

RAPPORT DE MODELISATION DES PHENOMENES DANGEREUX

Etude de dangers

Unité de valorisation des déchets ménagers et assimilés

La Chapelle Saint LUC

VALAUBIA

Référence	5389 D03 UVE La Chapelle Saint Luc Modelisations A(cl).docx
Date	14/03/2017
Nombre de pages	25
Diffusion	Restreinte

SUIVI DU DOCUMENT

Indice	Suivi du document en versions « Document de Travail »
A	Date : 14/03/17 Motif de révision : version finale Chapitres : tous
B	Date : Motif de révision : Chapitres :
C	Date : Motif de révision : Chapitres :

SOMMAIRE

1. CONTEXTE, OBJECTIFS	5
1.1. Contexte et objectifs	5
1.2. Participants à l'étude	5
2. DOCUMENTS DE REFERENCE	6
2.1. Documents de référence	6
3. METHODOLOGIE D'EVALUATION DES CONSEQUENCES DES PHENOMENES DANGEREUX	7
3.1. Méthodologie générale	7
3.2. Incendie de produits solides	11
3.2.1. Description succincte du phénomène	11
3.2.2. Modélisation des effets thermiques radiatifs	11
3.3. Incendie / Dispersion toxique	15
3.3.1. Calcul des quantités de gaz toxiques émis	15
3.3.2. Dispersion des gaz	17
3.4. Dispersion d'un nuage inflammable en phase gazeuse	18
3.4.1. Dispersion du nuage inflammable	18
3.4.2. Conditions météorologiques et rugosité	18
3.4.3. Résultats inflammables	19
3.5. Explosion de gaz en milieu non confiné (UVCE)	20
3.5.1. Choix de l'indice de sévérité d'explosion ou indice de violence (IV)	22
3.6. Flash Fire	22
3.7. Explosion de gaz en milieu confiné	23
3.7.1. Paramètre d'explosivité des gaz	23
3.7.2. Paramètres influents	23
3.7.3. Calcul des surpressions	23
3.8. Rupture pneumatique d'un équipement sous pression	24
3.9. Explosion de poussière	25
3.9.1. Description du phénomène	25
3.9.2. Paramètres d'explosivité de la poussière	25
3.9.3. Caractéristiques de l'enceinte et de l'événement	25
3.9.4. Résultats	25

TABLEAUX

Tableau 1 – Documents de référence génériques	6
Tableau 2 - Paramètre d'explosivité du méthane	23

FIGURES

Figure 1 : Géométrie de la flamme	12
Figure 2 – Synoptique de la démarche pour la caractérisation du terme source de l'incendie	15
Figure 3 – Abaque de la méthode multi énergie Suppression incidente en fonction de la distance	21

EQUATIONS

Équation 1 – Diamètre équivalent.....	12
Équation 2 – Diamètre équivalent (forme rectangulaire avec Longueur > 2,5 x largeur)	12
Équation 3 – Corrélation de Thomas.....	13
Équation 4 – Pouvoir émissif d'une flamme (TNO)	13
Équation 5 – Pouvoir émissif maximum d'une flamme (TNO).....	13
Équation 6 – Flux reçu par une cible.....	14
Équation 7 – Coefficient d'absorption atmosphérique (Brzustowski et Sommer).....	14
Équation 8 : Relation entre la puissance et la vitesse de combustion	16
Équation 9 : Relation entre le débit totale de gaz et la puissance	17
Équation 10 – Distance adimensionnelle (multi énergie)	20

1. CONTEXTE, OBJECTIFS

1.1. Contexte et objectifs

Le présent document constitue le rapport de modélisations de l'étude de danger incluse dans le dossier de demande d'autorisation d'exploiter de l'unité de valorisation énergétique (UVE) de déchets ménagers et assimilés de la Chapelle Saint Luc.

Les résultats des modélisations sont présentés dans l'étude de danger (paragraphe 6.6). Le présent document a pour objet la **description de la méthodologie, des modèles utilisés avec leurs références**.

Les scénarios de l'étude de danger sont les suivants :

- Scénario 1 : Incendie de la fosse de stockage des déchets ;
- Scénario 2 : Dispersion des fumées de l'incendie de la fosse de stockage des déchets ;
- Scénario 3 : Explosion non confinée de gaz naturel / jet enflammé suite à la rupture d'une ligne de gaz naturel à l'extérieur du hall chaudière ;
- Scénario 4 : Explosion de gaz naturel dans le hall chaudière ;
- Scénario 5 : Jet enflammé suite à la rupture de la ligne de gaz naturel dans le hall chaudière ;
- Scénario 6 : Explosion de gaz naturel ou d'un poche de monoxyde de carbone dans la chambre de combustion de la chaudière ;
- Scénario 7 : Rupture pneumatique du ballon supérieur de la chaudière ;
- Scénario 8 : Explosion dans le silo de charbon actif.

1.2. Participants à l'étude

Cette étude a été réalisée par M. PORTEJOIE, chef de projet ISO INGENIERIE, et MM. GERARD et MERENDA, consultants ISO INGENIERIE.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1. Documents de référence

Intitulé	Référence	Rév./Date
Methods for the calculation of physical effects, « Yellow Book », CPR 14 E, Third Edition	TNO, DPR 14 E	1997
Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels Feux de nappe	INERIS, DRA 006, omega 2	Oct 2002
Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbure liquide	GTDLI	2006
Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Phénoménologie et modélisation des effets	INERIS omega 16	2005
Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt, partie A	INERIS DRA-09-90977-14563A version 2	2011
Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003	NOR : DEVP1013761C	BO du MEEDDM n° 2010/12 du 10 juillet 2010
Circulaire DPPR/SEI2/FA-07-0066 du 04/05/07 relatif au porter à la connaissance " risques technologiques " et maîtrise de l'urbanisation autour des installations classées	-	non publiée

Tableau 1 – Documents de référence génériques

3. METHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX

3.1. Méthodologie générale

L'évaluation des conséquences potentielles de chaque scénario d'accident consiste à calculer la dimension de chacune de ces zones des dangers autour des installations considérées.

