)

Le tableau suivant indique les dégâts observés dans les constructions en regard des surpressions appliquées.

Surpression	Effets sur les structures
40 à 70 mbar	Bris de vitres
70 à 150 mbar	Lézardes et flexions des parois de plâtre Cassure de plaque de fibrociment Dislocation, gondolage des cloisons et des toits en tôles ondulées
150 à 250 mbar	Lézardes, cassures des murs en béton ou en parpaings, non armé de 20 à 30cm d'épaisseur
200 à 500 mbar	Rupture de réservoir aérien
500 à 600 mbar	Bombement ou rupture de murs de briques, non armé de 20 à 30 cm d'épaisseur
700 à 1000 mbar	Renversement de wagon chargé Destruction de mur en béton armé Soufflage de mur de briques

Tableau 3 : Effets observés de la surpression sur les structures

(Source : CLEUET A., GROS P., PETIT J.-M., Les Mélanges Explosifs, INRS, 1994)

L'arrêté du 29 septembre 2005⁵ définit des valeurs de référence pour l'évaluation de la gravité des conséquences d'accidents potentiels relatifs aux installations classées. Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression figurent au tableau suivant.

⁵Arrêté 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 et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

Surpression	Effets sur les structures	Effets sur l'homme
20 mbar	Destructions de vitres (10% des vitres).	Effets indirects par bris de vitre sur l'homme.
50 mbar	Dégâts légers (75% de vitres + cadres).	Effets irréversibles. « zone de dangers significatifs pour la vie humaine »
140 mbar	Dégâts graves (effondrement partiel des murs).	Effets létaux « zone de dangers graves pour la vie humaine »
200 mbar	Effets dominos (destruction des murs en parpaing).	Effets létaux significatifs « zone de dangers très graves pour la vie humaine »
300 mbar	Dégâts très graves (rupture des structures métalliques)	-

Tableau 4 : Valeurs de référence relative aux seuils d'effets de surpression

(Les indications entre parenthèse sont tirées de l'abaque de Lannoy et n'ont qu'une valeur d'illustration)

Les effets létaux et létaux significatifs sont induits sur l'homme par les effets secondaires et tertiaires d'une explosion, c'est-à-dire par les impacts d'objets ou le fait d'être projeté sur un obstacle.

1.4.3 PROJECTIONS DE DEBRIS

Pour la délimitation des zones d'effets sur l'homme ou sur les structures des installations classées, il n'existe pas à l'heure actuelle de valeur de référence.

II PRESENTATION DES METHODE DE CALCUL D'EXPLOSION

II.1 PROTECTION D'UNE ENCEINTE ISOLEE

Les normes suivantes permettent de dimensionner les événements en cas d'explosion de poussière :

- la norme allemande VDI 3673 version 2002⁶
- la norme américaine NFPA68 version 2007⁷
- la norme européenne NF EN 14491 version 2006⁸

Ces trois normes de dimensionnement d'événement sont à utiliser pour des volumes comportant des surfaces d'événements ou des surfaces soufflables légères.

Elles sont toutes divisées en deux grandes parties :

1. L'évaluation de la surface d'événement minimum A ;
2. L'évaluation des conséquences extérieures (effets de flamme et de pression extérieures) suite à une explosion primaire.

NB : La partie 2 ne peut être abordée si la surface d'événement ou surface soufflable présente sur l'enceinte est inférieure à A, la surface minimum calculée.

II.1.1 CALCUL DE LA SURFACE D'EVENT

II.1.1.1 PROTECTION D'UNE ENCEINTE ISOLEE

La surface d'événement est déterminée selon les formules présentées dans les normes. Ces formules peuvent être utilisées dans les conditions suivantes :

			NF EN14491 (2006) et VDI 3673 (2002)	NFPA 68 (2007)
Domaine de validité	Poussières	K_{St} (bar.m.s ⁻¹)	[10 ; 800]	[10 ; 800]
		P_{max} (bar)	[5 ; 10] si $K_{ST} \leq 300$ [5 ; 12] si $K_{ST} > 300$	[5 ; 12]
	Enceinte	V (m ³)	[0,1 ; 10 000]	[0,1 ; 10 000]
		L/D -	[1 ; 20]	[1 ; 6]
		$P_{red,max}$ (bar)	[P_{stat} ; 2]	non spécifié
	Event	P_{stat} (bar)	[0,1 ; 1] pour $P_{stat} < 0,1$ bar, utiliser 0,1 bar	non spécifié

Tableau 5 : Calculs des surfaces d'événements

⁶ Verein Deutscher Ingenieure, VDI 3673 – Pressure venting of dust explosion, Berlin, 2002.

⁷ National Fire Protection Association, NFPA68 – Guide for venting of deflagrations, 2007.

⁸ Association Française de Normalisation, AFNOR, NF EN 14491 – Système de protection par événement contre les explosions de poussières, mai 2006.

