

Evaluation des effets de surpression liés aux phénomènes d'explosion

Méthodologie

CONSULTING

SAFEGE
444, Avenue du Général Leclerc

77190 DAMMARIÉ LES LYS

Agence Ile de France

Date : Janvier 2017

Nom Prénom : SG

Méthodologie

Evaluation des effets de surpression liés aux phénomènes d'explosion

Sommaire

1.....	Qu'est-ce qu'une explosion ?	3
2.....	UVCE ou explosion confinée ?	5
3.....	Calcul de l'énergie d'explosion	6
3.1	Énergie de Brode	6
3.2	Énergie de combustion	8
4.....	Calcul des distances de surpression	9
4.1	Le modèle TNO Multi-énergie	9
4.2	Le modèle équivalent TNT	14
4.3	La méthode de Strehlow-Baker	17
5.....	Les effets d'une explosion	19
5.1	Ordres de grandeur pour les structures	19
5.2	Ordre de grandeur pour l'homme	21
5.3	Les seuils réglementaires – arrêté du 29/09/2005	21

Tables des illustrations

Figure 1 :	Courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite	10
Figure 2 :	Grille de Kinsella	12
Figure 3 :	Arbre de décision : unité de process	13
Figure 4 :	Abaque TM5-1300 donnant la surpression en fonction de la distance réduite	15

1 QU'EST-CE QU'UNE EXPLOSION ?

Une explosion est une libération brutale d'énergie avec production d'effets mécaniques et éventuellement thermiques. Une explosion peut être de plusieurs natures :

1. Explosions physiques :

Elles sont liées à l'éclatement d'un contenant dont la pression intérieure est devenue trop élevée, par montée en pression d'une phase vapeur ou liquide surchauffée.

Lors de l'augmentation de la pression dans un contenant, les parois les plus fragiles se rompent lorsque la contrainte est trop importante. La rupture du contenant permet la libération de la pression contenue qui se traduit par la propagation d'une onde de pression aérienne.

2. Explosions thermiques :

On parle d'explosion thermique lorsqu'il y a une combustion interne au système. C'est notamment le cas de l'inflammation d'un mélange de vapeurs.

Les conditions à réunir pour qu'une combustion ait lieu sont présentées par l'hexagone de l'explosion ci-dessous :



La propagation du front de flamme à travers le mélange combustible agit comme un piston sur l'air environnant et entraîne mécaniquement la formation d'ondes de surpressions. Ces surpressions dépendent donc de la vitesse de propagation du front de flamme.

De nombreux paramètres, dont notamment la turbulence du mélange explosif, ont une influence considérable sur la vitesse de propagation du front de flamme. En effet, la turbulence favorise une meilleure efficacité de la combustion et par conséquent une vitesse de propagation du front de flamme plus importante. De fait, l'effet piston est renforcé, et en conséquence, plus de turbulence est induite dans le mélange en amont du front de flamme. Cette rétroaction positive est à la source des ondes de surpressions destructrices parfois observées.

3. Explosions chimiques :

Une explosion chimique est une explosion liée à un emballement thermique. L'emballement thermique correspond à la perte de contrôle de température d'un milieu réactionnel, due à une réaction exothermique.

L'emballement thermique peut conduire à l'explosion, qui est caractérisée par une libération brutale d'une quantité importante d'énergie, souvent accompagnée de fortes émissions de gaz et/ou vapeur qui peuvent être inflammables et/ou toxiques.

Dans le cas d'une explosion physique, l'explosion est forcément confinée.

En revanche, dans le cas d'une explosion thermique, l'explosion peut être confinée (éclatement d'un réservoir de liquide inflammable) ou non confinée (il s'agit alors de l'explosion non confinée d'un nuage de vapeur) appelée également UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion).

On s'attachera à donner, pour chaque situation rencontrée, les méthodes de calcul des distances de surpression → **Voir le schéma présenté page 5 du présent rapport.**

Notons toutefois que les différentes méthodes se basent sur le même principe :

- 1- **Calcul de l'énergie de l'explosion**
- 2- **Calcul des distances d'effets de surpression**

2 UVCE OU EXPLOSION CONFINÉE ?

UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) :

L'UVCE est une explosion de gaz à l'air libre. Le phénomène d'explosion suppose la présence d'un mélange inflammable (dans les limites d'explosivité) et d'une source d'ignition à proximité du point de fuite ou du nuage.

Après inflammation du mélange inflammable, la combustion, appelée aussi front de flamme, se propage dans le mélange inflammable non brûlé. Ce front de flamme, associé à l'expansion volumique des gaz brûlés (boule de feu), agit à la manière d'un piston sur les gaz frais environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne, appelée déflagration, si sa vitesse de propagation est suffisante.

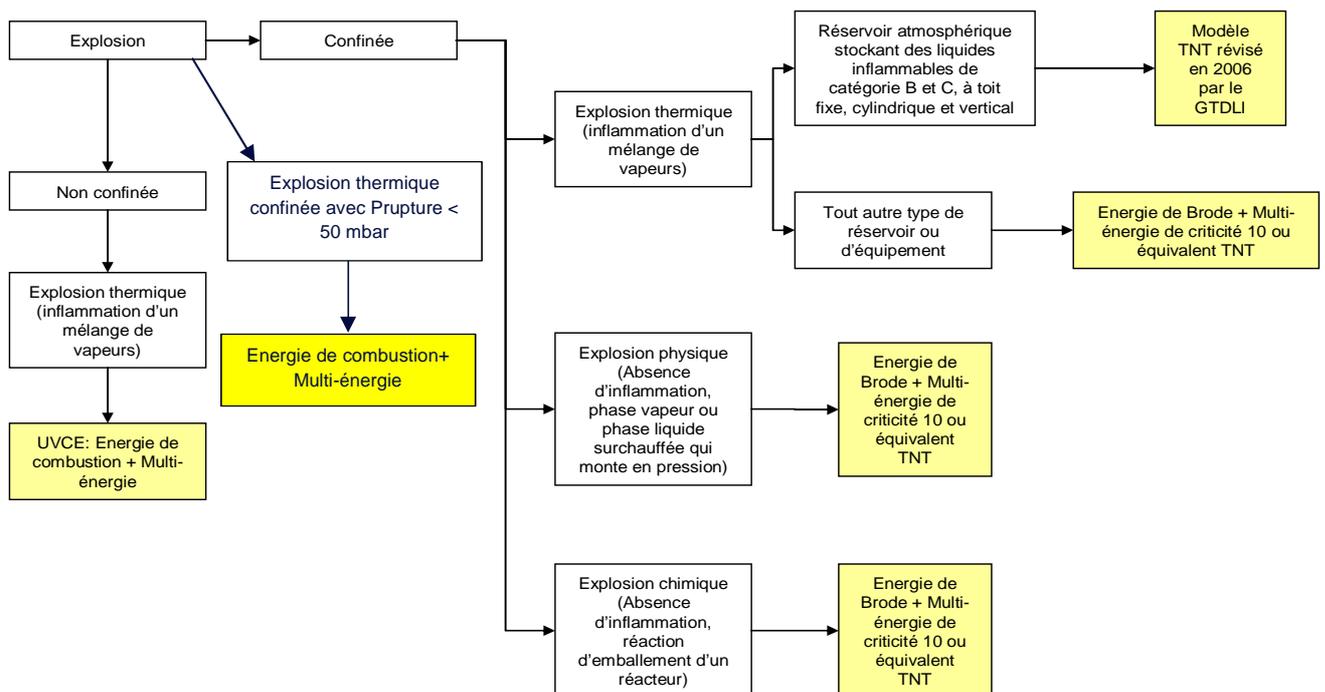
Le terme UVCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés. En l'absence d'effets de pression le terme Flash-fire est utilisé.

Dans les deux cas il s'agit du même phénomène physique, à savoir la combustion d'un mélange gazeux inflammable.

Explosion confinée :

L'explosion confinée est un éclatement pneumatique d'une capacité ou d'une enceinte suite à une montée en pression interne. Le relâchement brutal lié à la rupture de l'enceinte ou du contenant engendre une onde de pression aérienne et peut générer des effets de projection (missiles). L'énergie disponible pour l'explosion dépend du type de rupture → **voir les pressions de ruptures chapitre 3.1.1.**

Le schéma ci-dessous aide à la prise de décision concernant la modélisation la plus adaptée à chaque cas :



3 CALCUL DE L'ENERGIE D'EXPLOSION

Deux méthodes principales permettent de calculer l'énergie de l'explosion :

1. **L'énergie de Brode ;**
2. **L'énergie de combustion.**

3.1 Énergie de Brode

L'énergie de Brode traduit l'augmentation de l'énergie interne d'un réservoir ou d'un équipement produite par l'accroissement de la pression. Cet accroissement peut être dû à une augmentation de la température des gaz (dans le cas d'une explosion thermique ou d'une explosion chimique) ou à l'injection de gaz supplémentaire (dans le cas d'une explosion physique).

Lorsque la pression de rupture d'une enceinte est connue, le calcul de l'énergie de pression résiduelle après rupture de l'enceinte peut être réalisé avec l'équation dite de Brode (Proust, 1991). Cette énergie est l'énergie pouvant participer à la production de missiles, d'ondes de surpression ou de flux thermiques.

Selon le premier principe de thermodynamique, l'énergie véhiculée dans l'onde de surpression répond à la formule suivante :

$$E_{Brode} = \frac{(P_1 - P_0) \cdot V_1}{\gamma_1 - 1}$$

Avec :

P1 = Pression absolue dans la capacité au moment de sa rupture (Pa)

P0 = Pression atmosphérique (Pa)

V1 = Volume du ciel gazeux (m³)

γ1 = Rapport des chaleurs spécifiques du gaz (1,4 pour les gaz diatomiques, 1,66 pour les gaz monoatomiques et 1,33 pour la vapeur d'eau)

Lorsque la pression de rupture n'est pas connue avec précision ou par sécurité on peut de manière majorante prendre en compte une pression de rupture égale à trois fois la pression de service de l'enceinte (INERIS – Rapport Ω15 Éclatement de réservoir).