Pour chaque type de phénomène dangereux et, en particulier, au regard des effets générés (surpression, radiation thermique, etc.), les seuils particuliers, définis dans l'Arrêté Ministériel Français du 29 septembre 2005, correspondant à différents niveaux de gravité (effets mortels, blessures, dégâts matériels) sont appliqués.

Les types de phénomènes dangereux pouvant potentiellement être générés par les installations étudiés dans le présent document sont :

- incendie de produits combustibles ;
- dispersion toxique à l'extérieur des bâtiments ;
- explosion non confinée à l'extérieur des bâtiments / jet enflammé ;
- explosion confinée de gaz à l'intérieur d'un bâtiment ;
- rupture pneumatique d'un équipement ;
- explosion de poussières combustibles.

Les effets étudiés dans cette étude sont :

- Les effets thermiques ;
- Les effets de surpression ;
- Les effets toxiques.

Pour ces effets, l'évaluation est réalisée à partir des valeurs de référence des seuils d'effets thermiques, de surpression et toxiques définies par l'Arrêté Ministériel Français du 29 septembre 2005, données ci-contre.

Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques

Les valeurs de référence pour les installations classées sont les suivantes :

Pour les effets sur les structures :

- 5 kW/m², seuil des destructions de vitres significatives ;
- 8 kW/m², seuil des effets domino (1) et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures ;
- 16 kW/m², seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton ;
- 20 kW/m², seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton ;
- 200 kW/m², seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

Pour les effets sur l'homme :

- 3 kW/m² ou 600 [(kW/m²)^{4/3}].s, seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- 5 kW/m² ou 1 000 [(kW/m²)^{4/3}].s, seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » [...];
- 8 kW/m² ou 1 800 [(kW/m²)^{4/3}].s, seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » [...].

(1) *Seuil à partir duquel les effets domino doivent être examinés. Une modulation est possible en fonction des matériaux et structures concernés.*

Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression

Les valeurs de référence pour les installations classées sont les suivantes :

Pour les effets sur les structures :

- 20 hPa ou mbar, seuil des destructions significatives de vitres (1) ;
- 50 hPa ou mbar, seuil des dégâts légers sur les structures ;
- 140 hPa ou mbar, seuil des dégâts graves sur les structures ;
- 200 hPa ou mbar, seuil des effets domino (2) ;
- 300 hPa ou mbar, seuil des dégâts très graves sur les structures.

Pour les effets sur l'homme :

- 20 hPa ou mbar, seuils des effets délimitant la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme (1) ;
- 50 hPa ou mbar, seuils des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- 140 hPa ou mbar, seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » [...];
- 200 hPa ou mbar, seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » [...].

(1) Compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, il peut être adopté pour la surpression de 20 mbar une distance d'effets égale à deux fois la distance d'effet obtenue pour une surpression de 50 mbar.

(2) *Seuil à partir duquel les effets domino doivent être examinés. Une modulation est possible en fonction des matériaux et structures concernés.*

Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets toxiques

Les valeurs de référence pour les installations classées sont les suivantes :

	SEUILS D'EFFETS TOXIQUES POUR L'HOMME PAR INHALATION		
	Types d'effets constatés	Concentration d'exposition	Référence
Exposition de 1 à 60 minutes	Létaux	SELS (CL 5 %) SEL (CL 1 %)	Seuils de toxicité aiguë Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère, Ministère de l'écologie et du développement durable, Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2003 (et ses mises à jour ultérieures)
	Irréversibles	SEI	
	Réversibles	SER	

Tableau relatif aux valeurs de référence de seuils de toxicité aiguë (SELS : seuil des effets létaux significatifs ; SEL : seuil des effets létaux ; SEI : seuil des effets irréversibles ; SER : seuils des effets réversibles ; CL : concentration létale).

En l'absence de données, d'autres valeurs peuvent être employées sous réserve de justification.

Pour les installations classées figurant sur la liste prévue au IV de l'article L. 515-8 du code de l'environnement, la délimitation des différentes « zones de dangers pour la vie humaine » mentionnées à l'article L. 515-16 du code de l'environnement correspond aux seuils d'effets de référence suivants :

- les seuils des effets irréversibles (SEI) délimitent la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- les seuils des effets létaux (SEL) correspondant à une CL 1 % délimitent la « zone des dangers graves pour la vie humaine » ;
- les seuils des effets létaux significatifs (SELS) correspondant à une CL 5 % délimitent la « zone des dangers très graves pour la vie humaine ».

Les produits mis en jeu dans les scénarios sont :

Produits	Description	Caractéristiques thermiques
Déchets ménager et assimilés	<p>Composition en % poids [source : NALDEO] :</p> <ul style="list-style-type: none"> - matière inerte 18,52% - eau 30,87% - matière combustibles 50,61% dont : <ul style="list-style-type: none"> - carbone 20,063% - hydrogène 3,51% - oxygène 19,025% - azote 0,613% - chlore 0,304% - soufre 0,90% - fluor 0,005% 	PCI maximal = 2800 kcal/kg, soit 11,7 MJ/kg [source : NALDEO]
Gaz naturel	Assimilé à du méthane	PCI = 10 kWh/m ³ [source : INERIS, rapport d'étude n°46032 du 10/04/2006] Pmax = 7,1 bar [source : INERIS, rapport d'étude n°46032 du 10/04/2006] Kg = 55 bar.m/s [source : INERIS, rapport d'étude n°46032 du 10/04/2006]

3.2. Incendie de produits solides

Sources :

- | | | | |
|-----|--------|--|--------------|
| [1] | TNO | <i>Methods for the calculation of physical effects, « Yellow Book », CPR 14 E, Third Edition</i> | 1997 |
| [2] | INERIS | <i>Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006) Ω-2 Feux de nappe</i> | Octobre 2002 |
| [3] | GTDLI | <i>Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbure liquide</i> | 2006 |

3.2.1. Description succincte du phénomène

Un incendie peut être défini comme une combustion auto-entretenu se développant sans contrôle dans le temps et dans l'espace.