II.1.1.2 PROTECTION D'UN BATIMENT

Une explosion peut avoir lieu dans un bâtiment si des dépôts de poussières inflammables sont présents sur le sol, la surface des équipements, la charpente... Le développement de la pression varie selon la répartition et la quantité de poussière mise en jeu. S'il y a suffisamment de poussière susceptible de s'envoler et de former un nuage dans tout le volume de l'étage, l'explosion concernera tout l'étage. Dans le cas contraire, la mise en suspension des dépôts et leur inflammation peuvent générer un « flash fire » : il y a alors propagation d'un front de flamme sans qu'il y ait explosion de l'étage.

Le développement de la pression peut varier en fonction de la configuration du bâtiment et dépend notamment de la forme du bâtiment, de la présence d'appareils et d'éléments structurels et de la possibilité de propagation de salle en salle.

La norme NFPA 68 donne la formule suivante pour le calcul de la surface d'évents de base d'une enceinte :

$$A_{v0} = 1.10^{-4} \left(1 + 1.54 P_{stat}^{\frac{4}{3}} \right) \cdot K_{st} \cdot V^{3/4} \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{red}} - 1}$$

- où
- A_{v0} : surface des événements (en m²)
 - P_{stat} : pression de rupture des événements ;
 - K_{St} : indice d'explosion (en bar.m.s⁻¹)
 - V : volume de l'enceinte à protéger (m³) ;
 - P_{max} : pression maximale d'explosion (en bar) ;
 - P_{red} : pression réduite après explosion (en bar).

Cette surface d'évent peut être modifiée en fonction des caractéristiques de l'enceinte (enceinte allongée, bâtiment, densité de l'évent, etc.). Pour une enceinte allongée, c'est-à-dire lorsque le ratio de la longueur (L) par le diamètre équivalent (D) est supérieur à 2, la surface d'évent doit être corrigée par la formule suivante :

$$A_{v1} = A_{v0} \left[1 + 0.6 \left(\frac{L}{D} - 2 \right)^{0.75} \cdot \exp(-0.95 \cdot P_{red}^2) \right]$$

Rappelons que l'utilisation de ces formules de calcul est assujettie au respect du domaine de validité de la norme, présenté dans le tableau ci-dessus.

II.1.2 DETERMINATION DES CONSEQUENCES DE L'EXPLOSION DE POUSSIERES

II.1.2.1 LONGUEUR MAXIMALE DE LA FLAMME EXTERIEURE

La longueur maximale de la flamme hors du volume lors de l'explosion de poussières est :

$$L_{Flamme} = \alpha \times V^{1/3}$$

- où α : facteur de longueur de flamme : 10 pour les poussières de métal (aluminium, zinc, magnésium...) et 8 pour les poussières chimiques (charbon, soufre...) ainsi que les poussières agricoles.

Le coefficient α et le domaine de validité diffèrent selon la norme utilisée :

			NF EN 14491 (2006)	VDI 3673 (2002)	NFPA 68 (2007)	
Domaine de validité	Poussières	K_{ST}	(bar.m.s ⁻¹)	[10 ; 300]	[10 ; 300]	[0 ; 200]
		P_{max}	(bar)	[5 ; 10]	[0 ; 10]	[0 ; 9]
	Enceinte	V	(m ³)	[0,1 ; 10 000]	[0,1 ; 10 000]	[0,3 ; 10 000]
		L/D	-	[1 ; 2]	[1 ; 2[non spécifié
		P_{red}	(bar)]P _{stat} ; 2[]P _{stat} ; 2[]P _{stat} ; 1]
	Event	P_{stat}	(bar)	[0,1 ; 0,2]	[0,1 ; 0,2]	[0 ; 0,1]

Tableau 6 : Calculs de longueur de flamme

Une valeur de 60 m est retenue comme limite supérieure pour toute estimation de L_{Flamme}^9 .

II.1.2.2 EFFETS DE PRESSION EXTERIEURE

Les surpressions à l'extérieur d'une enceinte éventée sont dues :

- A la décharge de la surpression générée à l'intérieur de l'enceinte ;
- A la combustion des matières combustibles éjectées à l'extérieur de l'enceinte.

La valeur de surpressions à une distance r de l'événement est calculée selon des formules différentes selon les normes et leur domaine d'application.