Sinon, la pression de rupture peut-être retenue suivant les cas présentés dans le tableau suivant :

Type de capacité	Origine de l'éclatement	Type de rupture	Δp (Pression de rupture absolue- pression ambiante)	Source
Capacité sous pression, réacteur, capacité atmosphérique	Sur-remplissage augmentation de pression	--	Prupture statique	Ω 15 Ineris 2013
	Capacité prise dans un feu augmentation de pression	--	< Prutpure à température ambiantes	Ω 15 Ineris 2013
		Système avec soupape	1,21x Pression de tarage des soupapes	Yellow Book (7.29)
	1,1 x Pression de tarage des soupapes		Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)	
	Explosion interne de la phase gazeuse	--	2 x Prupture statique	Ω 15 Ineris 2013
	Emballement de réaction	--	6,5 x Pservice	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
		--	7,5 x Pservice	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
		Système avec soupape	2,5 x Pdesign	Yellow Book (7.29)
	Incidence de fatigue corrosion affaiblissement mécanique	--	Prupture statique	Ω 15 Ineris 2013
			Pression de stockage ou de service	Yellow Book (7.29)
Pservice relative			Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)	
Impact projectile	--	Pservice relative	Ω 15 Ineris 2013	
Bac atmosphérique de liquide inflammable	Explosion interne de la phase gazeuse	Frangible	10 x Pvaleur de la rupture de la liaison frangible	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
	Explosion interne de la phase gazeuse	Non frangible	1,5 x Pservice	Guide bleu UFIP – juil 02 (p.385)
			Modèle TNT révisé du GTDLI pour les bacs atmosphériques voir chapitre 4.2.2	
Pressurisation lente liée à une lente montée en pression liée à un incendie externe	--	Note de diffusion BRTICP/2008-638/OA du 23/12/08 relative à la modélisation des effets liés au phénomène de pressurisation de bac atmosphérique à toit fixe → www.ineris.fr/aida . Document ancien abrogé par la circulaire du 10 mai 2010, mais toujours utilisé au titre de méthode reconnue par le ministère.		
Silo	Explosion interne de poussières	Système non événementé	2 x Prupture statique	Guide silo Ineris 2008
		Système événementé	Pred	Guide silo Ineris 2008

3.2 Énergie de combustion

L'énergie de combustion est l'énergie dégagée par la réaction de combustion d'un gaz par l'oxygène de l'air. Le calcul de cette énergie est uniquement valable dans le cas d'une explosion non confinée de type UVCE dont les étapes sont les suivantes :

1. **rejet dans l'atmosphère d'un gaz ou d'un liquide inflammable volatil, avec ou sans émission d'aérosols,**
2. **évaporation de la nappe de liquide formée, dans le cadre d'un rejet de liquide,**
3. **formation d'un nuage inflammable entre l'air et le gaz,**
4. **dispersion du nuage air-gaz compris entre la LIE et la LSE qui s'enflamme en présence d'une source d'ignition,**
5. **propagation du front de flamme dans le nuage inflammable provoquant une onde de pression aérienne.**

L'énergie de combustion est donnée par la formule suivante :

$$E = \Delta H \times m_{\text{explosible}}$$

$$E = \Delta H \times \rho_{\text{vol}} \times C_{\text{stoecho}} \times V_{\text{explosible}}$$

Avec :

E : énergie de combustion en kJ

ΔH : chaleur de combustion en kJ/kg

$m_{\text{explosible}}$: masse de produit mise en jeu dans l'explosion en kg

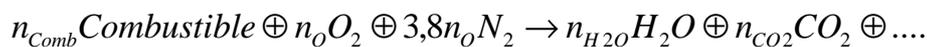
$V_{\text{explosible}}$: volume du nuage explosible en m³

ρ_{vol} : masse volumique du gaz (kg/m³)

C_{stoecho} : concentration stœchiométrique (en %)

Où l'on a :

$$C_{\text{stoecho}} = \frac{n_{\text{Comb}}}{n_{\text{Comb}} + 4,8n_{\text{O}}}$$



4 CALCUL DES DISTANCES DE SURPRESSION

Il existe plusieurs méthodes pour calculer les surpressions aériennes dues aux explosions. Les plus utilisées sont :

- le modèle **TNO Multi-energy**, pour des explosions **confinées** ou **non confinées (UVCE)**,
- l'**équivalent TNT**, pour des explosions **confinées** ;
- la **méthode de Strehlow-Baker**, pour des explosions thermiques exclusivement.

4.1 Le modèle TNO Multi-énergie

4.1.1 Principe du modèle Multi-énergie

Le principe de ce modèle, développé par Van den Berg au TNO, est d'accumuler la masse participante à l'explosion, évaporée dans un environnement plus ou moins encombré.

La méthode conduit, en quatre étapes, à évaluer le niveau de pression atteint en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable.

1. Calcul du rayon caractéristique :

$$R_c = \left(\frac{E}{P_0} \right)^{1/3}$$

Avec :

E en Joules

P₀ pression atmosphérique en Pascal (101 325 Pa)

2. Choix du degré de sévérité :

Dans le cas d'une explosion non confinée, le choix du degré de sévérité peut se faire suivant la méthode de KINSELLA ou TNO présentées au chapitre 4.1.2. Dans le cas d'une explosion confinée, le degré de sévérité est fixé à 10.

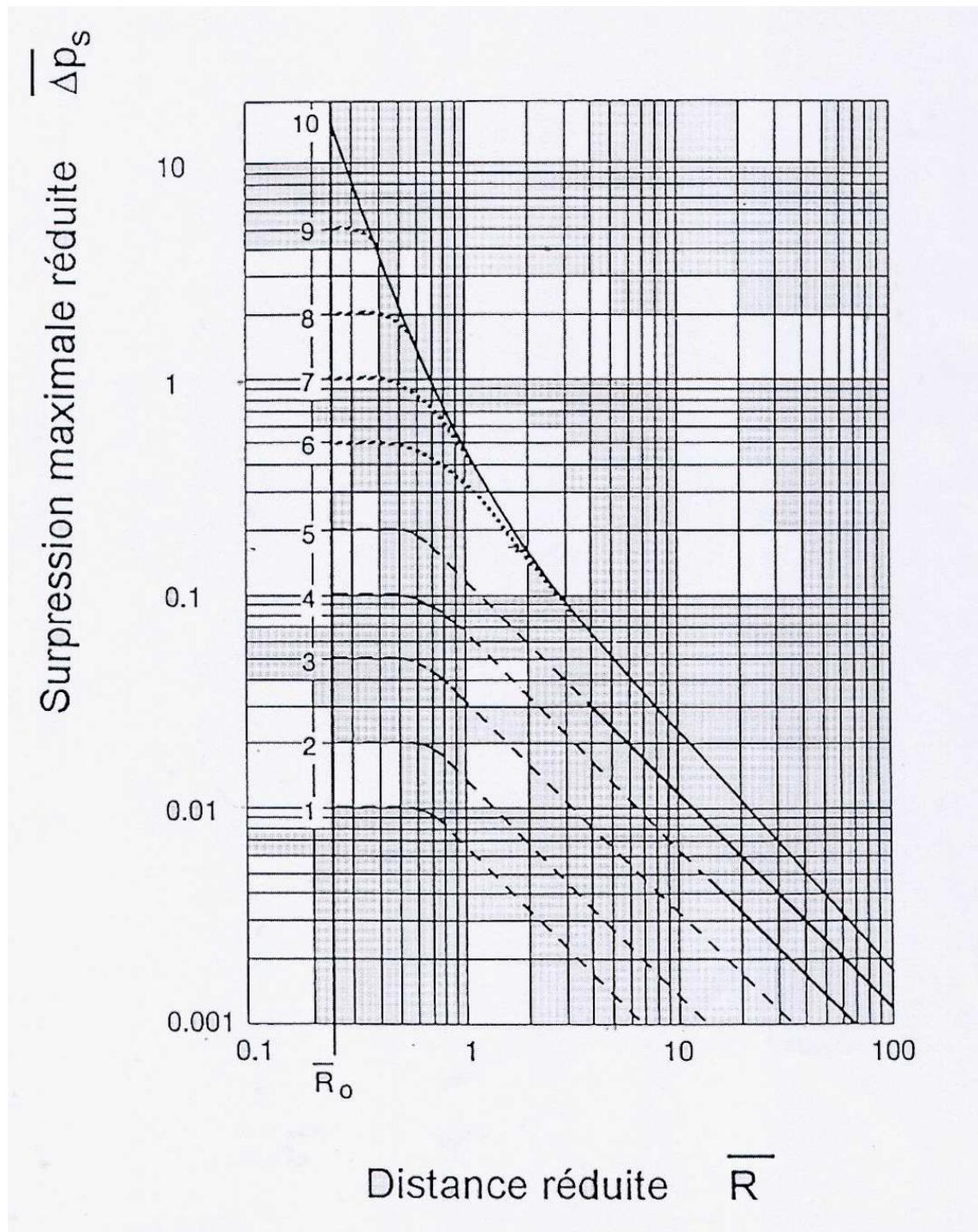
3. Détermination de la distance réduite :

Utilisation des courbes Multi-énergie ci-dessous pour déterminer \overline{R}

4. Détermination du rayon du cercle de dommage : $X = \overline{R} \times R_c$

X étant la distance en m entre le centre du nuage et le seuil de surpression défini en mètre.

