

RAPPORT D'ÉTUDE

14 / 03 / 2014

Réf. : DRA-14-141478-03176A

**Formalisation du savoir et des
outils dans le domaine des risques
majeurs (DRA-76)**

Ω-2

**Modélisations de feux
industriels**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-76)

Ω -2

Modélisations de feux industriels

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Stéphanie JOLLY

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification		Approbation
NOM	S. JOLLY	F. PRATS	G. CHANTELAUVE	Stéphane DUPLANTIER
Qualité	Ingénieur de l'unité Incendie- Ventilation	Responsable du programme DRA-76 Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui Technique de la Direction des Risques Accidentels	Responsable du pôle PHDS Direction des Risques Accidentels
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	5
1.1 Les référentiels OMEGA	5
1.2 Domaine d'application	5
1.3 Organisation du document	5
2. DEFINITIONS PRINCIPALES	7
3. DESCRIPTION GENERALE DU PHENOMENE D'INCENDIE	11
3.1 Définition générale de la combustion	11
3.2 Différentes formes de combustion	13
3.3 Processus de combustion pour un feu industriel	13
3.3.1 Combustibles liquides	13
3.3.2 Combustibles solides	14
3.3.3 Principe de la combustion	15
3.3.3.1 Emission de vapeurs	15
3.3.3.2 Domaine d'inflammabilité	15
3.3.3.3 Energie d'inflammation	16
3.3.3.4 Conditions d'inflammation d'un combustible liquide ou solide	16
3.4 Flamme	17
4. TRANSFERT DE CHALEUR	19
4.1 Convection	20
4.2 Conduction	20
4.3 Rayonnement	20
5. MODELISATION DES EFFETS THERMIQUES RADIATIFS	23
5.1 Modèle du point source	23
5.2 Modèle de la flamme solide	25
5.2.1.1 Modèle de flamme solide à une zone	25
5.2.1.2 Modèle de flamme solide à plusieurs zones	26
5.2.2 Paramètres pour le modèle de la flamme solide	27
5.3 Calcul du flux rayonné reçu par la cible	28
5.3.1 Facteur de transmissivité atmosphérique	28

5.3.1.1	la corrélation de Brzustowski et Sommer	29
5.3.1.2	la corrélation de Lannoy :	29
5.3.1.3	La corrélation de Bagster	29
5.3.1.4	Corrélation de Wayne	30
5.3.2	Facteur de forme.....	31
5.3.2.1	Le calcul intégral du facteur de vue	31
5.3.2.2	Cas d'un cylindre droit	33
5.3.2.3	Cas d'un plan vertical	34
5.3.3	Application au cas d'une cible humaine	35
5.3.4	Rappel sur le rôle des écrans thermiques.....	39
6.	EFFETS ET SEUILS RETENUS.....	41
6.1	Préambule	41
6.2	Effets du rayonnement thermique.....	41
6.2.1	Notion de brûlures.....	41
6.2.2	Vulnérabilité	42
6.2.3	Effets et dose	42
7.	CONCLUSION	45
8.	REFERENCES.....	47

1. INTRODUCTION

1.1 LES REFERENTIELS OMEGA

Les référentiels OMEGA constituent un recueil global formalisant l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels. Ce recueil concerne les thèmes suivants :

- l'analyse des risques,
- les phénomènes physiques impliqués en situation accidentelle (incendie, explosion, BLEVE, , ...),
- la maîtrise des risques d'accidents majeurs,
- les aspects méthodologiques pour la réalisation de prestations réglementaires (étude de dangers, analyse critique, ...).

Ces rapports ont vocation à présenter les connaissances considérées comme consolidées au moment de leur rédaction. Ces rapports sont mis à disposition des acteurs de la maîtrise des risques d'accidents majeurs qui en feront bon usage sous leur responsabilité. Certains de ces rapports sont traduits en anglais en vue d'en favoriser leur diffusion. Les concepts exposés dans ces rapports n'ont pas vocation à se substituer aux dispositions réglementaires.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

La version précédente de l'Oméga 2 traitait des feux de nappe. Cette nouvelle version comporte une partie relative aux feux de nappe et une seconde partie relative aux feux d'entrepôts. Dans cette seconde partie, la nouvelle méthodologie mise en œuvre dans le cadre du projet partenarial FLUMILOG est plus particulièrement présentée. Auparavant, les feux d'entrepôts étaient traités avec le modèle des feux de nappe en adaptant certaines données d'entrée et hypothèses. Les distances d'effets étaient alors déterminées sans caractériser la cinétique de propagation dans le milieu confiné que représente l'entrepôt.