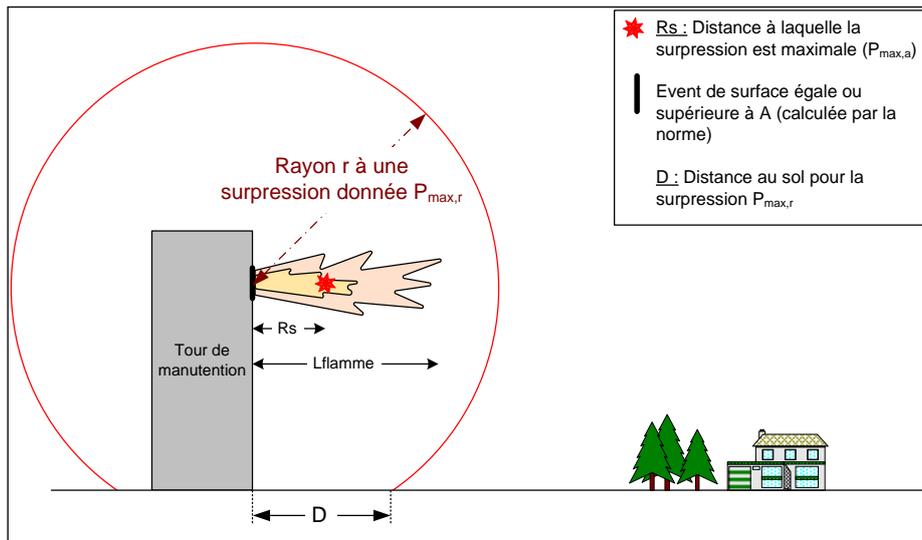


Tableau 7 : Représentation de l'onde de pression issue d'une décharge d'explosion par l'événement d'un équipement situé dans une tour de manutention d'un silo

Les méthodes de calcul des surpressions extérieures sont très semblables entre les différentes normes. Elles reposent sur :

- Le calcul de la longueur de flamme (selon la même formule) ;
- Un calcul de la surpression maximale atteinte dans l'espace ;
- Une loi de décroissance en fonction de la distance par rapport à l'événement.

Les domaines de validité sont présentés au tableau suivant.

⁹ La norme NF EN 144491 et la norme VDI 3673 précisent cette valeur comme limite supérieure.

				NF EN 14491 (2006)	VDI 3673 (2002)	NFPA 68 (2007)
Domaine de validité	Poussière	K_{St}	(bar.m.s ⁻¹)	[0 ; 200]	[0 ; 200]	[10 ; 250]
		P_{max}	(bar)	[0 ; 9]	[0 ; 9]	[5 ; 12]
	Enceinte	V	(m ³)	[0,1 ; 250]	[0 ; 250]	[0,1 ; 10 000]
		L/D	(-)	[0 ; 2]	[0 ; 2]	[1 ; 6[
		P_{red}	(bar)	[0,1 ; 1]	[0,1 ; 1]	non spécifié
	Event	P_{stat}	(bar)	[0 ; 0,1]	[0 ; 0,1]	[0 ; 0,75]
Surpression	$P_{ext,R}$	(bar)	[0,2 ; 1,0]	non spécifié	non spécifié	

Tableau 8 : Calculs de surpressions par les normes EN 14 491, VDI 3673 et NFPA 68

R_s : rayon de la surpression maximale

r : distance par rapport à l'évent

a , l'angle en degrés entre la ligne d'observation et le centre de l'évent.

($a=0^\circ$ juste en face de l'ouverture de l'évent ; $a=90^\circ$ sur le côté de l'évent ; $a=180^\circ$ dans le sens opposé à la décharge).

Les surpressions extérieures ne peuvent être calculées qu'à partir d'une distance notée R_s . Entre 0 m et R_s , la surpression extérieure sera considérée égale à P_{max,R_s} .

II.2 LA METHODE INERIS : CALCUL DE BRODE + INDICE MULTIENERGIE

Les calculs des effets d'une explosion reposent sur :

- L'équation de Brode pour déterminer l'énergie disponible d'explosion ;
- La méthode multi-énergie pour évaluer l'atténuation des effets de pression.

Cette démarche a l'avantage de définir l'énergie « disponible » par rapport aux spécificités du contenant (pression de rupture et volume).

L'application de cette méthode se déroule en deux étapes.

II.2.1 ETAPE 1 : DETERMINATION DE L'ENERGIE DE L'EXPLOSION DE POUSSIERES

La détermination de l'énergie de l'explosion de poussières s'effectue à partir de l'équation de Brode (en Joules) :

$$E = 3 \times V \times (P_{ext} - P_{atm})$$

avec E : énergie d'explosion

V : volume de l'enceinte (en m³)

($P_{ext} - P_{atm}$) : surpression d'explosion (en Pa)

Dans une approche dimensionnante, la surpression d'explosion ($P_{ext} - P_{atm}$) est déterminée par l'INERIS selon la méthode explicitée au tableau suivant.

	Explosion primaire		Explosion secondaire
	Volume correctement éventé et découpé	Volume non éventé : éclatement	
$P_{ext} - P_{atm} =$	$P_{red, max}$	$2 \times P_{rupt}$	5 bars
Explications	Equation de Brode I. $P_{red, max}$: Pression d'explosion réduite utilisée pour calculer la surface d'évent	Equation de Brode E. P_{rupt} : Pression statique de rupture* de l'enceinte.	Equation de Brode II. Valeur de 5 bars prise sur la base du retour d'expérience.

Tableau 9 : Choix des paramètres du calcul de Brode selon le type d'explosion

* La pression de rupture est déterminée selon les données fournies par le constructeur. Des données sont également disponibles par type de structure dans le Guide de l'état de l'art sur les silos.

Remarque : La méthode de Brode atteint ses limites pour les explosions secondaires dans des enceintes aux parois métalliques. En effet la méthode de Brode ne prend plus en compte la résistance des parois de l'enceinte pour les explosions secondaires. La valeur de 5 bars de surpression dans les enceintes est arbitrairement fixée, « prise sur la base du retour d'expérience ». Or cette valeur est compréhensible, bien qu'extrêmement importante, pour l'explosion de cellules béton fermées, mais pas pour des enceintes munies de surfaces fragiles ou dont les parois ne résistent qu'à 0,1 bar de surpression (cas des galeries sur-cellules¹⁰).