Figure 1 : Courbes Multi-énergie donnant la surpression en fonction de la distance réduite



4.1.2 Choix du degré de sévérité

Le tableau ci-dessous rappelle la correspondance entre les surpressions maximales et les indices (compris entre 1 et 10).

Indice de la méthode (-)	Surpression maximale correspondante
	(mbar)
1	10
2	20
3	50
4	100
5	200
6	500
7	1 000
8	2 000
9	5 000
10	10 000

Le choix de l'indice est la phase la plus délicate de la méthode « Multi-Energie » puisqu'il n'existe pas aujourd'hui de méthode consensuelle. Les méthodes les plus couramment utilisées sont celles de KINSELLA (1993) et du TNO (1997).

4.1.2.1 Méthode de KINSELLA

Pour les explosions de gaz à l'air libre ou UVCE modélisées à travers un modèle multi-énergie, le choix du degré de sévérité peut se faire à travers la méthode de KINSELLA qui se présente sous la forme d'un tableau présenté ci-dessous. En fonction de 3 paramètres, le degré de sévérité peut être estimé :

- **Energie d'inflammation**
- **Degré d'encombrement**
- **Degré de confinement**

Figure 2 : Grille de Kinsella

Energie d'inflammation		Degré d'encombrement			Degré de confinement		Indice
Faible	Fort	Fort	Faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
	*	*			*		7 à 10
	*	*				*	7 à 10
*		*			*		5 à 7
	*		*		*		5 à 7
	*		*			*	4 à 6
	*			*	*		4 à 6
*		*				*	4 à 5
	*			*		*	4 à 5
*			*		*		3 à 5
*			*			*	2 à 3
*				*	*		1 à 2
*				*		*	1

4.1.2.2 Méthode TNO

4.1.2.2.1 Approche simplifiée selon le guide de l'INERIS:

Source : INERIS Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre - Rapport de juillet 1999

10 : zone correspondant à des zones encombrées d'obstacles.

3-4 : pour les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées et lorsque le nuage inflammable, susceptible d'envahir ces zones, est caractérisé par une agitation turbulente.

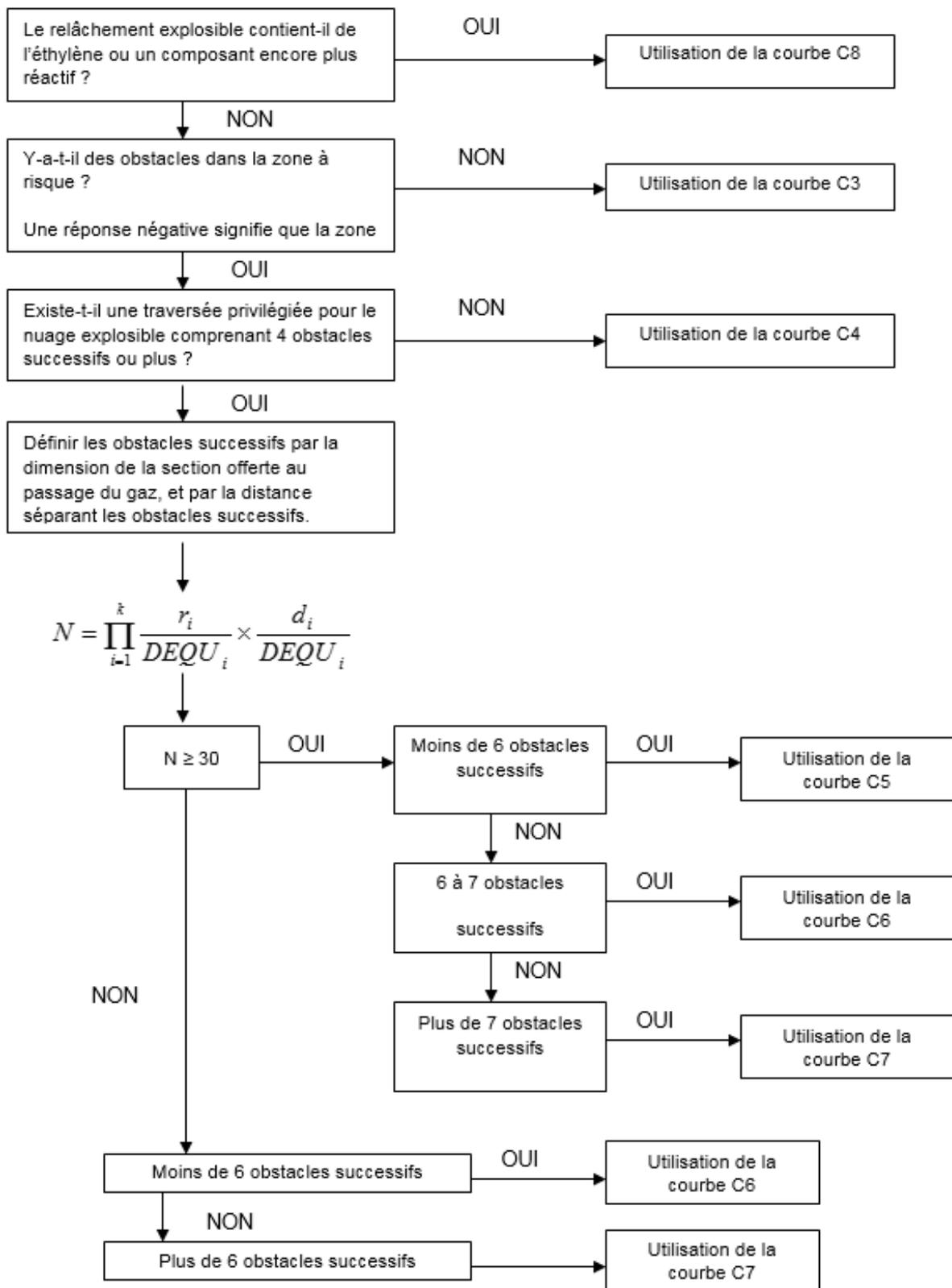
1 : pour les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées et lorsque le nuage inflammable, susceptible d'envahir ces zones, est considéré au repos thermodynamique.

4.1.2.2.2 Approche complète selon le guide de l'UFIP.

Cette approche est basée sur l'arbre de décision présenté ci-après.

Source : UFIP Guide méthodologique pour la réalisation des études de dangers en raffineries, stockages et dépôts de produits liquides et liquéfiés – Volume II Modèles normalisés de quantification – Mai 2001

Figure 3 : Arbre de décision : unité de process



4.2 Le modèle équivalent TNT

4.2.1 Principe général

Le principe du modèle équivalent TNT est de rapporter l'énergie de l'explosion à une masse équivalente de TNT, pour laquelle on peut faire un lien entre la surpression engendrée par l'explosion et la distance au centre de l'explosion.

Le modèle conduit, en trois étapes, à évaluer le niveau de pression atteint en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable.

1. Calcul de la masse d'équivalent TNT → m_{TNT}

$$m_{TNT} = E / E_{TNT}$$

Avec E_{TNT} l'énergie spécifique de combustion du TNT ($E_{TNT} = 4690$ kJ/kg)

2. Détermination de la distance réduite

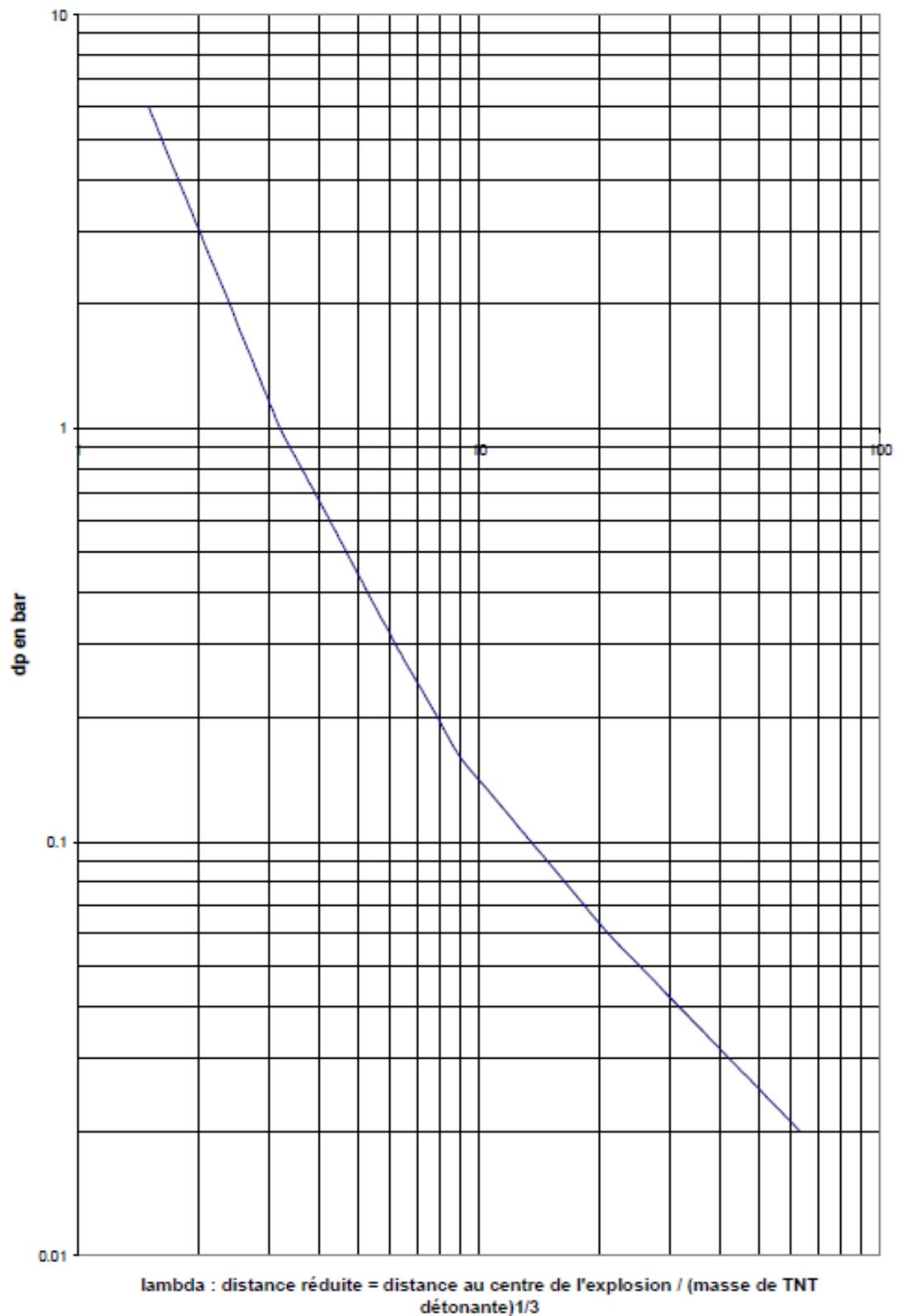
Utilisation des abaques TM5-1300 (voir ci-dessous) pour déterminer : \overline{R}

3. Détermination du rayon du cercle de dommage

$$X = \overline{R} \times m_{TNT}^{1/3}$$

X étant la distance en m entre le centre du contenant qui explose et le seuil de surpression défini en mètre.