Ce rapport oméga traite plus particulièrement de la modélisation des effets radiatifs des feux industriels impliquant soit des combustibles solides, soit des combustibles liquides. L'impact possible des fumées d'incendie est traité dans le rapport Oméga 16.

1.3 ORGANISATION DU DOCUMENT

Le rapport Omega 2 comprend 3 éléments distincts :

- La partie commune, objet de ce présent rapport, qui présente les généralités relatives aux feux de solides et de liquides ;
- La partie A qui traite des feux de liquide ;
- La partie B qui traite des feux de solides et plus particulièrement des feux d'entrepôts. La méthode présentée est issue d'un travail de mise en

commun d'outils de modélisation utilisés par des organismes français dont l'INERIS et a été validée par la réalisation d'essais de grande échelle.

Ces deux dernières parties sont structurées de façon différente. En effet, les feux de nappe possèdent une bibliographie conséquente ainsi qu'une multitude d'outils de calcul qui sont évoqués dans la partie A. En revanche, pour la modélisation des feux d'entrepôts, la littérature étant plus restreinte et les outils de calcul se basant sur la théorie des feux de nappe, la partie B s'est attachée spécifiquement à décrire la méthode novatrice mise en œuvre dans le cadre du projet Flumilog.

2. DEFINITIONS PRINCIPALES

Ce chapitre propose quelques définitions relatives aux mécanismes et aux conséquences d'un feu de nappe ou de solides. Classées par ordre alphabétique, ces définitions, auxquelles le lecteur pourra se référer tout au long de la lecture du présent rapport, permettent d'appréhender les termes utilisés dans les chapitres à venir. Les définitions suivies d'un astérisque sont extraites de la norme NF EN ISO 13943 intitulé « Sécurité au feu – Vocabulaire ».

Allumage spontané, auto-inflammation*

Allumage résultant d'une élévation de température sans l'apport d'une source extérieure d'allumage.

Brûler*

Etre en état de combustion.

Chaleur de combustion* ou Potentiel calorifique

Energie thermique dégagée par la combustion d'une unité de masse d'une substance donnée. Elle est exprimée en joules par kilogrammes (J/kg)

Chaleur spécifique

La chaleur spécifique, ou bien chaleur massique d'échauffement, d'un corps correspond à la quantité d'énergie absorbée par 1 kg de ce corps pour que sa température s'élève de 1 K. Cette grandeur s'exprime ainsi généralement en J/(kg.K)

Combustible*

Susceptible de brûler. Objet pouvant brûler.

Combustion*

Réaction exothermique d'une substance avec un comburant. La combustion émet généralement des effluents accompagnés de flammes et/ou d'incandescence.

Conduction

Mode de transmission de la chaleur à travers un corps solide en contact avec une source chaude. Le transport de chaleur s'effectue de proche en proche sans aucun transfert de matière.

Convection

La convection est le mode de transport de chaleur par le mouvement d'un fluide. Dans le cas de feux de nappe, la chaleur est transportée par le mouvement de l'air autour de la flamme, dont l'écoulement est perturbé par la présence même de l'incendie.

Débit masse surfacique de combustion

Quantité de combustible participant à l'incendie par unité de temps et de surface au sol mesurée dans des conditions d'essai spécifiées. Le débit masse surfacique de combustion s'exprime généralement en g/(m².s).

Facteur de vue / de forme

Le facteur de vue ou de forme traduit l'angle solide sous lequel la cible perçoit la source de rayonnement.

Feu*

Combustion autoentretenue dont l'extension dans le temps et l'espace est contrôlée. Lorsque cette extension ne peut être contrôlée, il convient alors de parler d'incendie.

Flamme*

Zone de combustion en phase gazeuse généralement avec émission de lumière.

Flammes de diffusion / flammes de prémélange

Des flammes de diffusion sont créées lorsque la combustion a lieu sans mélange préalable de l'air comburant et du combustible gazeux. Dans le cas contraire, il convient de parler de flammes de prémélange.

Flux thermique radiatif

Quantité de chaleur transférée par rayonnement thermique, par unité de temps. Elle s'exprime en kW.

Incendie*

Combustion autoentretenue qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l'espace.

Incandescence*

Emission de lumière produite par un corps chauffé intensément.

Inflammable*

Capable de brûler avec flamme, dans des conditions spécifiées.