C'est pourquoi la détermination de l'énergie de l'explosion de poussière pour les enceintes métalliques se fera sur la base d'un éclatement des parois et non pas selon le modèle d'explosion secondaire avec surpression de 5 bars puisqu'il n'est adapté qu'aux cellules rondes en béton.

II.2.2 ETAPE 2 : DETERMINATION DES DISTANCES DES EFFETS DE SURPRESSION

La détermination des distances des effets de surpression s'effectue en appliquant la méthode multi énergie indice 10. Cette formule, respectant la physique du phénomène, donne les surpressions d'une onde de choc résultant d'un éclatement¹¹.

Le tableau suivant donne les formules associées aux effets de surpression.

Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression	Distance des effets de surpression suivant la méthode multi-énergie indice 10.
300 mbar	$0,028 \times E^{1/3}$
200 mbar	$0,032 \times E^{1/3}$
140 mbar	$0,05 \times E^{1/3}$
50 mbar	$0,11 \times E^{1/3}$
20 mbar	$2 \times 0,11 \times E^{1/3}$

Tableau 10 : Distance des effets de surpression suivant la méthode multi-énergie indice 10

Remarque (issue du Guide de l'Etat de l'Art) : Dans le cas des silos plats de type hangar (sans galerie de reprise et d'un seul volume), la formule de calcul proposée ci-dessus n'est pas adaptée. Les modélisations effectuées **donnent des effets à 140 et 50 mbar** en général compris dans le champ proche du silo et notamment dans les zones forfaitaires réglementaires.

¹⁰ Selon le guide de l'état de l'art sur les silos, la pression de résistance des parois d'une galerie en béton est de 100 mbar.

¹¹ Seul l'indice 10 semble adapté puisqu'on a à faire à un phénomène d'éclatement et de propagation d'onde de choc. Les indices inférieurs correspondent à des explosions de gaz à l'air libre en milieu encombré.

II.3 CHOIX DE LA METHODE

Le logigramme suivant décrit la méthodologie de choix de la norme pour les calculs des effets d'une explosion dans une enceinte donnée.