Figure 4 : Abaque TM5-1300 donnant la surpression en fonction de la distance réduite



4.2.2 Modèle TNT révisé du GTDLI pour les bacs atmosphériques

Source: INERIS Modélisation des effets de surpression dus à une explosion de bac atmosphérique - Mai 2006

Le modèle TNT a été révisé en mai 2006 par le GTDLI, Groupe de Travail sur les Dépôts de Liquides Inflammables, pour les surpressions dues à une explosion de bac atmosphérique.

Cette méthode s'applique exclusivement à toutes les capacités atmosphériques :

- **stockant des liquides inflammables de catégorie B et C,**
- **cylindriques et verticales,**
- **à toit fixe.**

La nouvelle équation, présentée ci-dessous, tient compte de nouveaux paramètres tels que la pression d'éclatement du réservoir, la hauteur du réservoir...

$$d_i = \lambda_i \times 4,74 \cdot 10^{-3} \times [\text{PATM} \cdot \text{DEQU}^2 \cdot \text{HEQU}]$$

DEQU = Diamètre du bac (m)

HEQU = Hauteur du bac (m)

PATM = Pression atmosphérique (Pa)

λ_i = distance réduite fonction du seuil de surpression recherchée et obtenue par lecture des abaques TM5-1300 (voir la figure 3)

4.3 La méthode de Strehlow-Baker

Source : INERIS Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre - Rapport de juillet 1999

La méthode de Strehlow-Baker est uniquement applicable aux explosions thermiques.

Selon Baker, une estimation de la vitesse de propagation des flammes peut être obtenue en considérant :

- la réactivité du combustible mis en jeu
- la densité d'obstacles
- le degré de confinement

Réactivité du combustible	Types de combustibles
forte	Hydrogène, acétylène, les oxydes d'éthylène ou de propylène
Moyenne	les autres gaz combustibles
faible	méthane et monoxyde de carbone

Par ailleurs, en cas de mélange de combustibles, il est proposé de retenir la classe de réactivité du combustible le plus réactif dès lors que ce dernier représente au moins 2 % du mélange. (Cette dernière recommandation est considérée comme trop « sévère » par l'INERIS).

La densité d'obstacles est ensuite définie à partir des variables :

- *BR* pour « Blockage Ratio », qui représente l'aire occupée par les solides sur l'aire totale offerte aux gaz dans les différentes directions de propagation des flammes,
- *P* pour « pitch » qui correspond à la distance entre 2 rangées successives d'obstacles.

Densité d'obstacles	Types d'obstacles
forte	$BR \geq 40\%$ et il existe au moins 3 rangées d'obstacles
moyenne	Tous les autres cas
faible	$BR \leq 10\%$ et le lieu d'explosion ne comporte qu'une à deux rangées d'obstacles

Le degré de confinement peut-être :

- Axial (1D) lorsque l'explosion se déroule dans un volume caractérisé par un ratio longueur sur diamètre important,
- Radial (2D) lorsque le front de flamme se propage entre deux plans formés par exemple par le sol et un plafond,
- Sphérique (3D) peut être observé dès lors qu'aucune paroi n'est en mesure de canaliser la propagation des flammes.

Puis, pour un cas donné, lorsque les classes de réactivité, de densité d'obstacles et le degré de confinement sont déterminés, la vitesse de flamme ou la surpression maximale sont obtenues en se référant au tableau reporté ci-après.

Degrés de confinement 1D, soit un mode de propagation axial des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach ²⁹)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	5,2	>1000	5,2	>1000	5,2	>1000
	moyenne	2,265	800	1,765	400	1,029	200
	faible	2,265	800	1,029	200	0,294	40
Degrés de confinement 2D, soit un mode de propagation radial des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	1,765	400	1,029	200	0,588	100
	moyenne	1,235	300	0,662	120	0,118	7
	faible	0,662	120	0,471	70	0,079	4
Degrés de confinement 3D, soit un mode de propagation sphérique des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	0,588	100	0,153	15	0,071	4
	moyenne	0,206	20	0,1	7	0,037	1
	faible	0,147	15	0,1	7	0,037	1

Tableau 5 : correspondance entre les conditions d'explosion et les vitesses de flamme (exprimées en Nombre de Mach) ou surpressions aériennes

$$\text{Mach} = V_f / C$$

V_f : vitesse de flamme

C : célérité de la lumière

Cette méthode permet de dégager des « indications » quant aux surpressions maximum possibles. Qualitativement, ces indications paraissent conformes à l'état des connaissances sur le déroulement des explosions. Quantitativement, les résultats obtenus doivent être utilisés, pour le moins, avec prudence.

5 LES EFFETS D'UNE EXPLOSION

5.1 Ordres de grandeur pour les structures

Nature de la paroi	Surpression de ruine (statique) Prupture
Tour de manutention en béton	100 à 300 mbar
Tour de manutention en bardage métallique ou en fibrociment	15 à 100 mbar
Tour de manutention en palplanches (tôles résistantes, type profils Omega)	300 à 1000 mbar
Cellules en béton : parois	150 à 1000 mbar
Cellules en béton : toits	100 à 400 mbar
Cellule métalliques : parois	300 à 1000 mbar
Cellules métalliques : toits	100 à 200 mbar
Galeries sur-cellules en béton	100 mbar
Briques	100 à 300 mbar
Tuiles	5 mbar
Verre simple/armé	3 à 25 mbar
Plaque polyester transparente (fixations crochets)	10 mbar
Polycarbonate avec des fixations crochets	10 mbar
Plaque amiante-ciment (fixations crochets)	10 à 100 mbar

Source : Guide silo INERIS Version 3 – 2008

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures	
Dégâts constatés	Surpression (mbar)
Bris de vitres :	
➤ Valeur type de bris de vitres	10
➤ Destruction des vitres ≥ 10 %, limite de petits dommages	20
➤ Destruction de 50 % des vitres	25
➤ Destruction de 75 % des vitres et occasionnelle des cadres de fenêtre	50
➤ Destruction totale des vitres, détérioration partielle des maisons	70
Dégâts légers aux structures	30
Détérioration et destruction des cadres de fenêtres selon leur nature	100

Source : Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées – MEDD- Octobre 2004

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures		
Type de dégâts constatés	Surpression (mbar)	% dommage estimés
Seuil des dégâts graves sur les structures		
Effondrement partiel des murs, des toits et tuiles des maisons	140	50%
Limite inférieure des dommages graves aux structures (la plupart des dégâts sont réparables et correspondent à des tuiles projetées, des vitres cassées, des panneaux tordus, fissures dans murs)		
Effondrement partiel de murs de 20 cm d'épaisseur (INRS)		
Vitres de voitures face à l'onde surpression explosées		
Légères fissures dans les murs en brique de 30 cm d'épaisseur		
Toiture en fibrociments détruite		
Charpente bois lamellé collé porteuse en partie détruite		
Déformation de réservoirs de stockage de 150 m3 (avec robe de 3mm d'épaisseur)		
cassures dans les murs légers (plâtre, fibrociment, bois, tôle)		
Revêtement de murs en PVC éclaté		
Joint entre tôles ondulées en acier ou aluminium arrachés		
Fissure dans la robe d'un réservoir métallique		
Seuil des effets dominos		
Rupture des structures métalliques et déplacement des fondations	200	100%
Fissure ou rupture des réservoirs de stockage		
Murs en parpaings ou béton non armé détruit		
Lézardes et cassures dans les murs béton ou parpaings non armés de 20 à 30 cm		
Destruction à 50 % des maisons en briques		
Destruction de 50% des maisons en briques (INRS)		
Maisons inhabitables, effondrement partiel ou totale de la toiture, démolition d'1 ou 2 murs extérieurs, dégâts importants aux murs porteurs intérieurs (INRS)		
Véhicules sur parking : vitres cassées et carrosserie sérieusement endommagée		
Toitures détruites		
Déformations légères des canalisations		
Légers dommages aux machines dans les bâtiments industriels, cadres en acier des bâtiments déformés et/ou arrachés de leurs fondations		
Seuil des dégâts très graves sur les structures		
Destruction des bâtiments légers en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage	300	100%
Destruction des poteaux		
Revêtement des bâtiments industriels légers soufflé		
Maisons d'habitation détruites		
Déplacement d'un rack de canalisations, rupture des canalisations		
Bardage acier des bâtiments arrachés, détruits		
Destruction des bâtiments industriels légers		