La combustion est une réaction physico-chimique exothermique entre un comburant et un combustible, déclenchée par une énergie d'activation.

Il existe plusieurs formes de combustion, différenciées par leur cinétique chimique. Parmi celles-ci, la combustion vive caractérise les feux de surface, dont les feux de stockage de combustibles et les feux de nappe font partie.

Une combustion vive se manifeste par l'émission de lumière et de chaleur au niveau de la flamme (zone où la combustion en phase gazeuse a lieu).

Trois mécanismes fondamentaux du transfert de chaleur à partir de la flamme coexistent :

- La convection,
- La conduction,
- Le rayonnement.

Le rayonnement constitue le mode de transfert privilégié pour les incendies de grande taille. Il convient donc de s'intéresser en priorité à ce mode de transfert lors de la détermination des distances d'effets thermiques.

3.2.2. Modélisation des effets thermiques radiatifs

Le modèle utilisé est le modèle de la flamme solide, dans lequel la flamme est assimilée à un volume opaque de géométrie simple rayonnant de manière uniforme sur toute sa surface.

Ce modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- Le volume visible de la flamme émet des radiations thermiques vers la cible alors que la partie non visible n'en émet pas.

La flamme est assimilée à un volume géométrique simple (cylindre, parallélépipède, cône, etc.). La base de ce volume correspond à la base du feu et sa hauteur à la hauteur pour laquelle la flamme est visible 50% du temps.

3.2.2.1. Géométrie de la flamme

3.2.2.1.1. Surface de base de la flamme

Pour l'application des corrélations visant à déterminer notamment la hauteur de flamme, il est d'usage de se ramener à une surface circulaire dont le diamètre est défini comme le diamètre équivalent, représentatif du comportement de la flamme :

$$D_{eq} = 4 \times \frac{\text{surface}}{\text{périmètre}}$$

Équation 1 – Diamètre équivalent

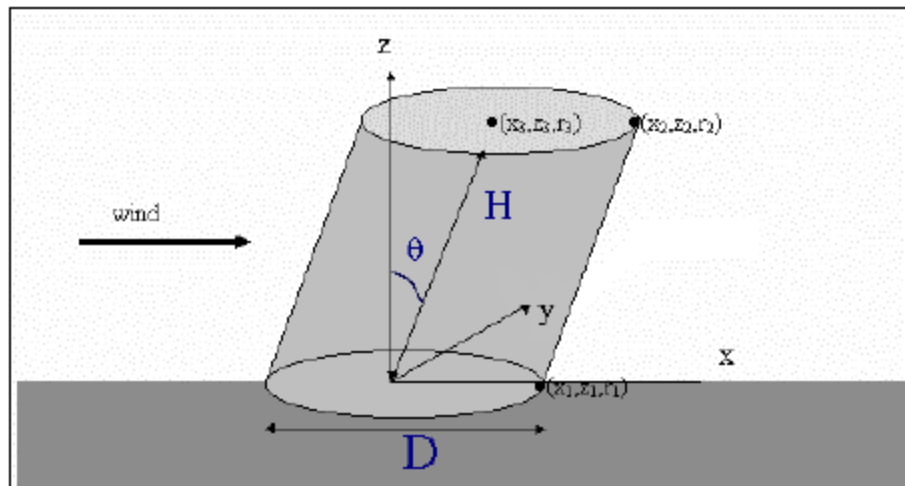


Figure 1 : Géométrie de la flamme

Cependant, ce diamètre équivalent peut ne pas être représentatif des caractéristiques du feu, en particulier dans le cas d'un foyer rectangulaire de forme allongée, dont le rapport entre la longueur et la largeur est supérieur à 2.

Pour une telle configuration, et suite aux recommandations du GTDLI [3] il est souvent plus pertinent de retenir la plus petite des dimensions caractéristiques du foyer afin d'estimer le diamètre équivalent du feu.

$$D_{eq} = \text{largeur}$$

**Équation 2 – Diamètre équivalent
(forme rectangulaire avec Longueur > 2,5 x largeur)**

3.2.2.1.2. Hauteur de la flamme

L'estimation de la hauteur de flamme est toujours délicate. De nombreuses corrélations existent (Zukoski, Cox & Chitty, Thomas, Heskestad, Steward,...). Ces formules permettent, de manière simple, d'estimer une hauteur de flamme.

L'INERIS [2] et le GTDLI [3] propose l'utilisation de la corrélation de Thomas :

$$L = 19,18 \times \dot{m}^{0,74} \times Deq^{0,735}$$

Équation 3 – Corrélation de Thomas

\dot{m} [kg.m⁻².s⁻¹] Débit massique surfacique de combustion

Deq [m] Diamètre du foyer

Le débit surfacique de combustion des hydrocarbures liquides retenu est de 0,055 kg/m². La flamme est soumise à l'action du vent. Le GTDLI [3] considère un vent de 5 m.s⁻¹. Le facteur de vue prend en compte cette inclinaison.

3.2.2.2. Pouvoir émissif de la flamme

Le pouvoir émissif de la flamme correspond à la quantité de chaleur rayonnée par unité de surface de flamme et de temps.

Il peut être estimé par une approche énergétique simple en considérant la puissance surfacique rayonnée par la flamme comme une fraction de la puissance totale libérée par la combustion.

