

**Bureau Veritas**  
**Service Risques Industriels**  
16 Chemin du Jubin  
BP 26  
69 571 DARDILLY CEDEX

**Responsables de l'étude :**

Cécile DUBIEN  
Tél. 04 72 29 70 68  
cecile.dubien@fr.bureauveritas.com

Emilie THOLLIN  
Tél. 04 72 29 32 62  
emilie.thollin@fr.bureauveritas.com



## **Modélisation des effets liés à l'explosion de la chaufferie et du local de charge**

**PRD Beauvais**

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>PHENOMENES DANGEREUX MODELISES.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>METHODOLOGIE DE CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION EN CAS D'EXPLOSION CONFINEE.....</b>	<b>3</b>
2.1	CAS OU LES SURFACES SOUFLABLES SONT SUFFISANTES .....	3
2.1.1	<i>Modélisation de l'explosion primaire.....</i>	<i>3</i>
2.1.2	<i>Modélisation de l'explosion secondaire .....</i>	<i>4</i>
2.2	CAS OU LES SURFACES SOUFLABLES SONT INSUFFISANTES .....	6
<b>3</b>	<b>SEUILS D'EFFETS DE SURPRESSION CONSIDERES .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>MODELISATION DE L'EXPLOSION DE LA CHAUFFERIE.....</b>	<b>8</b>
4.1	DONNEES D'ENTREE.....	8
4.2	CALCUL DE LA PRESSION REDUITE ET DE LA SURFACE SOUFLABLE NECESSAIRE .....	8
4.3	MODELISATION DE L'EXPLOSION DE LA CHAUFFERIE ETANT DONNE UNE SURFACE SOUFLABLE SUFFISANTE.....	9

## 1 PHENOMENES DANGEREUX MODELISES

Les scénarios accidentels modélisés sont la formation d'une atmosphère explosive (ATEX) à la stoechiométrie d'un mélange d'air et de gaz dans le volume libre du local chaufferie ou d'un local de charge et l'inflammation de cette ATEX.

## 2 METHODOLOGIE DE CALCUL DES EFFETS DE SURPRESSION EN CAS D'EXPLOSION CONFINEE

### Guides techniques de référence :

- [1] Guide de l'état de l'art sur les silos pour l'application de l'arrêté ministériel relatif aux risques présentés par les silos et les installations de stockage de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégagant des poussières inflammables - Version 3 – 2008 – MEEDDAT.
- [2] Norme NF EN 14994 – 2007 – Systèmes de protection par événement contre les explosions de gaz.

Pour modéliser les effets de surpression en cas de formation d'une atmosphère explosive (ATEX) dans une enceinte ou un local, et l'inflammation de cette ATEX, aussi appelé VCE : Vapor Cloud Explosion, plusieurs méthodes existent. Ces méthodes diffèrent selon les dispositions constructives de l'enceinte où se produit l'explosion. En effet, en fonction des caractéristiques dimensionnelles et mécaniques de la structure, le bâtiment va pouvoir encaisser ou non la surpression. Plus particulièrement, dans le cas d'un bâtiment en béton, si celui-ci est doté de surfaces fragiles (également désignées par « surface soufflables ») en quantité suffisante, jouant le rôle d'évent, alors les effets de surpression seront évacués avant de solliciter la structure au-delà de la résistance mécanique du local.

### 2.1 CAS OU LES SURFACES SOUFFLABLES SONT SUFFISANTES

Dans le cas d'un local disposant de parois soufflables (toiture en structure légère, portes, ...), deux explosions successives se produisent et sont modélisées :

- une explosion primaire, à l'intérieur du local ;
- une explosion secondaire, à l'extérieur du local, qui correspond à l'inflammation du gaz non brûlé à l'intérieur et éjecté par les surfaces soufflables ou événements. On admet (hypothèse conservatrice) que 75% du volume gazeux est brûlé à l'extérieur du local.