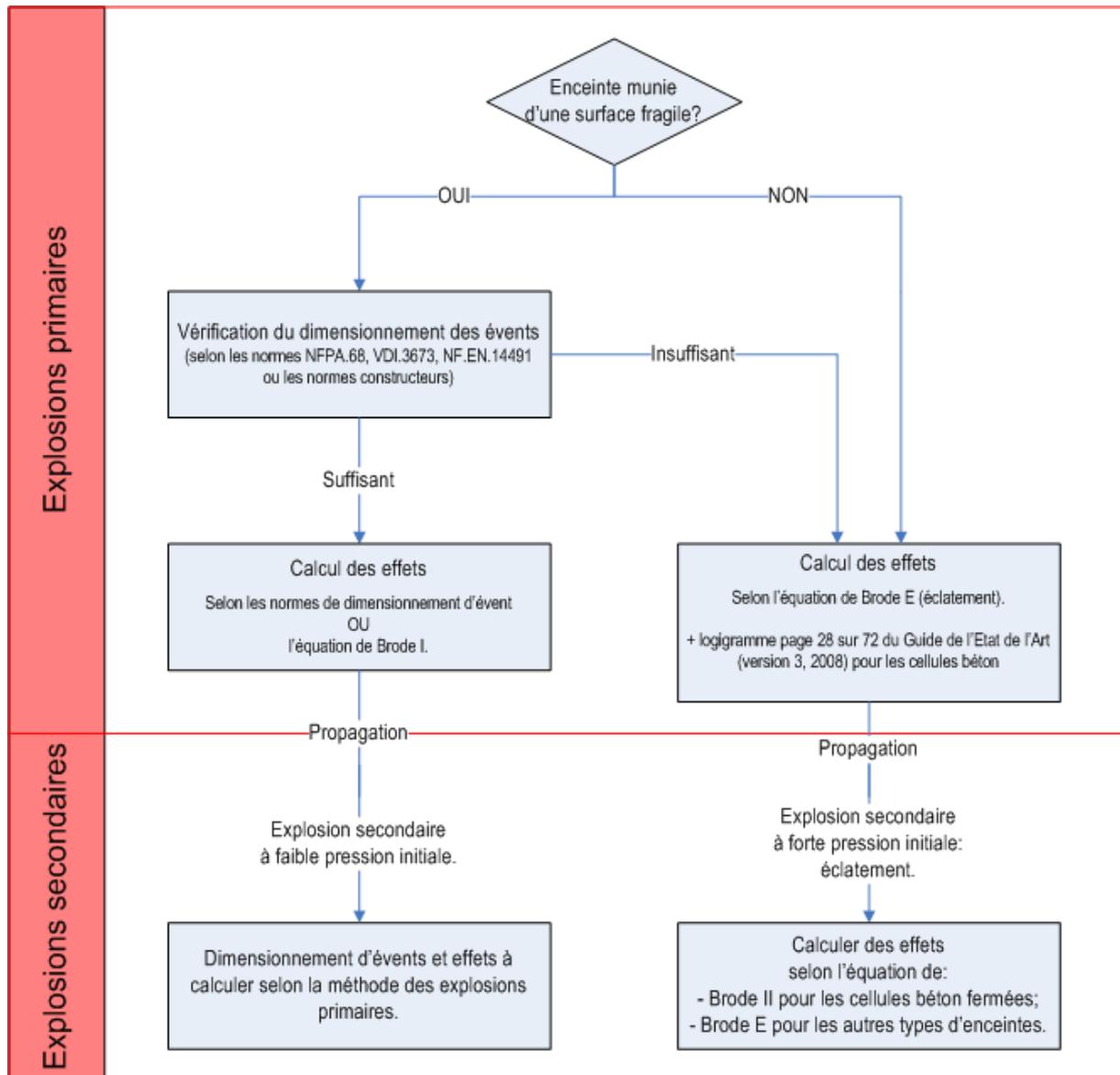


Figure 4 : Logigramme de choix de la norme à utiliser pour les calculs d'explosion

III PRESENTATION DE LA METHODE DE CALCUL DE PROJECTIONS

La méthodologie utilisée pour évaluer des explosions s'appuie sur les bases acquises lors d'une formation assurée par TECHNIP (ex KREIBS SPEICHIM). La modélisation de projection de débris s'effectue en 3 étapes :

- 1) Déterminer la nature et la taille des débris générés par l'explosion ;
- 2) Déterminer l'angle et la vitesse initiale des débris projetés ;
- 3) Déterminer la trajectoire du projectile.

III.1 NATURE DES DEBRIS

La nature des débris générés par l'explosion doit être identifiée au cas par cas. Les débris générés peuvent être :

- Des fragments d'évent si celui-ci n'est pas « non fragmentable » ;
- Des éléments de la paroi de l'enceinte, si celle-ci éclate.

La géométrie du débris doit être estimée au cas par cas.

III.2 VITESSE INITIALE DU PROJECTILE

III.2.1 VITESSE DE POUSSEE

Les débris générés par l'explosion sont propulsés, sous l'effet de l'expansion des gaz, à une vitesse initiale notée v_g .

Pour déterminer la composante de la vitesse initiale due à la poussée des gaz, il faut calculer l'impulsion (I) que reçoit l'élément, fonction de la pression et du temps de poussée (t).

$$(1) \quad I = m \times v_g = F \times t \quad \text{avec} \quad m, \text{ masse de l'élément (kg)}$$

$$v_g, \text{ vitesse initiale (m.s}^{-1}\text{)}$$

$$F, \text{ force de pression des gaz (F = Pression x Surface) (bar.m}^{-2}\text{)}$$

$$t, \text{ temps de poussée (s)}$$

Le temps de poussée est le temps durant lequel l'élément est toujours soumis à la pression P pour s'échapper. Il est calculé selon l'hypothèse suivante : l'élément est considéré hors de la zone de poussée de la pression lorsqu'il a parcouru une distance telle que la surface générée sur son périmètre est égale à la surface de l'élément.

A partir de cette distance d'échappement (Y), l'élément n'est plus poussé par les gaz.

Lorsque

Surface de l'élément (S) = Surface d'échappement,
on a :

$$(2) \quad Y = \frac{\text{Surface de l'élément}}{\text{Périmètre de l'élément}}$$

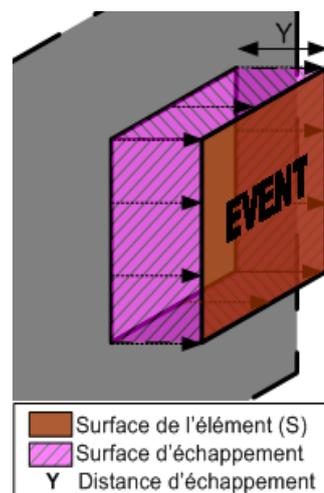


Figure : Représentation schématique au moment de

Durant le temps de poussée (t), l'élément parcourt donc la distance Y à la vitesse initiale (v_g), soit :

$$(3) \quad v_g = \frac{Y}{t}$$

Avec les 3 équations ci-dessus, on obtient la formule de la vitesse initiale en fonction de la pression et de la géométrie de l'évent :

$$V_g = \sqrt{\frac{P \times Y \times S}{m}} = \sqrt{\frac{P \times S^2}{Périmètre \times m}}$$

La pression de poussée du projectile peut être prise comme égale à la pression résiduelle d'explosion dans l'enceinte.