La corrélation du TNO / Yellow Book [1] est utilisée afin de déterminer le pouvoir émissif de la flamme.

$$\Phi_0 = \Phi_{\max} \times (1 - \zeta) + \Phi_{\text{fumées}} \times \zeta$$

Équation 4 – Pouvoir émissif d'une flamme (TNO)

Φ_{\max} [kW.m⁻²] Pouvoir émissif d'une flamme sans fumées noires

$\Phi_{\text{fumées}}$ [kW.m⁻²] Pouvoir émissif des fumées (20 kW/m²)

ζ [-] Pourcentage de flux absorbé par les fumées noires (0,80)

$$\Phi_{\max} = m'' \times FR \times \frac{\Delta h_c}{1 + 4 \times \frac{L}{D_{eq}}}$$

Équation 5 – Pouvoir émissif maximum d'une flamme (TNO)

m'' [kg/m²/s] Débit massique de combustion par unité de surface en feu

FR [-] Fraction radiative

Δh_c [J/kg] Chaleur de combustion du produit

3.2.2.3. Flux reçu par une cible

La densité de flux thermique radiatif reçu par un élément extérieur à la flamme sera calculée par l'équation suivante :

$$\Phi_{reçu} = \Phi_0 \cdot F(x) \cdot \Gamma(x)$$

Équation 6 – Flux reçu par une cible

$\Phi_{reçu}$	[kW.m ⁻²]	Flux reçu par une cible
Φ_0	[kW.m ⁻²]	Pouvoir émissif de la flamme
$F(x)$	[-]	Facteur de forme
$\Gamma(x)$	[-]	Coefficient d'absorption atmosphérique
x	[m]	Distance séparant la cible du centre de l'incendie

3.2.2.4. Facteur de forme

Le facteur de forme entre deux surfaces traduit la fraction de l'énergie émise par une surface S_i interceptée par une surface S_k . Il est purement géométrique et ne dépend que de la disposition relative des deux surfaces et de leur géométrie respective.

Le flux rayonné est atténué du fait de l'angle de vue de la flamme au point d'observation (cible) et de la forme de celui-ci.

Le facteur de vue est obtenu à partir des corrélations des facteurs de vue plan ou cylindrique, en tenant compte de la vitesse du vent.

Les experts de la profession s'accordent sur une valeur de vent de 5 m.s⁻¹.

Pour le type de facteur de vue, il convient de retenir :

- pour un feu de cuvette circulaire : le facteur de vue cylindrique ;
- pour un feu de cuvette non circulaire : le facteur de vue plan.

3.2.2.5. Coefficient d'absorption atmosphérique

Le coefficient d'absorption atmosphérique peut être calculé par la formule de Brzustowski et Sommer avec un taux d'humidité relatif HR de 70% et une température de 15°C.

$$\Gamma(x) = 0,79 \times (100 / x)^{1/16} \times (30,5 \times HR)^{1/16}$$

**Équation 7 – Coefficient d'absorption atmosphérique
(Brzustowski et Sommer)**

$\Gamma(x)$	[-]	Coefficient d'absorption atmosphérique
HR	%	Humidité relative = 70 %
x	m	Distance séparant la cible du centre de l'incendie

3.3. Incendie / Dispersion toxique

Sources :

- | | | |
|-----|---|------|
| [1] | INERIS OMEGA 16, Toxicité et dispersion des fumées d'incendie
Phénoménologie et modélisation des effets | 2005 |
| [2] | INERIS OMEGA 2, Méthode pour l'évaluation et la prévention des risques
accidentels – Feux de nappe | 2001 |
| [3] | GTDLI Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe
d'hydrocarbure liquide | 2006 |
| [4] | INERIS Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par
un feu d'entrepôt, partie A, DRA-09-90977-14563A version 2 | 2011 |

La modélisation des effets toxiques issus de la décomposition des produits dans un incendie est réalisée en deux étapes :

- * le calcul des quantités de gaz toxiques émis ;
- * l'étude de la dispersion des gaz dans l'atmosphère.

3.3.1. Calcul des quantités de gaz toxiques émis

La démarche suivie afin de déterminer le terme source est décrite dans le rapport INERIS Omega 16 [1]. Les produits impliqués dans l'incendie sont constitués des éléments principaux suivants : carbone, hydrogène, oxygène, azote, ... et se recombinaient en gaz de type CO, CO₂, H₂, HCl, HCN, ...

La figure suivante explicite la démarche générale suivie pour la détermination de la composition des fumées.

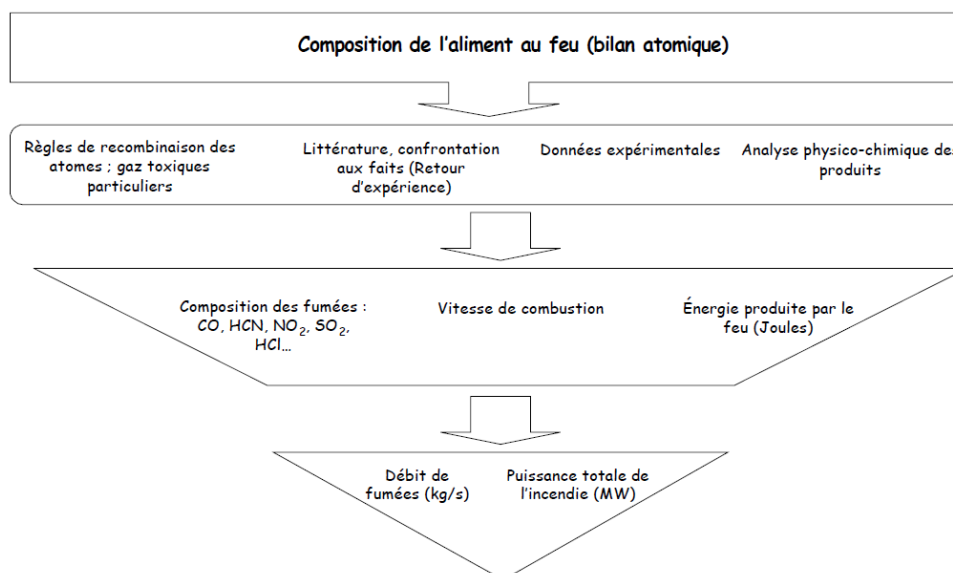


Figure 2 – Synoptique de la démarche pour la caractérisation du terme source de l'incendie

A. Composition chimique des produits

La composition de l'aliment du feu (bilan atomique) exige de connaître les produits contenus dans le stockage. La composition atomique des déchets est donc nécessaire.