Source : Guide du MEDD pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs

5.2 Ordre de grandeur pour l'homme

Seuils d'effets de surpression pour l'homme		
<i>Types d'effets constatés</i>	<i>Surpression(mbar)</i>	<i>Référence</i>
Létaux (par effets directs : hémorragies pulmonaires)	1000	TNO, 1989
	700 (correspondant potentiellement à 99% de plétalité) 200 (correspondant potentiellement à 1% de létalité)	TM5-1300 US Department of the Army, 1990 Centre de recherché du service de santé des armies, 1982
Létaux (par effets indirects)	140	Baker, 1983 ; Lees, 1996 ; Guide MU 90
Irréversibles	50	Lees, 1996 ; Guide MU 90
	20 (effets indirects par bris de vitres)	
Détérioration des tympans	340	INERIS
	300 (correspondant potentiellement à 1% de plétalité)	TNO, 1989

Source : Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées – MEDD- Octobre 2004

5.3 Les seuils réglementaires – arrêté du 29/09/2005

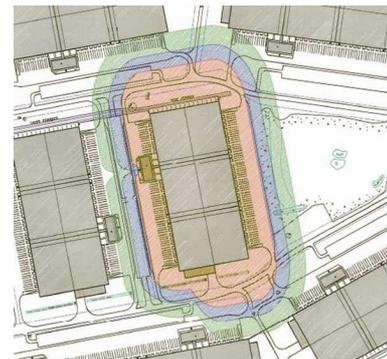
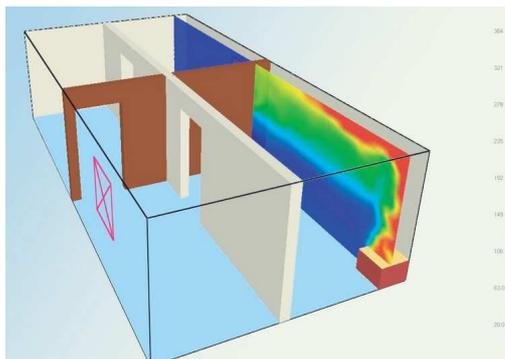
Les valeurs de référence pour les installations classées sont fixées par l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation

5.3.1 Effets sur l'homme

	Seuils des effets de surpression
Seuil des effets Indirects par bris de vitres	20 mbar
SEI <i>ou dangers significatifs</i>	50 mbar
SEL <i>Ou dangers graves, premiers effets létaux</i>	140 mbar
SELS <i>Ou dangers très graves, effets létaux significatifs</i>	200 mbar

5.3.2 Effets sur les structures

	Seuils des effets de surpression
Seuil des destructions de vitres significatives <i>(plus de 10% des vitres)</i>	20 mbar
Seuil des dégâts légers	50 mbar
Seuil des dégâts graves	140 mbar
Seuil des effets dominos	200 mbar
Seuil des dégâts très graves	300 mbar



Généralités sur la modélisation des flux thermiques liés à un incendie

Code MARTIN, développé par SAFEUGE, pour les feux d'entrepôts

Code GTDLI, développé par l'INERIS, pour les feux d'hydrocarbures

SOMMAIRE

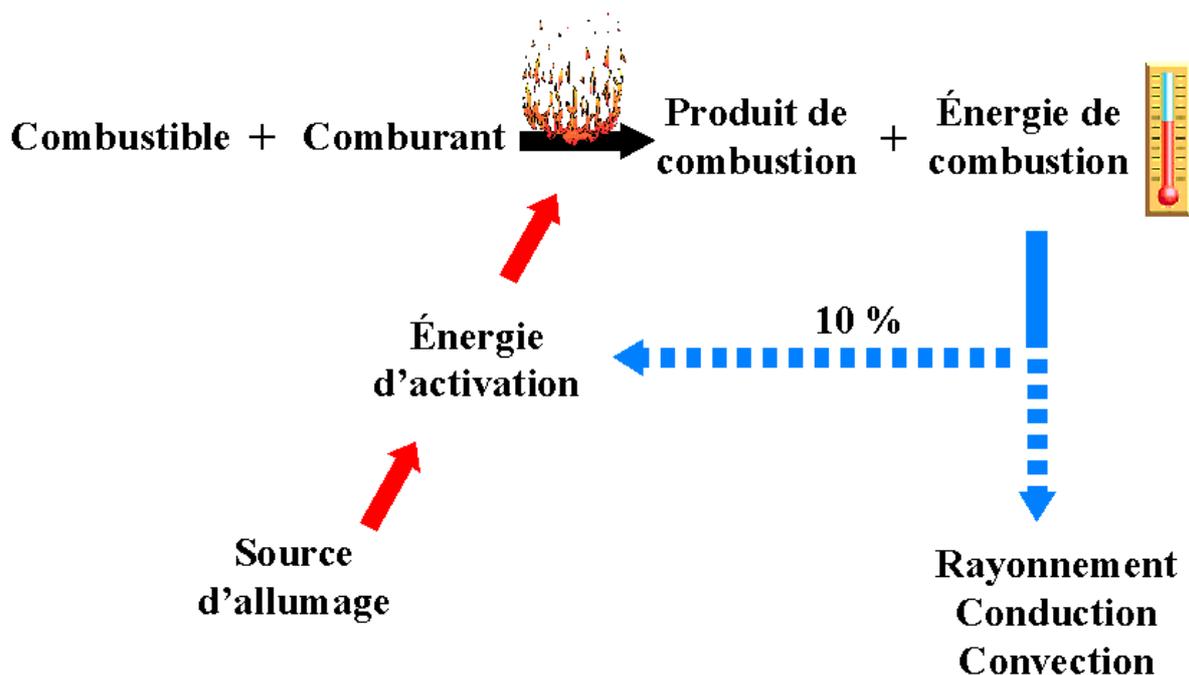
1	Qu'est-ce qu'un incendie ?	3
2	Modélisation du flux thermique rayonné.....	4
2.1	Principe de modélisation	4
2.2	Equation générale	5
3	Paramètres déterminants.....	6
3.1	Angle de vue.....	6
3.2	Hauteur de flamme d'incendie	8
3.3	Transmittance de l'air.....	9
3.4	Flux émis par la flamme	10
3.5	Cas particulier d'un feu d'hydrocarbures ou d'éthanol – méthode développée par le GTDLI	10
4	Influence des écrans	13
4.1	Flux thermique sans écran	13
4.2	Flux thermique avec un écran en façade	14
4.3	Flux thermique avec écran déporté	14
4.4	Comparaison.....	15
5	Effets du rayonnement thermique	16
5.1	Effets sur l'homme	17
5.2	Effets sur les structures.....	17

1

Qu'est-ce qu'un incendie ?

L'incendie est une combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace. La combustion est la réaction chimique que l'on obtient lorsqu'on met en présence sous certaines conditions, un comburant (en général l'air), une source de chaleur et un corps combustible.

La combustion est une réaction d'oxydation particulièrement exothermique. 10 % de l'énergie libérée par la combustion va permettre d'alimenter la réaction. Le reste est libéré sous forme de rayonnement (transfert électromagnétique dans l'infrarouge), de conduction (transport de chaleur dans la masse) et de convection (mouvement des gaz chauds).



La sensation de chaleur que perçoit un observateur lorsqu'il se place en face d'un feu est due au rayonnement émis par les flammes. Le phénomène de conduction ne pourra être ressenti qu'en touchant un matériau au contact direct des flammes. Le phénomène de convection ne pourra être ressenti qu'en se plaçant dans les fumées.

Ainsi dans le cas du dimensionnement des effets thermiques d'un incendie industriel sur l'environnement, c'est bien le rayonnement thermique émis par les flammes qui est intéressant.

Modélisation du flux thermique rayonné

2.1 Principe de modélisation

Le calcul du flux thermique émis lors d'un incendie se doit d'être majorant. Il est donc réalisé sur la base de l'étude du « scénario maximal physiquement possible ».

Par exemple :

- **dans le cas des entrepôts**, ce scénario correspond à un incendie maximaliste entraînant la destruction quasi totale de la toiture et de la structure du bâtiment si cette dernière n'a pas une tenue au feu suffisante. Lorsque l'entrepôt est compartimenté, l'incendie d'une seule cellule est généralement pris en compte. On considère que les murs coupe-feu qui séparent les cellules de stockage assurent une protection passive suffisante pour limiter l'incendie à la condition de garantir que les éventuelles portes coupe-feu entre les cellules se fermeront correctement.

- **dans le cas d'un feu de nappe d'hydrocarbure**, ce scénario correspond à un incendie maximaliste d'une nappe recouvrant la totalité de la rétention.