III.2.2 VITESSE DE DEFORMATION

Dans le cas d'événements « lourds » (de type pré-dalle en béton sur les cellules), à la vitesse due aux gaz qui poussent l'élément projeté, il faut ajouter une composante due à la déformation. La vitesse initiale de projection sera égale à la somme de ces deux composantes. Par simplification, on prend la vitesse de déformation égale à la vitesse due aux gaz. On a donc :

$$v = 2 \times v_g$$

Dans le cas d'élément « léger » (de type événement, bardage métallique), cette composante n'est pas prise en compte car nous avons une rupture par arrachement et, étant donné la valeur faible de déclenchement des événements, cette composante est négligeable.

$$v = v_g$$

III.2.3 ANGLE DE PROJECTION

Dans les cas où l'angle de projection ne peut être prédit, l'angle donnant les distances maximales de projection pourra être retenu.

III.3 TRAJECTOIRE DU PROJECTILE

La trajectoire du projectile peut être déterminée à partir de calculs de balistiques simples (voir figure suivante).

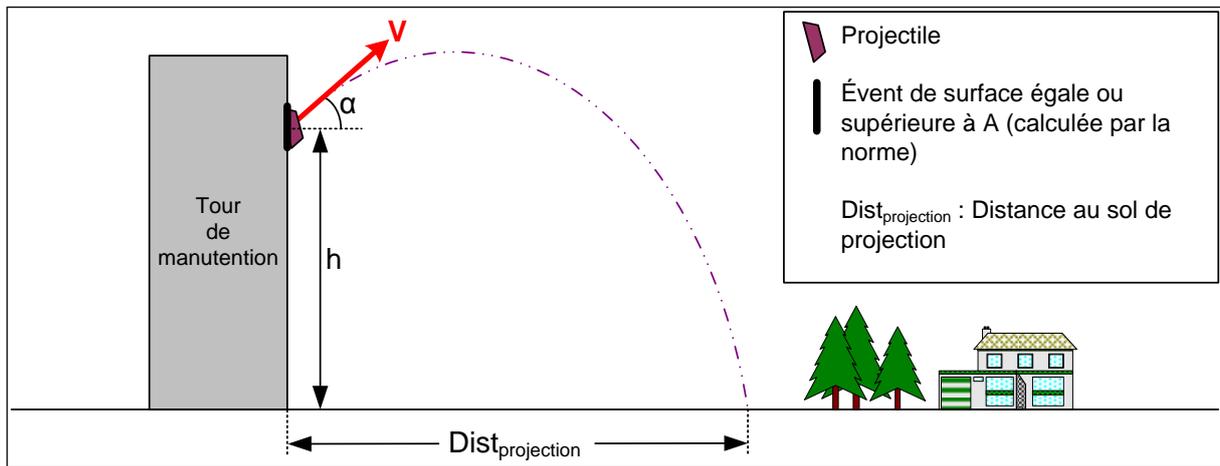


Figure 5 : Schéma représentant la trajectoire d'un débris généré au niveau de la paroi d'une tour de manutention

La portée du projectile peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$Dist_{projection} = \frac{v \cdot \sin \alpha + \sqrt{v^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2 \cdot g \cdot h}}{g} \times v \cdot \cos \alpha$$

avec : v = vitesse de projection ($m \cdot s^{-1}$) ;
 α = angle de départ des projectiles (rad) ;
 h = hauteur (m) ;
 g = gravité.

Cette relation ne tient pas compte des effets de traînée (minorant) et de portance (majorant).

IV MODELISATION D'EXPLOSION

Le tableau suivant présente les enceintes dans lesquelles a été envisagée une explosion de poussières lors de l'analyse de risques et pour lesquelles des calculs doivent être effectués.

	Evènement redouté central	Type d'explosion	Effets à calculer
Silo Bio	Explosion dans la fosse des élévateurs de la tour manutention	Explosion primaire	Surpression et projection
	Explosion dans la tour de manutention (volume le plus important)	Explosion primaire	Surpression et projection
	Explosion dans l'espace regroupant les têtes d'élévateurs	Explosion primaire	Surpression et projection
	Explosion dans l'espace sur cellules	Explosion primaire	Surpression et projection
	Explosion dans une cellule de stockage de céréales	Explosion primaire	Surpression et projection
	Explosion dans l'espace sous-cellules (C17 à C42)	Explosion primaire	Surpression et projection

Tableau 11 : Enceintes dans lesquelles une explosion de poussières a été envisagée en analyse de risques

IV.1 CHOIX ET HYPOTHESES

Dans un premier temps, l'ensemble des paramètres est évalué, concernant :

- Les caractéristiques des enceintes : dimensions, surfaces d'évent, pression de rupture ;
- Les caractéristiques de l'évent : pression d'ouverture, surface existante ;
- Les caractéristiques des poussières : K_{St} , P_{max} .

Ces paramètres nous permettent de calculer la surpression maximale induite à l'intérieur du volume (ou pression d'explosion réduite).

Puis dans un deuxième temps, cette pression réduite est comparée à la surpression maximale que la structure peut supporter. Ainsi on détermine si l'évent présent est suffisant.

Enfin, on évalue les conséquences de l'explosion du volume à savoir :

- La longueur de flamme ;
- Les distances au sol pour lesquelles sont atteintes les valeurs de surpressions de référence ;
- Les distances atteintes par les projections de débris.