B. Règles de recombinaison des atomes

La composition des gaz générés par l'incendie relève des hypothèses suivantes (issue de l'INERIS Omega 16 [1]) :

- Carbone** $CO/CO_2 = 0,1$
On suppose un feu convenablement ventilé avec ce ratio
- Soufre** $100\% S \rightarrow SO_2$
On suppose que tout le soufre s'oxyde en dioxyde de soufre
- Chlore** $100\% Cl \rightarrow HCl$
On suppose que tout le chlore se transforme en acide chlorhydrique, composé le plus stable du point de vue thermodynamique
- Azote** $40\% N \rightarrow NO_2 + HCN$
 $60\% N \rightarrow N_2$
On suppose que 40% de l'azote total est converti pour moitié en dioxyde d'azote et pour moitié en acide cyanhydrique.
- Phosphore** Au regard d'une expérimentation menée par l'INERIS, l'essentiel du phosphore se retrouverait piégé sous forme solide dans les résidus de combustion.

C. Caractéristiques thermodynamiques

Les données thermodynamiques telles que la vitesse de combustion et la chaleur de combustion (PCI) des produits sont issues de la bibliographie. Pour les mélanges, les valeurs sont calculées au prorata des masses en présence, y compris lorsqu'ils contiennent des produits incombustibles (eau, acier, ...).

La puissance thermique de l'incendie est ensuite déterminée selon la formule

$$Q_t = m'' \times A \times PCI$$

Équation 8 : Relation entre la puissance et la vitesse de combustion

Dans le cas d'un incendie extérieur, et selon l'INERIS Omega 16 [1], la dilution des gaz toxiques par l'air entraîné est liée à la puissance thermique totale de la combustion Q_t selon la formule suivante :

$$\text{Débit total gaz} = 3,24 \times Q_t$$

Équation 9 : Relation entre le débit totale de gaz et la puissance

Débit total gaz	[kg.s ⁻¹]	Débit total des gaz (toxiques + air entraîné)
Q_t	[MW]	Puissance thermique total de la combustion
m''	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	Vitesse de combustion
A	[m ²]	Surface du combustible en feu
PCI	[J.kg ⁻¹]	Chaleur de combustion du combustible

3.3.2. Dispersion des gaz

Il est supposé que le débit des gaz est constant. Le débit des fumées est ainsi la somme des gaz polluants avec le débit d'air entraîné.

Pour un incendie extérieur, et selon l'INERIS [1], il peut être considéré que ces fumées sont dispersées à partir de la hauteur des flammes de l'incendie. Cette hauteur est calculée à partir de la corrélation de Thomas décrite au paragraphe 4.2.2.1.2.

Dans le cas d'un incendie à l'intérieur d'un bâtiment disposant d'une extraction forcée de fumées, la dispersion est réalisée à la hauteur de sortie des gaines d'extraction.

La dispersion est réalisée à l'aide du logiciel PHAST version 6.7 de la société DNV-TECHNICA. Ce logiciel est largement reconnu dans la profession et a été validé par l'INERIS¹ dans une version antérieure.

Les conditions météorologiques retenues sont les suivantes.

	Conditions atmosphériques	
	F3	D5
Vitesse du vent	3 m/s	5 m/s
Stabilité atmosphérique selon Pasquill	F	D
Atmosphère	Stable	Neutre
Température ambiante	15°C	20°C
Température du sol	15°C	20°C
Humidité relative	70 %	70 %
Radiation solaire	0,6 W/m ²	0,6 kW/m ²

Les polluants sont un mélange de gaz, certains étant toxiques. Un seuil équivalent est déterminé afin de déterminer les zones d'effets, tel que décrit dans le rapport Omega 16 de l'INERIS [1]. Ceci permet de prendre en compte de façon sommaire l'effet simultané de tous les gaz toxiques.

¹ INERIS : Evaluation de l'aptitude du logiciel PHAST à traiter des conséquences de mise à l'atmosphère de produits inflammables et/ou toxiques, ref. EXP-Ymo-GMv-BCh/DG Z1/ 78 1310, 1991

3.4. Dispersion d'un nuage inflammable en phase gazeuse

Le calcul de dispersion est réalisé avec le logiciel PHAST dans sa version 6.7 et utilise la version 2 du modèle de dispersion.

3.4.1. Dispersion du nuage inflammable

Tous les phénomènes de rupture de canalisation ou de fuite de gaz naturel peuvent engendrer un nuage inflammable.

Afin de déterminer les rayons des cercles de dommage, on considèrera systématiquement l'hypothèse pénalisante d'une inflammation du nuage de gaz lorsque sa masse explosible est maximale, et ce, malgré l'absence de source d'ignition évidente à proximité immédiate des installations.

L'ignition pourra être immédiate (on aura alors un jet enflammé à partir du point de fuite) ou retardée (on aura alors un VCE / flash fire).

Les explosions accidentelles de gaz à l'air libre, ou VCE, constituent un des événements les plus redoutés concernant les activités associées aux gaz inflammables. Ce type d'accident comprend généralement la succession d'étapes suivantes :

- rejet dans l'atmosphère d'un produit combustible, le produit étant en phase gaz ou en phase liquide ; les combustibles liquides rejetés peuvent rester en suspension (formation d'aérosols) ou se disperser au sol pour former une flaque qui en s'évaporant conduit à son tour à un rejet diffus de gaz,
- mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable,
- de manière concomitante, dispersion et advection du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable,
- inflammation de ce volume,
- propagation d'un front de flamme au travers de la ou des parties inflammables du nuage ; ce front de flamme agit à la manière d'un piston sur les gaz environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne si sa vitesse de propagation est suffisante ou si les gaz sont confinés ; dans tous les cas, la propagation des flammes s'accompagne d'une expansion des gaz brûlés qui passent par des températures de plusieurs centaines de °C et jusqu'à 2000 °C environ ;
- enfin, le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

Ce phénomène dangereux est décrit dans le rapport de l'INERIS de juillet 1999.