#### 2.1.1 Modélisation de l'explosion primaire

La méthode employée pour modéliser l'explosion primaire est la méthode de Brode / Multi-énergie 10. La démarche de calcul consiste :

- à calculer l'énergie d'explosion à l'aide du modèle de Brode ;
- à déterminer les distances d'effets des surpressions seuils à partir de l'abaque indice 10 de la méthode multi énergie représentatif de la propagation d'une onde de choc liée à l'éclatement de l'enceinte.

### Formule de Brode :

La formule de Brode permettant d'évaluer l'énergie d'explosion est la suivante :

$$Ex = \Delta P \cdot V / (\gamma - 1)$$

avec :

- Ex : énergie d'explosion (J)
- V : volume libre du local (m<sup>3</sup>)
- $\Delta P$  : pression de rupture ou d'explosion relative = Pred (Pa) pour une enceinte correctement éventée (Pred = Pression résiduelle (ou réduite) dans le local après ouverture des événements, calculée à l'aide de la NF EN 14994)
- $\gamma$  : rapport des capacités calorifiques du gaz (sans unité)  
( $\gamma = 1,3$  pour le méthane)

### Détermination de la Pred pour une enceinte avec événements :

La pression résiduelle (Pred) est la pression théorique atteinte dans le local après ouverture des événements. Cette pression est calculée avec la norme NF EN 14994 – Systèmes de protection par événement contre les explosions de gaz : Décharge des enceintes compactes isolées (Chapitre 5.2 de la EN 14994 de 2007) – en fonction de la surface des événements. Inversement la norme permet de déterminer la surface minimale soufflable permettant de préserver les parois du local.

### Suppression en fonction de la distance selon l'abaque multi énergie 10 :

Les formules correspondant au profil de la courbe multi énergie indice 10 (abaque présentée en page suivante) sont données ci-dessous (coefficients issus de Phast) où E est l'énergie d'explosion en Joules :

Seuil de surpression (mbar)	Formule pour déterminer la distance au seuil d'effet recherché
20 mbar (seuil des effets indirects)	$d_{20} = 0,217 \times E^{(1/3)}$
50 mbar (SEI)	$d_{50} = 0,109 \times E^{(1/3)}$
140 mbar (SEL)	$d_{140} = 0,046 \times E^{(1/3)}$
200 mbar (SELS et effets dominos)	$d_{200} = 0,036 \times E^{(1/3)}$
300 mbar (Dégâts très graves sur les structures)	$d_{300} = 0,028 \times E^{(1/3)}$

Distances comptées à partir du centre de l'explosion. E = énergie d'explosion en Joules.

#### 2.1.2 Modélisation de l'explosion secondaire

La méthode employée pour modéliser l'explosion secondaire est la méthode Multi-énergie.

La démarche de calcul consiste :

- à calculer l'énergie d'explosion de la combustion du nuage air-méthane à la stœchiométrie, éjecté à travers les surfaces soufflables ;
- à déterminer les distances d'effets des surpressions seuils à partir de l'abaque indice 4 de la méthode multi énergie représentatif d'une explosion d'un nuage air-gaz en milieu non ou peu confiné, non encombré, sous l'effet d'une source d'inflammation forte résultant de l'explosion primaire.

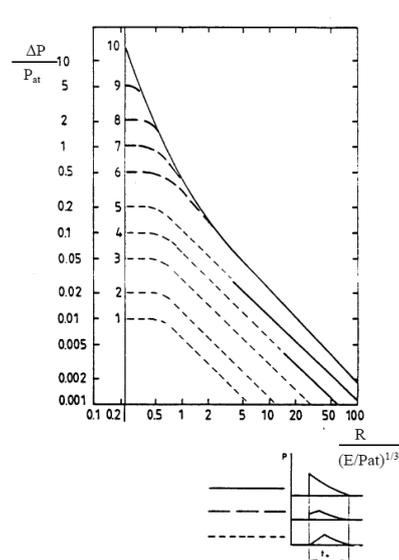
**Supression en fonction de la distance selon l'abaque multi énergie 4 :**