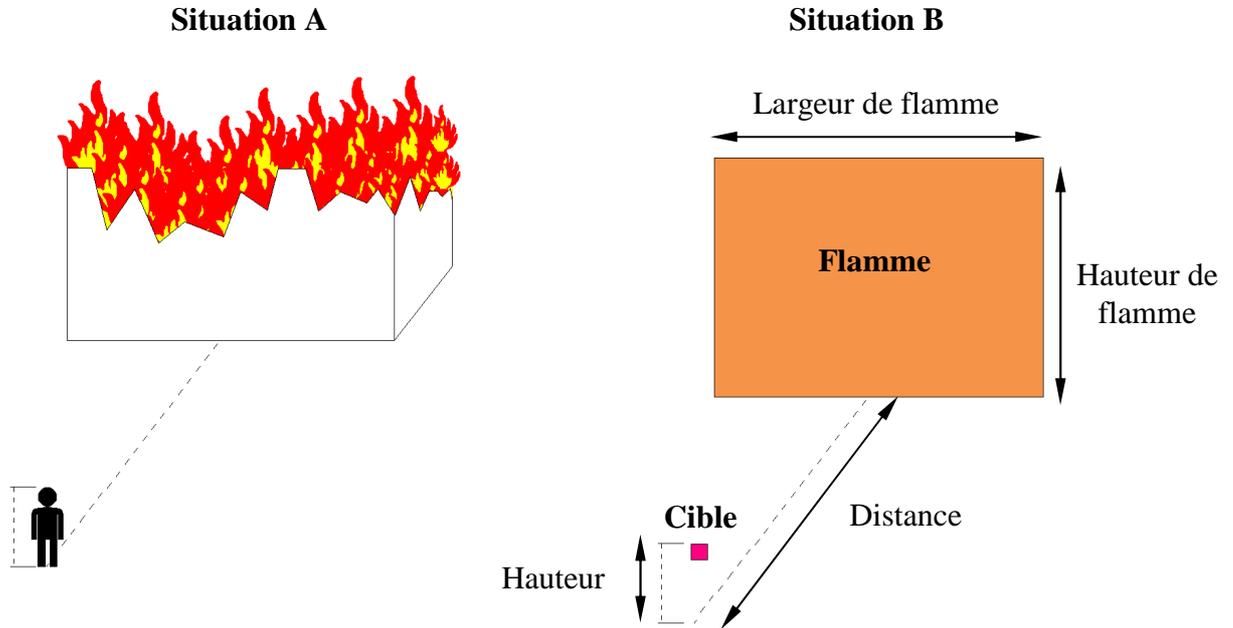
Dans le cadre d'une étude majorante, il est pris comme hypothèse que les protections actives sont considérées comme inopérantes (exemple : le système d'extinction automatique des fumées, les moyens d'arrosage).

Les flammes qui s'élèvent du bâtiment, du stockage, de la cellule ou de la rétention en feu, émettent alors un rayonnement thermique vers l'environnement extérieur. On les modélise par une surface qui a la largeur du bâtiment, du stockage, de la cellule ou de la rétention en feu et une hauteur moyenne calculée.

Le flux thermique est ensuite calculé pour une cible placée dans l'axe de cette surface rayonnante en fonction de sa distance et de sa hauteur.

La situation réelle est la situation **A**.

Afin de pouvoir la modéliser, nous sommes contraints de la simplifier et de se ramener à la situation **B**.



2.2 Equation générale

Le flux reçu par la cible est calculé de la façon suivante :

$$\Phi_{reçu} = F_{cible - flamme} \times \tau \times \Phi_{émis}$$

$F_{cible - flamme}$: angle de vue entre la cible et la flamme (sans unité)

τ : transmittance de l'air (sans unité)

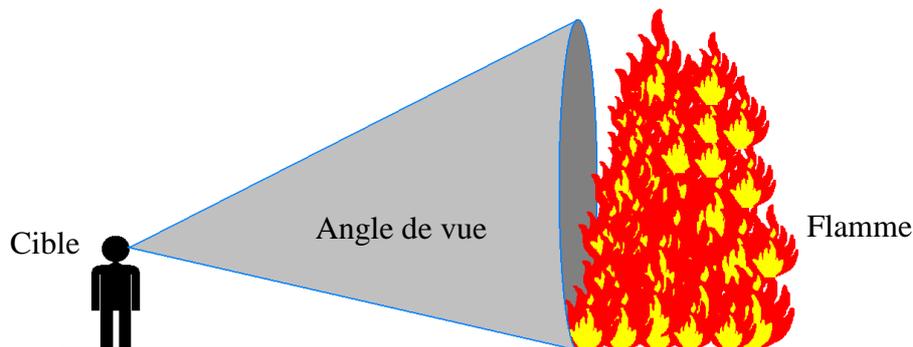
$\Phi_{émis}$: pouvoir émissif de la flamme par unité de surface de la flamme (kW/m²)

Paramètres déterminants

L'équation générale permettant de calculer le flux reçu par une cible est exprimée en fonction de l'angle de vue (lui-même fonction de la hauteur de flamme), de la transmittance de l'air et du flux émis par la flamme.

3.1 Angle de vue

L'angle de vue, appelé également facteur de forme, est l'angle solide sous lequel une cible voit une source rayonnante.

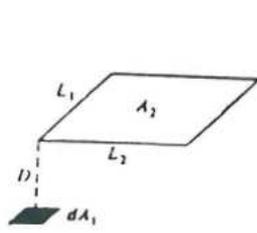


L'angle de vue sous lequel la cible voit la flamme est dépendant de :

- la hauteur de la flamme,
- la hauteur de la cible,
- l'angle entre la cible et la flamme,
- la distance entre la cible et la flamme.

La littérature nous fournit la formule analytique permettant de calculer l'angle de vue sous lequel une cible élémentaire voit un élément rectangulaire de surface finie lorsque les deux surfaces sont parallèles et que la cible est située en face du coin de l'élément rectangulaire.

Surface élémentaire parallèle à un élément rectangulaire de surface finie.



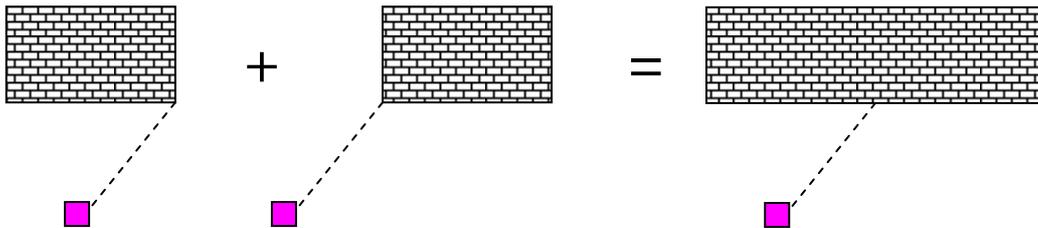
$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right)$$

où $X = \frac{L_1}{D}$ et $Y = \frac{L_2}{D}$

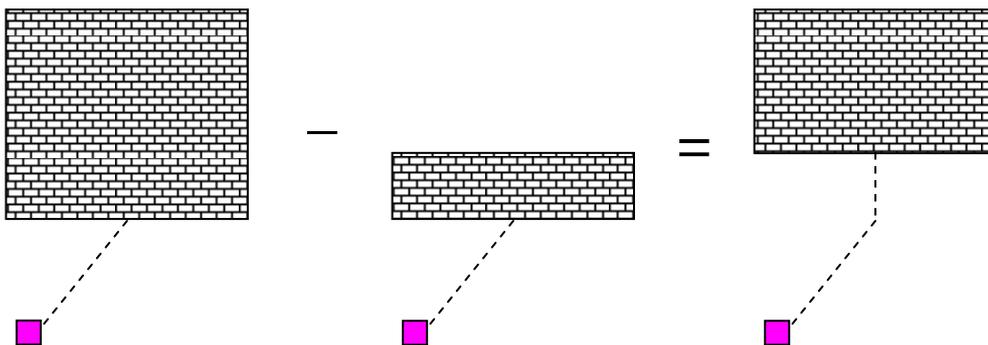
Il est donc possible de calculer l'angle de vue sous lequel une cible «■» voit un élément rectangulaire de surface finie lorsqu'elle se trouve en face du milieu de l'élément rectangulaire.

Les angles de vue étant des valeurs algébriques, il est possible de les sommer et les soustraire.

Ainsi :



De plus :



Les paramètres d'entrée sont les dimensions de la surface émissive (hauteur et largeur de flamme), la hauteur de la cible et sa distance par rapport à la flamme.

3.2 Hauteur de flamme d'incendie

La hauteur des flammes est calculée en règle générale par la corrélation de THOMAS.

$$H = 42 \times D \cdot \left(\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0,61}$$

H :	hauteur de la flamme	(m)
D :	diamètre hydraulique de la surface en feu	(m)
m'' :	taux de pyrolyse	(kg/m ² /s)
ρ _a :	masse volumique de l'air	(kg/m ³)
g :	accélération de la pesanteur	(9,81 m/s ²)

Ainsi la hauteur de flamme est dépendante :

- du diamètre hydraulique de la surface en feu et donc de ces dimensions,
- du taux de pyrolyse du combustible en feu lui même dépendant de la nature du combustible, de son état de division, de son mode de stockage et de son conditionnement.

La corrélation de Thomas est valable pour les feux à **moyenne échelle dont le rapport H/D est compris entre 3 et 10 et pour un diamètre équivalent Deq de la surface en flamme inférieur à 20 m**. Cette corrélation est souvent extrapolée faute de mieux mais n'est pas directement applicable pour les incendies industriels. Il a en effet été constaté que la hauteur des flammes d'un incendie industriel ne dépend pas uniquement du produit en feu et de la surface du foyer, mais aussi directement de la ventilation du foyer : alimentation en air frais et évacuation des fumées.

C'est la raison pour laquelle dans un souci de réalisme et pour que les calculs soient conformes aux constatations des pompiers lors des interventions sur des sinistres industriels, **la hauteur de flamme est très souvent limitée à 2,5 fois la hauteur de stockage ou la hauteur libre sous poutre (dans les cas des entrepôts)**.

Dans le cas des grands feux d'hydrocarbure, la corrélation d'HESKESTAD peut être utilisée :

$$H = \left(-1,02 + 15,6 N^{\frac{1}{5}} \right) \times D$$

H :	hauteur de la flamme	(m)
D :	diamètre hydraulique de la surface en feu	(m)
N :	défini selon la relation suivante	

$$N = \frac{C_{p0} T_0}{g \Delta H_c} \left(\frac{\eta_{comb} m'}{\rho_a} \right)^2 \frac{r_s^3}{D^5}$$

g :	accélération de la pesanteur	(9,81 m/s ²)
C _{p0} :	capacité calorifique de l'air	(J/kg.K)
T ₀ :	température de l'air	(K)
m' :	débit de combustible	(kg/m ²)
η _{comb} :	rendement de la combustion	(sans unité)
ΔH _c :	enthalpie de la réaction (PCI)	(MJ/kg)
r _s :	rapport stœchiométrique air/combustible défini selon la réaction suivante	

$$r_s = 137,87 \frac{x + y/4 + z/2}{12x + y + 16z}$$

x, y, z : nombre de carbone, d'hydrogène et d'oxygène dans la formule brut du combustible (C_xH_yO_z)

3.3 Transmittance de l'air

L'air absorbe une partie du flux émis par la flamme notamment à cause des particules d'eau qu'il contient. La corrélation de Brzustowski et Sommer permet de calculer la transmittance de l'air, c'est à dire la fraction de flux que l'air laisse passer.