3.4.2. Conditions météorologiques et rugosité

Les calculs de distances d'effets associés aux phénomènes dangereux nécessitent la connaissance des paramètres environnementaux liés aux conditions météorologiques et à la nature du sol (rugosité).

Le choix des conditions météorologiques est basé sur des critères de probabilité et dépend essentiellement du lieu géographique de l'installation étudiée.

Le choix de la rugosité du sol dépend principalement de l'environnement local autour de l'installation étudiée.

Les conditions météorologiques sont définies par:

- la température ambiante
- l'humidité relative

- la vitesse et la direction du vent
- la stabilité atmosphérique (5 classes selon Pasquill ou 2 classes selon Doury etc.)
- le rayonnement solaire

Ces conditions doivent être définies selon la localisation du site à partir des données météorologiques disponibles.

Il est à noter que la réglementation locale peut imposer la considération de conditions météorologiques génériques a minima.

Pour le site, les conditions retenues sont les suivantes :

	Conditions atmosphériques	
	F3	D5
Vitesse du vent	3 m/s	5 m/s
Stabilité atmosphérique selon Pasquill	F	D
Atmosphère	Stable	Neutre
Température ambiante	15°C	20°C
Température du sol	15°C	20°C
Humidité relative	70 %	70 %
Radiation solaire	0 kW/m ²	0,5 kW/m ²

Le paramètre de rugosité a été fixé dans PHAST à 0,17 correspondant à 1 m (site industriel).

3.4.3. Résultats inflammables

Le calcul de dispersion d'un nuage inflammable permet d'obtenir trois types de résultats :

- la distance maximale atteinte par le nuage inflammable à sa limite inférieure d'inflammabilité ou distance à la LIE,
- la masse de gaz contenue dans le nuage inflammable (ou masse inflammable) : en théorie, il s'agit de la masse de gaz dont la concentration est comprise entre la LIE et la LSE. En pratique, l'expérience montre que les parties du nuage initialement trop riches en combustible se diluent pendant l'expansion volumétrique du nuage et brûlent également.

Il est donc préférable d'évaluer la quantité inflammable à partir de la masse de gaz de concentration supérieure à la LIE, sachant que la quantité initialement trop riche ne représente que quelques pourcents de la quantité initialement comprise entre la LIE et la LSE,

- la forme du nuage, en particulier sa largeur et sa hauteur.

La distance à la LIE représente le rayon maximal, compté à partir du point de fuite, qui peut être atteint par le nuage inflammable.

Cela ne signifie pas pour autant que le nuage inflammable recouvre la surface du cercle délimité par la distance à la LIE, mais qu'il prend la forme d'un panache inflammable dont la longueur est au maximum égale à la distance à la LIE.

3.5. Explosion de gaz en milieu non confiné (UVCE)

Sources :

- [1] TNO Methods for the calculation of physical effects, « Yellow Book », CPR 1997
14 E, Third Edition

La principale méthode utilisée aujourd'hui en France pour évaluer les effets de surpression liés à une explosion de gaz inflammable non confinée est la **méthode Multi-énergie**.

Elle est décrite ci-après.

La méthode multi-énergie est un modèle d'évaluation « simple » des effets de surpression dus à une explosion de gaz en milieu non confiné, basée sur le concept « multi énergie » selon lequel seules les zones encombrées contribuent de manière significative à la surpression créée lors de l'explosion. Ainsi, l'explosion n'est plus représentée de façon globale : elle est considérée comme un ensemble de sous explosions correspondant aux différentes zones du nuage. Chacune de ces zones est caractérisée par une onde de surpression qui est fonction de la « violence » de l'explosion dans cette partie. D'où le nom « multi énergie ».

L'application de la méthode demande d'une part la détermination de l'énergie de chaque zone du nuage air/combustible (en supposant que la composition du mélange est stœchiométrique) et d'autre part le choix pour chaque région d'un indice allant de 1 à 10 qui caractérise la violence de l'explosion. Les différents abaques proposés par le TNO peuvent ensuite être utilisés pour déterminer les caractéristiques de l'onde en un point donné.

Les abaques proposés par la méthode multi-énergie peuvent être utilisés dans le cadre de la détermination des effets d'une explosion en milieu non confiné selon le cheminement suivant :

- Estimation de l'énergie disponible pour l'onde de surpression en déterminant la masse inflammable maximale atteinte au cours de la dispersion,

Remarque :