IV.2 CARACTERISTIQUES DES ENCEINTES

Les enceintes retenues pour la simulation d'explosion sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Enceinte		Structure	Dimensions	Surfaces fragiles	Type de poussières
Silo Bio	Fosse élévateurs	Plancher supérieur métallique	Longueur = 20,35 m Largeur = 10,3 m Hauteur = 6,8 m Volume total = 1 425 m ³	Plancher supérieur métallique	Poussières de céréales
	Tour de manutention (volume le plus important)	Plancher béton Parois métalliques	Surface considérée = 210 m ² Hauteur = 18,5 m Volume total = 3 892 m ³	Parois métalliques	
	Espace regroupant les têtes d'élévateurs	Plancher béton Toiture bac acier	Surface considérée = 210 m ² Hauteur = 4,4 m Volume total = 930 m ³	Toiture bac acier	
	Espace sur cellules	Plancher métallique Toiture bac acier	Longueur = 21,5 m Largeur = 20,35 m Hauteur = 4,5 m Volume = 1 975 m ³	Toiture bac acier	
	Cellule de stockage de céréales	Cellule palplanche métallique	Diamètre = 6 m Hauteur = 19 m Volume = 961 m ³	Couverture métallique	
			Diamètre = 6 m Hauteur = 19 m Volume = 280 m ³	Couverture métallique	
	Espace sous-cellules (C17 à C42)	Plancher béton Parois métalliques	Surface considérée = 506,5 m ² Hauteur = 6,5 m Volume total = 3 199 m ³	Parois métalliques	

Tableau 12 : Enceintes pour lesquelles des calculs d'explosion sont envisagés

IV.3 CARACTERISTIQUES DES POUSSIÈRES

L'annexe A du guide de l'état de l'art sur les silos¹² donne des valeurs caractéristiques des poussières de grains. De manière majorante, les valeurs suivantes pour le Silo Bio sont retenues :

- $K_{St} = 150 \text{ bar.m.s}^{-1}$ => on considère le stockage de l'Orge (K_{St} le plus important) ;
- $P_{max} = 9,3 \text{ bar}$ => on considère le P_{max} du blé (P_{max} le plus important)

IV.4 PRESSIONS DE DESTRUCTION DES STRUCTURES ET PRESSIONS REDUITES MAX (PRED, MAX)

Le tableau suivant indique les valeurs retenues de résistance des matériaux en fonction de leur constitution.

	Nature de la paroi de l'enceinte	Suppression de ruine
Equipements	Parois d'un filtre.	100 mbar
	Parois d'un cyclone.	100 mbar
	Parois d'un élévateur.	100 mbar
Bâtiments	Paroi en béton.	300 mbar
	Murs en briques ou parpaings.	200 mbar
	Tôles métalliques.	100 mbar
	Paroi en palplanche.	300 mbar
	Plafond en béton	200 mbar
	Verre.	20 mbar
	Plaque en fibro-ciment.	60 mbar ¹³
	Plaque transparente en polyester.	10 mbar
Cellules	Paroi d'une cellule parallélépipédique en béton.	450 mbar
	Paroi d'une cellule cylindrique en béton.	650 mbar
	Paroi d'une cellule métallique.	300 mbar
	Paroi d'une cellule palplanche.	450 mbar
	Toit d'une cellule béton.	200 mbar
	Toit d'une cellule métallique.	100 mbar

Tableau 13 . Suppressions de ruine des parois des enceintes étudiées.

(Principale source : INERIS, guide de l'état de l'art sur les silos, avril 2005)

La résistance d'une enceinte cylindrique est plus importante que celle d'une enceinte parallélépipédique ; ceci s'explique par un « effet anneau ».

IV.5 CARACTERISTIQUES DE DEBRIS

Les projections dépendent des matériaux de construction et des types de fixation.

Par exemple, **les bardages métalliques** peuvent rester en place. En effet, les bardages métalliques présentent, de par leur hétérogénéité de boulonnage, des zones de tenue mécanique plus faible qui, sous un chargement de

¹² Guide de l'état de l'art sur les silos, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, version 3.

¹³ Etude INERIS référence : DRA-11-127561-13591C

pression, vont céder préférentiellement. La partie de résistance plus forte sera maintenue en place en autorisant la déformation du bac acier pliable et ainsi la décharge de pression.

A l'opposé, **une plaque fibrociment** aura tendance à se fragmenter en petits et gros éclats. L'explication d'une telle fragmentation repose sur les considérations suivantes :

- La pression est exercée au centre de la plaque et les fragmentations se propagent suivant les diagonales ;
- Les trous de perçage des vis de fixation favorisent la fragmentation suivant des parallèles à la longueur ;
- L'ondulation de la plaque favorise la fragilisation au niveau des bosses et des creux.

Ces hypothèses sont confortées par le manuel TM5-1300 « *Structures to resist effects of accidental explosions* » de l'US ARMY.

Les distances de projections sont calculées en considérant les caractéristiques de projectiles indiquées au tableau suivant.