Les formules correspondant au profil de la courbe multi énergie indice 4 (surpression maximale atteinte = 100 mbar) (abaque présentée en page suivante) sont données ci-dessous (coefficients issus de Phast) où E est l'énergie d'explosion en Joules :

Seuil de surpression (mbar)	Formule pour déterminer la distance au seuil d'effet recherché
20 mbar (seuil des effets indirects)	$d_{20} = 0,057 \times E^{(1/3)}$
50 mbar (SEI)	$D_{50} = 0,029 \times E^{(1/3)}$
140 mbar (SEL)	Non atteint
200 mbar (SELS et effets dominos)	Non atteint
300 mbar (Dégâts très graves sur les structures)	Non atteint

Distances comptées à partir du centre de l'explosion. E = énergie d'explosion en Joules.

**Abaques multi-énergie**

Indice Multi-Energy	Seuil de surpression associé (bar)	Abaques de décroissance en fonction de la distance adimensionnée par l'énergie de l'explosion
1	0,01	 <p><i>Abaque relatif à la méthode Multi-Energie donnant les surpressions engendrées par des déflagrations à vitesse de flamme constante de volumes explosibles hémisphériques posés au sol</i></p>
2	0,02	
3	0,05	
4	0,10	
5	0,20	
6	0,50	
7	1	
8	2	
9	5	
10	10	



## 2.2 CAS OU LES SURFACES SOUFLABLES SONT INSUFFISANTES

Si les surfaces soufflables sont insuffisantes, alors seule l'explosion dans le local est considérée. Ses effets sont évalués avec la méthode Brode / Multi-énergie 10 décrite ci avant, en prenant pour la pression de rupture, deux fois la pression statique de ruine des parois (le facteur 2 constitue un coefficient d'amplification dynamique pour prendre en compte le développement de l'explosion (source INERIS Guide silo)).

### 3 SEUILS D'EFFETS DE SURPRESSION CONSIDERES

Les valeurs seuils retenues sont celles de l'arrêté ministériel 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 soumises à autorisation.

	Valeurs	Commentaires
<b>Effets sur l'homme</b>	20 mbar	Seuil des effets délimitant la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme. ⇔ Effets indirectes par bris de vitres.
	50 mbar	Seuils des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine ». ⇔ Effets irréversibles par mise en mouvement des individus ou projection de fragments de décorations diverses. <b>SEI</b>
	140 mbar	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement. ⇔ Effets létaux par risque d'écrasement ou de choc de fragment massifs de maçonnerie ou de béton non renforcé. <b>SEL</b>
	200 mbar	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement. ⇔ Effets létaux par effets directs (hémorragie pulmonaire). <b>SELS</b>
<b>Effets sur les structures</b>	20 mbar	Seuil des destructions significatives de vitres.
	50 mbar	Seuil des dégâts légers sur les structures. Destruction de 75% des vitres et occasionnelle des cadres de fenêtre.
	140 mbar	Seuil des dégâts graves sur les structures. Effondrement partiel des murs et tuiles des maisons.
	200 mbar	<b>Seuil des effets domino.</b> Destruction des murs en parpaings. Destruction de plus de 50% des maisons en briques.
	300 mbar	Seuil des dégâts très graves sur les structures.

## 4 MODELISATION DE L'EXPLOSION DE LA CHAUFFERIE

### 4.1 DONNEES D'ENTREE

	Valeurs	Commentaires
Volume total (m <sup>3</sup> )	378	Dimensions de la chaufferie L x l x h = 9 m x 6 m x 7 m
Volume libre (m <sup>3</sup> )	302	Le volume occupé par la chaudière est estimé à 20% du volume total du local
Surfaces soufflables (m <sup>2</sup> )	10	Porte = 6 m <sup>2</sup> + grilles = 4 m <sup>2</sup>
Pression statique d'activation du dispositif de décharge d'explosion P <sub>stat</sub> (mbar)	100	Hypothèse de pression à laquelle les surfaces soufflables jouant le rôle d'évent s'ouvriront (limite basse de la norme NF EN 14994)
Efficacité du dispositif de décharge d'explosion Ef	1	-
Pression de ruine des parois (mbar)	200	Pression de ruine des parois en béton

### 4.2 CALCUL DE LA PRESSION REDUITE ET DE LA SURFACE SOUFFLABLE NECESSAIRE

L'application de la norme NF EN 14994, en considérant les données d'entrée ci-dessus, conduit à une valeur de Pred de 600 mbar, soit très supérieure à la tenue de murs en béton.