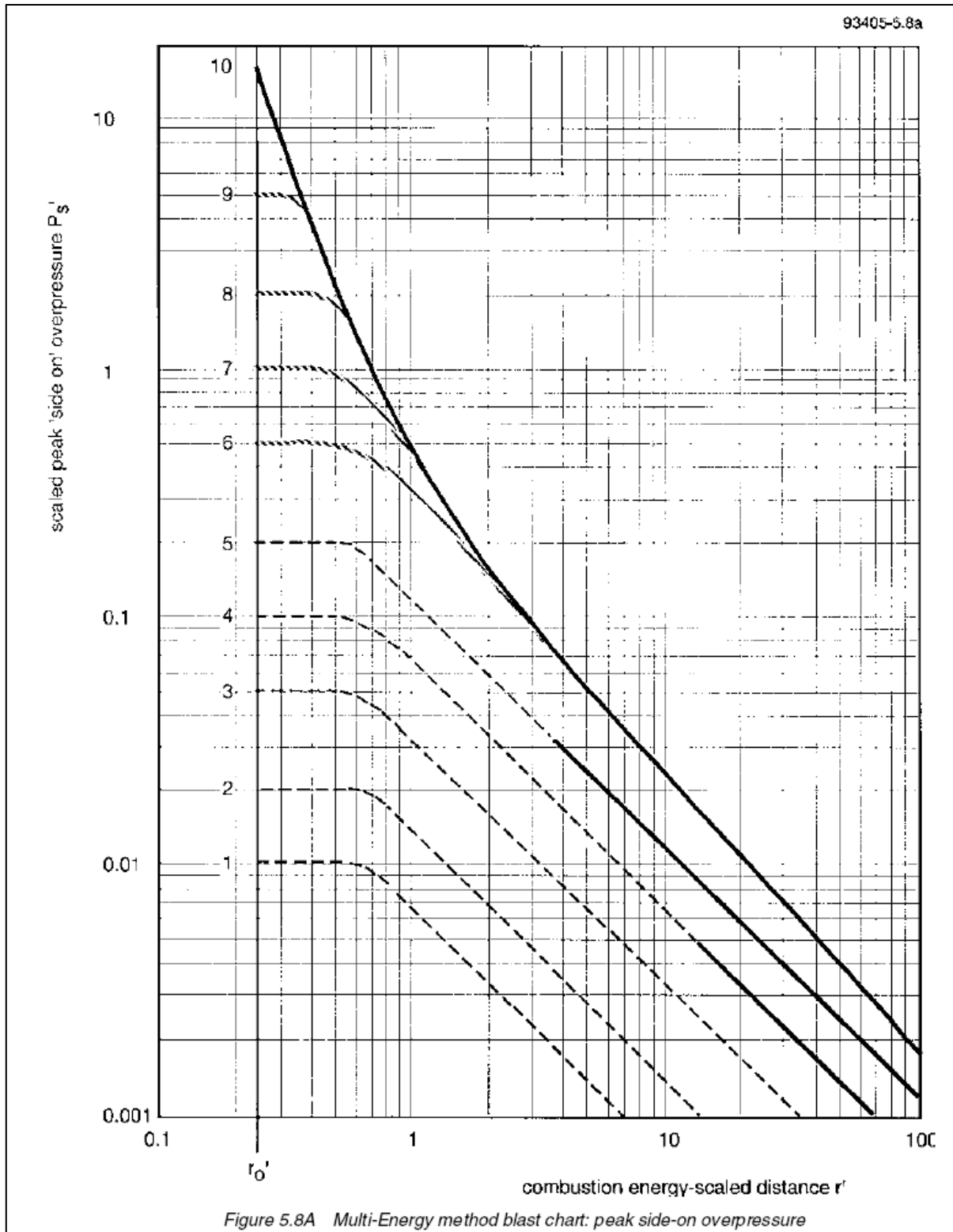
Le phénomène de VCE ne sera pas retenu pour une masse inflammable inférieure à une valeur seuil critique, dépendant de l'encombrement de la zone à l'origine de l'explosion :

- 10 kg pour les explosions en unité. En effet, en dessous d'une telle valeur, la distance d'atteinte du seuil de 140 mbar (seuil d'apparition des premiers effets létaux) est inférieure à 35 m pour une unité de raffinerie. C'est-à-dire que les effets létaux sont alors très probablement contenus à l'intérieur de l'unité considérée.
- 100 kg pour les explosions en champ libre ou dans des zones peu encombrées.
- Pour information, les distances d'effets pourront être affichées.
- Calcul de la distance adimensionnelle r' selon :

$$r' = \frac{r}{\left(\frac{E}{p_a}\right)^{1/3}}$$

Équation 10 – Distance adimensionnelle (multi énergie)

- Utilisation des abaques.



**Figure 3 – Abaque de la méthode multi énergie
 Surpression incidente en fonction de la distance**

3.5.1. Choix de l'indice de sévérité d'explosion ou indice de violence (IV)

Les critères de sélection de l'indice de sévérité d'explosion sont les suivants :

- Le degré de confinement de la zone (présence de plans solides (murs, sol, etc...) s'opposant à la propagation de l'onde de pression dans une ou plusieurs directions)
- Le degré d'encombrement de la zone (présence d'obstacles susceptibles de générer des turbulences et d'accélérer ainsi le front de flamme).
- L'énergie de la source d'ignition, qui peut être forte dans le cas de la foudre ou d'une explosion primaire ou faible dans le cas d'étincelles par exemple.

Le « Yellow Book » du TNO dans son chapitre 5 permet de définir l'indice de sévérité d'explosion en fonction de ces trois critères.

L'indice de sévérité d'explosion varie généralement :

- entre 3 et 4 pour une explosion en champ libre ou dans une zone très peu encombrée,
- indice 4 pour un parc de stockage ou pour une zone de chargement/déchargement camions ou wagons comportant peu (moins de 4) de rangées de camions/wagons simultanément,
- indice 5 pour une zone de chargement/déchargement camions ou wagons comportant beaucoup de rangées de camions/wagons simultanément,
- entre 5 et 6 à l'intérieur d'une unité chimique (l'UIC recommande un indice de 5,5 pour les unités chimiques)
- Un incrément peut éventuellement être considéré pour tenir compte de la forte réactivité de certains produits lorsqu'ils sont en proportion significative (hydrogène, éthylène, acétylène, ...).

Application au site : L'indice de sévérité retenu est **l'indice 4**.

3.6. Flash Fire

En cas d'inflammation d'un mélange inflammable [air-combustible] et si la combustion a lieu dans un environnement peu ou pas encombré, les effets thermiques sont prépondérants devant les éventuels effets de surpression.

Les vitesses de flamme sont alors quasiment proportionnelles à la vitesse du vent et de l'ordre tout au plus de 30 à 40 m/s. La propagation de telles flammes à relativement faibles vitesses engendrent des surpressions maximales de l'ordre de 2 kPa (20 mbar). Dans ces conditions, le terme VCE (Vapour Cloud Explosion) n'a plus lieu d'être et on préférera la dénomination « feux de nuage » ou encore « flash-fire ».

Il est néanmoins important de garder à l'esprit que les séquences accidentelles conduisant à une explosion de gaz à l'air libre (VCE) et à un flash-fire sont identiques. Seule la présence d'obstacle et/ou de confinement, susceptible d'accélérer la propagation des flammes et donc de modifier le régime de combustion, intervient dans la distinction entre les deux phénomènes.