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

x :	épaisseur de la couche d'air soit la distance cible-flamme	(m)
r :	humidité relative de l'air	(%)

3.4 Flux émis par la flamme

Le flux émis par une source rayonnante est appelé émittance. Les émittances sont issues de la littérature disponible et des différentes tierces expertises effectuées par l'INERIS ou le CNPP pour des installations similaires.

Il est généralement considéré que la flamme est homogène (modèle classique de la flamme solide). Or cette simplification est très clairement majorante.



En effet, lors des sinistres industriels, quel que soit le combustible, la flamme n'émet pas le même flux sur toute sa hauteur. En partie basse, la chaleur extrêmement intense est synonyme d'un rayonnement important. En partie haute, les fumées masquent les flammes et absorbent ainsi une grande partie du rayonnement.

La modélisation réalisée par SAFEGE prend toutefois en compte une émittance homogène afin de conserver une approche majorante des phénomènes.

Pour des incendies d'entrepôts de matières combustibles, le guide d'application de l'arrêté du 5 août 2002 indique qu'un ordre de grandeur usuel pour les flux surfaciques des flammes est de 25 kW/m² à 40 kW/m².¹

3.5 Cas particulier d'un feu d'hydrocarbures ou d'éthanol – méthode développée par le GTDLI

Conformément aux recommandations du Guide de maîtrise des risques technologiques dans les dépôts de liquides inflammables du GTDLI², celui-ci préconise, pour la modélisation des feux de nappe d'hydrocarbures, l'utilisation d'un modèle qu'il a élaboré et figurant dans la circulaire du 10 mai 2010. Ce modèle est applicable aux hydrocarbures liquides de catégories B et C, ainsi qu'aux feux d'éthanol.

Le modèle a donné lieu à une feuille de calcul développée par l'INERIS, basée sur les propositions de la note « Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbures liquides, GTDLI, Septembre 2006 »³. Pour évaluer les distances d'effets associées à un flux thermique les hypothèses suivantes ont été retenues :

¹Entrepôts de matières combustibles – Guide d'application de l'Arrêté du 5 août 2002 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts soumis à autorisation sous la rubrique 1510
MEDD – Août 2006

²Groupe de Travail Dépôts Liquide Inflammables – Guide de maîtrise des risques technologiques dans les dépôts de liquides inflammables – Septembre 2008

³Mémo technique du Groupe de Travail Dépôts Liquides Inflammables – Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbures liquides – Septembre 2006

- Données météo :
 - ✓ Humidité relative de l'air : 70 %
 - ✓ Température : 15° C
 - ✓ Vitesse de vent : 5 m/s
 - ✓ Masse volumique de l'air : 1,161 kg/m³

- Données Produits :
 - ✓ De manière conservatrice, les distances d'effets pour **tous les hydrocarbures liquides** (gazole, FOD,...) sont calculées en considérant la combustion d'essence dont le débit de combustion est pris égal à **0,055 kg/m².s**.
 - ✓ Pour les **feux d'éthanol**, la vitesse de combustion est prise égale à **0,025 kg/m².s**

- Diamètre équivalent :
 - ✓ Pour un feu de nappe circulaire :
Deq = Diamètre de la nappe en feu
 - ✓ Pour un feu de forme rectangulaire :
Deq = 4 S / P si la Longueur < 2,5 x largeur
Deq = largeur si la Longueur > 2,5 x largeur
 - ✓ Pour un feu de nappe de forme quelconque :
Deq = 4 S / P

avec :

S et P correspondant respectivement à la surface brute (surface avec bacs) et au périmètre de la cuvette en feu,
Longueur et largeur correspondant respectivement à la longueur et largeur de la surface en feu

- Hauteur de flamme :
 - ✓ **Formule de Thomas avec un vent de 5 m/s :**
$$L = 19,18 \times m^{0,74} Deq^{0,735}$$

- Angle d'inclinaison de la flamme
 - ✓ **Corrélation de Welker and Sliepcevich :**
$$\frac{\tan \xi}{\cos \xi} = 3,3 \times (Fr)^{0,8} \times (Re)^{0,07} \times \left(\frac{\rho_v}{\rho_{air}} \right)^{-0,6}$$

avec :

Fr: Nombre de Froude

$$Fr = \frac{u_w^2}{Deq \times g}$$

Re: Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{Deq \times u_w \times \rho_{air}}{\mu_{air}}$$

ρ_v : : Masse spécifique du produit en phase vapeur, à sa température d'ébullition (2,56 kg/m³ pour essence)

ρ_{air} : Masse volumique de l'air : 1,161 kg/m³

μ_{air} : viscosité dynamique de l'air ambiant (1,9 x 10⁻⁵ (kg.m⁻¹.s⁻¹))

- Pouvoir émissif :

- ✓ **Corrélation de Mudan and Croce :**

$$\Phi_o = 20000 + 120000 e^{-0,12Deq}$$

- Facteur de vue :

- ✓ Facteur de vue cylindrique avec vent pour les feux de nappe circulaire ou ayant une forme s'inscrivant dans un cercle : corrélation de Mudan
- ✓ Facteur de vue plan avec vent pour les autres feux de nappe : Outil développé par l'INERIS

- Coefficient d'atténuation atmosphérique :

- ✓ **Corrélation de Bagster :**

$$\Gamma(r) = 2,02 \times (HR \times TVAP(H_2O) \times r)^{-0,09}$$

Avec :

TVAP(H₂O)=1665 Pa à 15°C

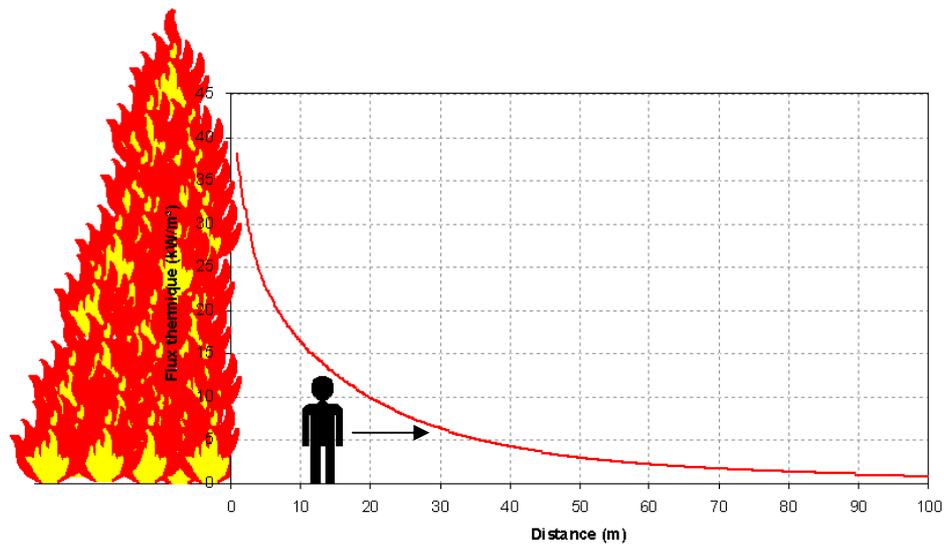
HR= 70 %

Influence des écrans

Les écrans thermiques sont tous les obstacles physiques susceptibles de réduire le flux reçu par une cible en effectuant un rempart entre la cible et la source. Ces écrans peuvent être des murs coupe-feu, mais également des écrans thermiques de façade, des merlons ou bien des murs périphériques en limite de propriété.

4.1 Flux thermique sans écran

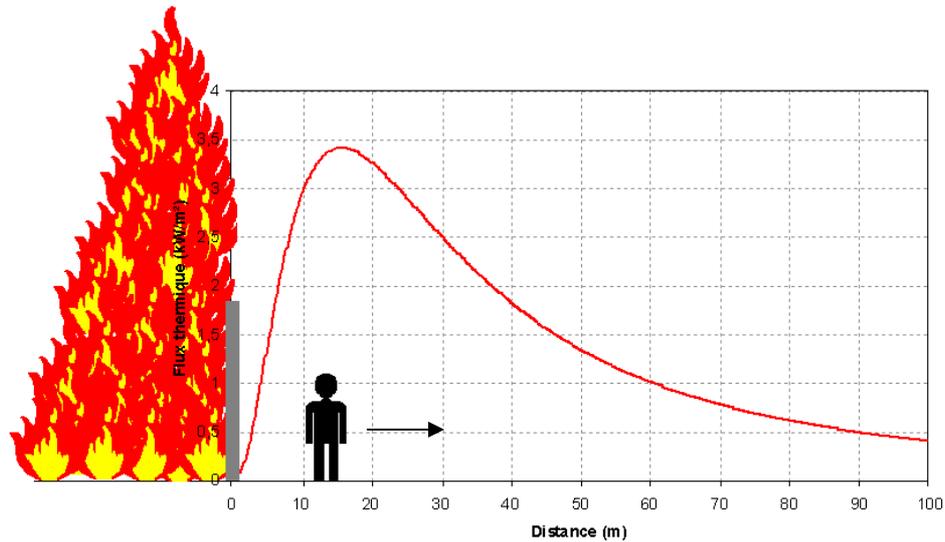
Le flux thermique reçu par une cible en fonction de sa distance par rapport au foyer à l'allure suivante.