On en conclut que **les parois soufflables, qui représentent une surface totale égale 10 m<sup>2</sup>, ne sont pas suffisantes pour protéger le local en cas d'explosion.** En effet, la pression réduite calculée à l'aide de la norme NF EN 14994 est très supérieure à la tenue de murs en béton.

**Pour protéger correctement le local chaufferie**, en prenant Pred = 150 mbar (on choisit une Pred légèrement inférieure à la pression de ruine du local pour garantir que le local ne sera pas détruit par l'explosion primaire), **la surface soufflable totale devra être de 22 m<sup>2</sup> minimum.**

Les modélisations qui suivent sont faites dans les deux configurations :

- Surfaces soufflables de 10 m<sup>2</sup>, insuffisantes pour protéger le local ;
- Surfaces soufflables ≥ 22 m<sup>2</sup> permettant de protéger le local.

#### 4.3 MODELISATION DE L'EXPLOSION DE LA CHAUFFERIE DANS LE CAS OU LA SURFACE SOUFLABLE N'EST PAS SUFFISANTE (< 22 M<sup>2</sup>)

La méthode Brode / Multi-énergie avec un indice 10 est utilisée (décrite au § 2).

La pression statique de ruine des parois en béton est prise égale à 200 mbar (hypothèse) soit une pression dynamique de 400 mbar et une énergie d'explosion (calculée avec la formule de Brode) de 40,80 MJ.

	Distances d'effets (m)
20 mbar (seuil des effets indirects)	76
50 mbar (SEI)	38
140 mbar (SEL)	17
200 mbar (SELS et effets dominos)	11
300 mbar (Dégâts très graves sur les structures)	10

Distances en mètres, comptées à partir du centre de la chaufferie.

#### 4.4 MODELISATION DE L'EXPLOSION DE LA CHAUFFERIE DANS LE CAS OU LA SURFACE SOUFLABLE N'EST PAS SUFFISANTE (> 22 M<sup>2</sup>)

##### Distances des effets de surpression de l'explosion primaire :

La méthode Brode / Multi-énergie avec un indice 10 est utilisée (décrite au § 2.1.1).

La pression résiduelle Pred est de 150 mbar (hypothèse) soit une énergie d'explosion (calculée avec la formule de Brode) de 15,3 MJ.

	Distances d'effets (m)
20 mbar (seuil des effets indirects)	55
50 mbar (SEI)	27
140 mbar (SEL)	12
200 mbar (SELS et effets dominos)	Non atteint
300 mbar (Dégâts très graves sur les structures)	Non atteint

Distances en mètres, comptées à partir du centre des surfaces soufflables.

### Distances des effets de surpression de l'explosion secondaire

La méthode Multi-énergie avec un indice 4 est utilisée (décrite au § 2.1.2).

L'énergie du mélange air + méthane à la stœchiométrie est de 3,23 MJ/m<sup>3</sup>. L'énergie d'explosion du nuage air-méthane à la stœchiométrie, de volume égal à 75% du volume libre du local, est donc de 732 MJ.

	Distances d'effets (m)
<b>20 mbar (seuil des effets indirects)</b>	56
<b>50 mbar (SEI)</b>	30
<b>140 mbar (SEL)</b>	Non atteint
<b>200 mbar (SELS et effets dominos)</b>	Non atteint
<b>300 mbar (Dégâts très graves sur les structures)</b>	Non atteint

Distances en mètres, comptées à partir des surfaces soufflables.

(Le calcul donne les distances à partir du centre du nuage inflammable assimilé à une sphère tangentant l'évent ; ces distances sont ensuite reportées par rapport aux façades du bâtiment).