Matériau	Surface du débris	Masse surfacique
Vitre en verre	0,1 m X 0,15 m	7 kg.m ⁻²
Plaque en amiante-ciment	0,2 m X 0,5 m	10 kg.m ⁻²
Plaque métallique	0,2 m X 0,5 m	16 kg.m ⁻²
Béton	1,0 m X 1,0 m	300 kg.m ⁻²

Tableau 14 : Caractéristiques de débris d'explosion

La projection de débris à partir de bardage métallique est envisagée selon une hypothèse déterministe et majorante.

IV.6 RESULTATS

Pour chaque enceinte, la méthode de calcul appropriée a été déterminée en fonction des caractéristiques de l'enceinte (présence d'évent, type de structure, volume) et des limites de la méthode.

Le tableau des pages suivantes précise l'ensemble des calculs effectués par enceinte.

N.B. : la présence d'obstacles n'est pas prise en compte dans les calculs.

	Enceinte	Méthode de calcul	Caractéristiques de l'enceinte	Surfaces fragiles	Effets de pressions au sol	Projections au sol
Silo Bio	Fosse élévateurs	NFPA 68 puis Brode I	$V = 1\,425\text{ m}^3$ $P_{\text{rupt}} = P_{\text{rupt parois}} = 300\text{ mbar}$	<i>Plancher haut de la fosse :</i> $P_{\text{rupt}} = 100\text{ mbar}$ <i>Surface réel = 60 m²</i> <i>(Surface suffisante)</i>	$P_{\text{réel}} = 105\text{ mbar}$ Seuils de surpressions au sol : 20 mbar : 78 m 50 mbar : 39 m 140 mbar : - 200 mbar : - 300 mbar : -	Débris métallique à 5 m environ
	Tour de manutention (volume le plus important)	NFPA 68 puis Brode I	$V = 3\,892\text{ m}^3$ $P_{\text{rupt}} = P_{\text{rupt parois}} = 300\text{ mbar}$	<i>Parois métalliques :</i> $P_{\text{rupt}} = 100\text{ mbar}$ <i>Surface réel = 130 m²</i> <i>(Surface suffisante)</i>	$P_{\text{réel}} = 105\text{ mbar}$ Seuils de surpressions au sol : 20 mbar : 105 m 50 mbar : 53 m 140 mbar : - 200 mbar : - 300 mbar : -	Débris de bardage métallique à 11 m environ
	Espace regroupant les têtes d'élévateurs	NFPA 68 puis Brode I	$V = 930\text{ m}^3$ $P_{\text{rupt}} = P_{\text{rupt parois}} = 300\text{ mbar}$	<i>Toiture bac acier :</i> $P_{\text{rupt}} = 100\text{ mbar}$ <i>Surface réel = 100 m²</i> <i>(Surface suffisante)</i>	$P_{\text{réel}} = 105\text{ mbar}$ Pas d'effets au sol	-
	Espace sur cellules	NFPA 68 puis Brode I	$V = 1\,975\text{ m}^3$ $P_{\text{rupt}} = P_{\text{rupt parois}} = 300\text{ mbar}$	<i>Toiture bac acier :</i> $P_{\text{rupt}} = 100\text{ mbar}$ <i>Surface réel = 200 m²</i> <i>(Surface suffisante)</i>	$P_{\text{réel}} = 105\text{ mbar}$ Seuils de surpressions au sol : 20 mbar : 74 m 50 mbar : 37 m 140 mbar : - 200 mbar : - 300 mbar : -	Débris de bardage métallique à 15 m environ

	Enceinte	Méthode de calcul	Caractéristiques de l'enceinte	Surfaces fragiles	Effets de pressions au sol	Projections au sol
	Cellule de stockage de céréales	NFPA 68 puis Brode I	V = 961 m ³ P _{rupt} = P _{rupt} parois = 300 mbar	Couverture métallique : P _{rupt} = 100 mbar Surface réel = 40 m ² (Surface suffisante)	Préd réelle = 105 mbar Seuils de surpressions au sol : 20 mbar : 76 m 50 mbar : 38 m 140 mbar : - 200 mbar : - 300 mbar : -	Débris de bardage métallique à 14 m environ
			V = 280 m ³ P _{rupt} = P _{rupt} parois = 300 mbar	Couverture métallique : P _{rupt} = 100 mbar Surface réel = 25 m ² (Surface suffisante)	Préd réelle = 140 mbar Seuils de surpressions au sol : 20 mbar : 42 m 50 mbar : 21 m 140 mbar : - 200 mbar : - 300 mbar : -	Débris de bardage métallique à 14 m environ
	Espace sous cellules (C17 à C42)	NFPA 68 puis Brode I	V = 3 199 m ³ P _{rupt} = P _{rupt} parois = 300 mbar	Parois métalliques : P _{rupt} = 100 mbar Surface réel = 110 m ² (Surface suffisante)	Préd réelle = 105 mbar Seuils de surpressions au sol : 20 mbar : 102 m 50 mbar : 51 m 140 mbar : - 200 mbar : - 300 mbar : -	Débris de bardage métallique à 15 m environ

Tableau 15 : Effets d'explosions dans les enceintes étudiées