Plus la cible s'éloigne du foyer, plus la transmittance de l'air diminue et plus le facteur de forme diminue. Ainsi plus la cible s'éloigne, plus le flux qu'elle reçoit diminue.

4.2 Flux thermique avec un écran en façade

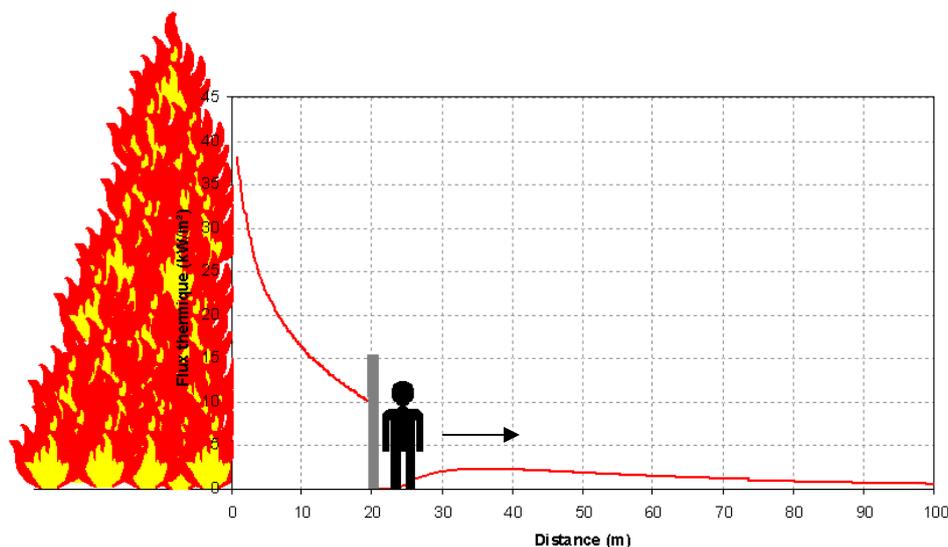
Le flux thermique reçu par une cible située derrière un écran en façade en fonction de sa distance par rapport au foyer à l'allure suivante.



Lorsque la cible est derrière l'écran, elle ne voit pas ou peu les flammes. L'angle de vue sous lequel elle voit le foyer est donc faible. En revanche il augmente sensiblement lorsque la cible s'éloigne du mur. Ainsi la cible reçoit un flux thermique de plus en plus intense. Si la cible continue de s'éloigner, l'influence de la distance devient prépondérante et le facteur de forme diminue à son tour. Le flux reçu diminue également.

4.3 Flux thermique avec écran déporté

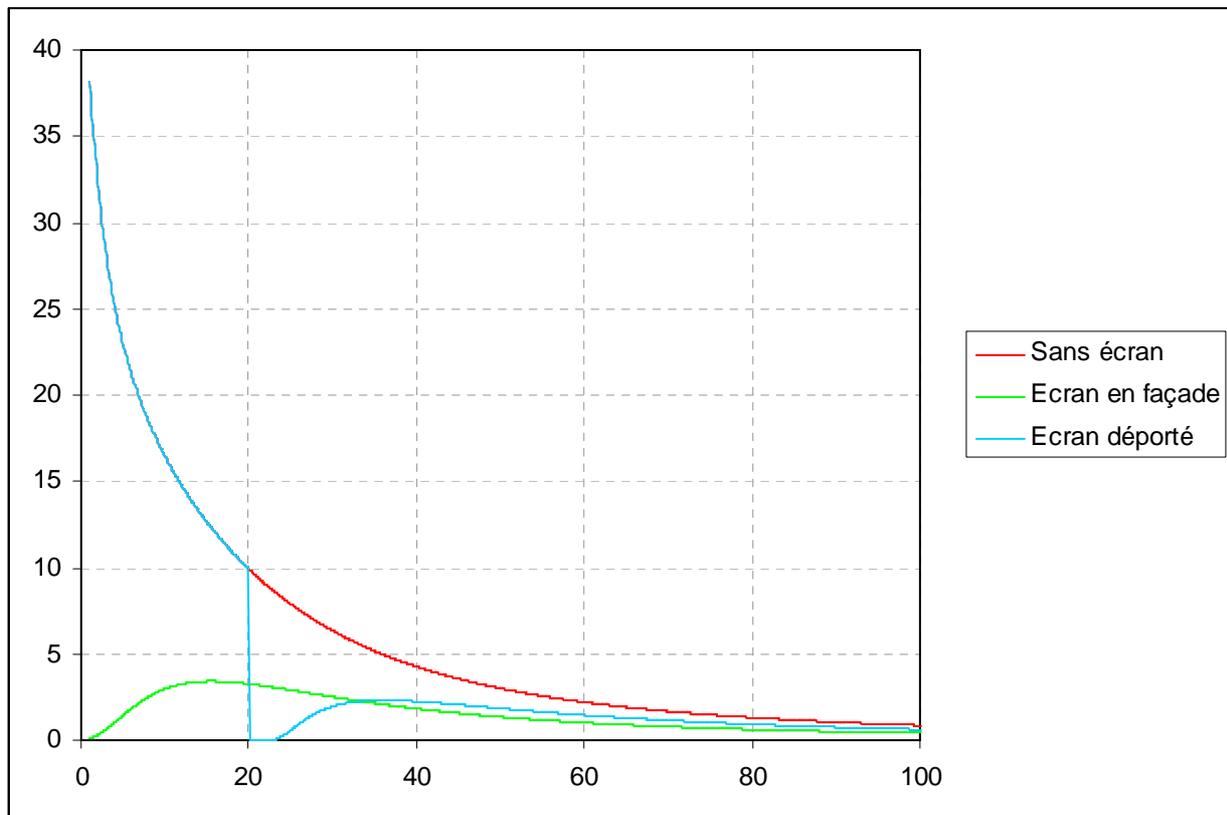
Le flux thermique reçu par une cible en fonction de sa distance par rapport au foyer à l'allure suivante lorsqu'un écran se trouve à 20 m du foyer.



Jusqu'à l'écran déporté le flux reçu est le même que lorsqu'il n'y a pas d'écran. Lorsque la cible passe derrière l'écran, elle ne voit plus ou peu le foyer. Le flux reçu devient donc très faible. Lorsque la cible s'écarte de l'écran, l'angle de vue sous lequel elle voit le foyer augmente à nouveau puis la distance devient prépondérante. Il se produit alors le même phénomène qu'avec l'écran en façade. Le flux thermique augmente puis diminue.

4.4 Comparaison

Si les trois situations sont placées sur un même graphe, l'influence de chaque solution est nette.



Ainsi, alors que l'écran en façade diminue le flux reçu en champ proche et en champ lointain, l'écran déporté n'agit qu'en champ lointain.

5 Effets du rayonnement thermique

Les effets du rayonnement dépendent de la valeur du flux reçu comme le montre le tableau suivant :

Effets du flux thermique	
Flux reçu (kW/m ²)	Effets
0,7	Coup de soleil pour une exposition de très longue durée sans protection ni préparation.
1	Rayonnement solaire en zone tropicale.
1,5	Seuil maximum en continu pour des personnes non protégées.
2	Douleur en 1 minute. Exposition de 40 à 140 secondes, avec un temps moyen de 100 secondes, rougissement de la peau.
2,5	Les personnes normalement habillées, sans fragilités particulières, peuvent s'exposer plusieurs minutes en bougeant.
3	Exposition de 1 minute, début d'apparition de cloques sur les peaux très sensibles. Seuil retenu pour les ERP (Etablissement Recevant du Public).
5	Cloques possibles pour des expositions de 20 à 90 secondes. Seuil retenu pour les habitations.
10	Douleur en 5 à 10 secondes. Brûlures du 2 ^{ème} degré en 40 secondes. Pour une exposition de 50 secondes, 1 % de décès.
15	Pyrolyse de certains matériaux et début d'émission de vapeurs inflammables qui peuvent s'enflammer selon les circonstances (contacts de flammèches, brandons enflammés).
20	Tenue du béton plusieurs heures. La température atteint 100°C à 3 cm dans le béton en 45 minutes. Inflammation possible de certains plastiques.
25	Inflammation possible de certains bois secs.
30	Conditions de l'essai réglementaire de réaction au feu, en présence d'une flamme pilote.
50	Brûlures immédiates et 1 % de décès après une exposition de 10 secondes.
100	La température atteint 100°C à 10 cm dans le béton en 3 heures.

Source : CNPP

Les valeurs de référence pour les installations classées sont les suivantes (arrêté ministériel du 29 septembre 2005) :

5.1 Effets sur l'homme

	Seuils des effets thermiques <i>(pour une exposition de plus d'1 à 2 minutes pour un terme source constant)</i>	Seuil des doses thermiques <i>(pour une exposition courte avec un terme source non constant)</i>
Seuil des effets par effets indirects	--	--
SEI <i>ou dangers significatifs</i>	3 kW/m ²	600 (kW/m ²) ^(4/3) .s
SEL <i>Ou dangers graves, premiers effets létaux</i>	5 kW/m ²	1000 (kW/m ²) ^(4/3) .s
SELS <i>Ou dangers très graves, effets létaux significatifs</i>	8 kW/m ²	1800 (kW/m ²) ^(4/3) .s

5.2 Effets sur les structures

	Seuils des effets thermiques
Seuil des destructions de vitres significatives	5 kW/m ²
Seuil des dégâts légers	--
Seuil des dégâts graves	8 kW/m ²
Seuil des effets dominos et correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures.	8 kW/m ²
Seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton.	16 kW/m ²
seuil de tenue du béton plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton.	20 kW/m ²
seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.	200 kW/m ²