## 5 MODELISATION DE L'EXPLOSION D'UN LOCAL DE CHARGE

### 5.1 DONNEES D'ENTREE

	Valeurs	Commentaires
<b>Volume total (m<sup>3</sup>)</b>	3 000	Dimensions d'un local de charge L x l x h = 25 m x 12 m x 10 m
<b>Volume libre (m<sup>3</sup>)</b>	2 400	Le volume occupé par les équipements est estimé à 20% du volume total du local
<b>Surfaces soufflables (m<sup>2</sup>)</b>	300	Toit en bac acier de 300 m <sup>2</sup>
<b>Pression statique d'activation du dispositif de décharge d'explosion P<sub>stat</sub> (mbar)</b>	100	Hypothèse de pression à laquelle les surfaces soufflables jouant le rôle d'évent s'ouvriront (limite basse de la norme NF EN 14994)
<b>Efficacité du dispositif de décharge d'explosion Ef</b>	1	-
<b>Pression de ruine des parois (mbar)</b>	200	Pression de ruine des parois en béton

## 5.2 CALCUL DE LA PRESSION REDUITE ET DE LA SURFACE SOUFFLABLE NECESSAIRE

L'application de la norme NF EN 14994, en considérant les données d'entrée ci-dessus, conduit à une valeur de  $P_{red}$  très inférieure à la tenue de murs en béton.

On en conclut que les parois soufflables, qui représentent une surface totale égale 300 m<sup>2</sup>, sont largement suffisantes pour protéger le local en cas d'explosion. En effet, la pression réduite calculée à l'aide de la norme NF EN 14994 est très inférieure à la tenue de murs en béton.

Les modélisations qui suivent sont donc faites uniquement dans la configuration prévue, avec surfaces soufflables de 300 m<sup>2</sup>, correctement dimensionnées pour protéger le local.

## 5.3 MODELISATION DE L'EXPLOSION D'UN LOCAL DE CHARGE, AVEC SURFACE SOUFFLABLE SUFFISANTE (= 300 M<sup>2</sup>)

### Distances des effets de surpression de l'explosion primaire :

La méthode Brode / Multi-énergie avec un indice 10 est utilisée (décrite au § 2.1.1).

La pression résiduelle  $P_{red}$  est de 150 mbar (hypothèse) soit une énergie d'explosion (calculée avec la formule de Brode) 121,6 MJ.

	Distances d'effets (m)
20 mbar (seuil des effets indirects)	109
50 mbar (SEI)	54
140 mbar (SEL)	23
200 mbar (SELS et effets dominos)	Non atteint
300 mbar (Dégâts très graves sur les structures)	Non atteint

Distances en mètres, comptées à partir du centre du centre du local.

(Le calcul donne les distances à partir du centre des surfaces soufflables. En considérant la toiture comme principale surface soufflable, ces distances sont ensuite reportées par rapport au centre du local).

### Distances des effets de surpression de l'explosion secondaire

La méthode Multi-énergie avec un indice 4 est utilisée (décrite au § 2.1.2).

L'énergie du mélange air + méthane à la stœchiométrie est de  $3,23 \text{ MJ/m}^3$ . L'énergie d'explosion du nuage air-méthane à la stœchiométrie, de volume égal à 75% du volume libre du local, est donc de 5 810 MJ.

	<b>Distances d'effets (m)</b>
<b>20 mbar (seuil des effets indirects)</b>	102
<b>50 mbar (SEI)</b>	49
<b>140 mbar (SEL)</b>	Non atteint
<b>200 mbar (SELS et effets dominos)</b>	Non atteint
<b>300 mbar (Dégâts très graves sur les structures)</b>	Non atteint

Distances en mètres, comptées à partir du centre du local.

(Le calcul donne les distances à partir du centre du nuage inflammable assimilé à une sphère tangentant l'évent. En considérant la toiture comme principale surface soufflable, ces distances sont ensuite reportées par rapport au centre du local).