Ainsi, on utilisera le vocable « flash-fire » pour décrire **les effets thermiques d'une explosion de gaz à l'air libre**, que les effets de surpression soient négligeables ou non.

3.7. Explosion de gaz en milieu confiné

Lorsqu'une enceinte contient une phase gazeuse inflammable, le phénomène d'explosion du gaz peut être caractérisé. Les calculs comprennent deux étapes successives, la vérification du bon dimensionnement des événements présents, puis le calcul des surpressions de l'explosion.

La vérification de la surface d'évent est réalisée à partir **d'une des normes de dimensionnement d'événements** :

- norme NF EN 14494 version 2007,
- norme NFPA 68 version 2007.

3.7.1. Paramètre d'explosivité des gaz

Les normes de dimensionnement d'évent utilisent notamment la pression maximale d'explosion **P_{max}** et la vitesse maximale d'augmentation de la pression **K_g**, qui sont des constantes liées au gaz considéré. Le tableau ci-dessous énumère quelques valeurs pour des gaz classiques.

	K _g (bar.m/s)	P _{max} (bar relatif)
Méthane CH ₄	55	7,1

Tableau 2 - Paramètre d'explosivité du méthane

3.7.2. Paramètres influents

Des caractéristiques spécifiques de l'enceinte, influent sur la pression de l'explosion et donc sur les surfaces d'événements nécessaires :

- l'allongement de l'enceinte : lorsque $L/D > 2$, les formules de calcul des deux normes de dimensionnement changent pour augmenter la pression de l'explosion ;
- la pression initiale de l'enceinte : lorsque la pression initiale de l'enceinte est supérieure à la pression atmosphérique, la pression de l'explosion augmente ;
- la conduite de décharge : lorsque qu'une conduite de décharge est présente, la surface d'évent nécessaire augmente. Pour des conduites de plus de 3m, les surfaces nécessaires sont très importantes.

3.7.3. Calcul des surpressions

Les effets de l'explosion sont calculés en associant **un calcul de Brode et la méthode multi-énergie associée à un indice 10**.

Le calcul de Brode permet d'évaluer l'énergie disponible lors de l'explosion. Cette énergie dépend du volume et de la pression réduite de l'explosion. Afin de déterminer l'énergie d'explosion, et en l'absence d'évent, la pression de l'explosion est égale à 2 fois la pression de résistance des parois (source : Guide de l'état de l'art sur les silos, version 3).

3.8. Rupture pneumatique d'un équipement sous pression

L'approche est la même que pour l'explosion confinée de gaz à la différence près que, dans l'équation de Brode, le gamma du gaz est celui du gaz contenu dans le ciel de l'équipement et non celui des gaz brûlés (ex. Gamma de l'eau = 1,334 ; Gamma de l'azote = 1,4013 et Gamma du biogaz = 1,294).

Rappel de l'équation de Brode :

$$E = \frac{\Delta PV}{\gamma - 1} = \frac{(P_{Ex} - P_{Atm})V}{\gamma - 1}$$

Où	E	=	Energie transmise à l'onde en J
	$P_{Ex} - P_{atm}$	=	Pression de rupture en Pa
	γ	=	Ratio des chaleurs spécifiques à pression et volume constants
	V	=	Volume de la phase gaz en m ³

De façon majorante, nous avons considéré que 100% de l'énergie était utilisée pour la formation de l'onde de surpression. **L'indice 10** de la méthode multi-énergie (TNO) est ensuite utilisé pour la décroissance de l'onde de pression.

3.9. Explosion de poussières

Les méthodes de calcul employées sont préconisées par le Guide de l'Etat de l'Art sur les Silos (version 3, 2008, INERIS). Elles permettent de calculer les surpressions engendrées par l'explosion de poussière de matières combustibles pulvérulents telles que le charbon actif. Ainsi, ces effets de surpression sont déterminés par une méthode associant **un calcul de Brode et un indice multi-énergie**. La suffisance des événements est calculée à l'aide d'une des **normes de dimensionnement d'événements** :

- norme NF EN 14491 version 2006 ;
- norme NFPA 68 version 2007 ;

Les normes possèdent des domaines d'application spécifiques. Ainsi, son choix est directement lié aux caractéristiques de l'explosion et de l'enceinte.

3.9.1. Description du phénomène

Le phénomène d'explosion de poussière apparaît lors de la réunion de 6 paramètres, parlant ainsi de l'hexagone de l'explosion :

- la source d'inflammation
- le confinement
- le comburant (l'air)
- la mise en suspension de la poussière
- la combustibilité de la poussière
- la concentration suffisante en poussière

3.9.2. Paramètres d'explosivité de la poussière

Les caractéristiques d'explosivité des poussières sont la pression maximale d'explosion **Pmax** et le coefficient maximal d'explosivité **Kst**.

Les valeurs, issue de la littérature, utilisées pour les calculs dans le cadre de cette étude sont :

	Kst	Pmax
Charbon actif (Charcoal activated) [source : NFPA 68, 2007]	14 bar.m/s	7,7 bar

3.9.3. Caractéristiques de l'enceinte et de l'événement

Les dimensions de l'enceinte subissant l'explosion entre en ligne de compte pour le calcul. Le volume ne tient pas compte de l'encombrement matériel ou matière. Les résistances à la pression des parois de l'enceinte et des surfaces soufflables sont également nécessaires et peuvent être déterminées soit par :

- une approche majorante à partir des ordres de grandeurs fournis par le Guide de l'Etat de l'Art sur les silos (page 27 sur 72) (solution retenue) ;
- une étude spécifique de résistance des matériaux et des structures.

3.9.4. Résultats

Les résultats fournissent les informations suivantes :

- la suffisance de l'événement en place,
- la pression résiduelle de l'explosion, qui est la pression maximale atteinte dans l'enceinte. Cette pression maximale doit donc être inférieure à la pression de rupture des parois afin que l'enceinte reste intègre,
- les effets de surpression au sol, calculées par la méthode de Brode associée à un indice multi-énergie.