Inflammation*

Première apparition de flammes. Action de provoquer une combustion avec flammes.

Point feu, point de flamme (ou température d'inflammation)*

Température minimale à laquelle un matériau soumis à une petite flamme normalisée présentée à sa surface dans des conditions spécifiées, prend feu et continue à brûler pendant un temps spécifié.

Point d'éclair*

Température minimale à laquelle doit être porté un matériau, un produit pour que les vapeurs émises s'allument momentanément en présence d'une flamme, dans des conditions spécifiées.

Potentiel calorifique inférieur (PCI)*

Chaleur de combustion d'une substance lorsque la combustion est complète et que l'eau produite reste à l'état de vapeur dans des conditions spécifiées.

Potentiel calorifique supérieur* (PCS)

Chaleur de combustion d'une substance lorsque la combustion est complète et que l'eau produite est entièrement condensée, dans des conditions spécifiées.

Pouvoir émissif (surfacique)

Puissance thermique rayonnée par la flamme par unité de surface. Elle est exprimée en kilowatts par m² (kW/m²).

Pyrolyse*

Partie de la décomposition chimique irréversible provoquée uniquement par une élévation de température. La pyrolyse peut être accompagnée par une décomposition due à d'autres actions telles qu'une attaque chimique.

Rayonnement thermique*

Transfert d'énergie par ondes électromagnétiques

Réaction au feu*

Comportement d'un matériau qui, par sa propre décomposition, alimente un feu auquel il est exposé, dans des conditions spécifiées.

Régime laminaire / turbulent

Le régime laminaire est un mode d'écoulement dans lequel les particules du fluide se déplacent parallèlement les unes aux autres. A l'inverse, le régime turbulent est un mode d'écoulement désordonné, caractérisé par la formation de tourbillons ou d'un mouvement d'agitation aléatoire dans le milieu. Le passage du régime laminaire au régime turbulent est traduit par la valeur d'une grandeur physique, le nombre de Reynolds.

Résistance au feu*

Aptitude d'un objet à conserver, pendant une durée déterminée, la stabilité au feu, l'étanchéité au feu, l'isolation thermique requise et/ou toute autre fonction exigée, spécifiées dans un essai normalisé de résistance au feu.

Suie*

Particules produites et déposées au cours de la combustion ou après. La suie est constituée généralement de particules carbonées finement divisées, produites et déposées au cours de la combustion incomplète de matériaux organiques.

Rendement de combustion

Rapport entre la quantité d'énergie effectivement libérée par la combustion et l'énergie théorique disponible, correspondant à une combustion complète.

Température d'auto-inflammation ou d'allumage spontané*

Température minimale à laquelle l'allumage est obtenu dans des conditions d'essai spécifiées, sans source d'allumage piloté.

Tension de vapeur

Pression développée par les vapeurs d'un produit en espace clos ; elle correspond à l'aptitude d'un liquide à émettre des vapeurs.

Vitesse massique de combustion*

Masse du matériau brûlé perdue par unité de temps, dans des conditions spécifiées. Elle est exprimée en kilogrammes par seconde (kg/s).

3. DESCRIPTION GENERALE DU PHENOMENE D'INCENDIE

Ce chapitre est consacré à la description du phénomène d'incendie de façon générale. Les 4 points suivants seront successivement abordés :

- définition de la combustion,
- les différentes formes de combustion,
- le processus de la combustion,
- les flammes.

3.1 DEFINITION GENERALE DE LA COMBUSTION

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

- le comburant (souvent l'oxygène de l'air dans un incendie) joue le rôle d'oxydant,
- le combustible joue le rôle de réducteur.

Elle est notamment entretenue par la formation de radicaux libres, atomes ou groupes d'atomes électriquement neutres très instables donc très réactifs. Ces derniers participent fortement au développement des réactions de combustion et à la propagation des flammes.

D'une manière générale, le phénomène de combustion d'un produit intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé. Pour qu'un produit brûle, il faut donc qu'il émette des vapeurs inflammables.

La combustion a ainsi lieu en phase gazeuse dans la zone qualifiée de « flamme ». Une partie de l'énergie libérée par l'exothermicité de la réaction de combustion est cédée (rétrocession d'énergie) au combustible, entretenant ainsi l'émission de gaz inflammables. Un incendie est donc un phénomène de combustion auto-entretenu qui ne peut être arrêté que par la disparition du combustible ou du comburant ou de l'apport d'énergie.

Ce mécanisme est représenté de manière très schématique sur la Figure 1 ci après.

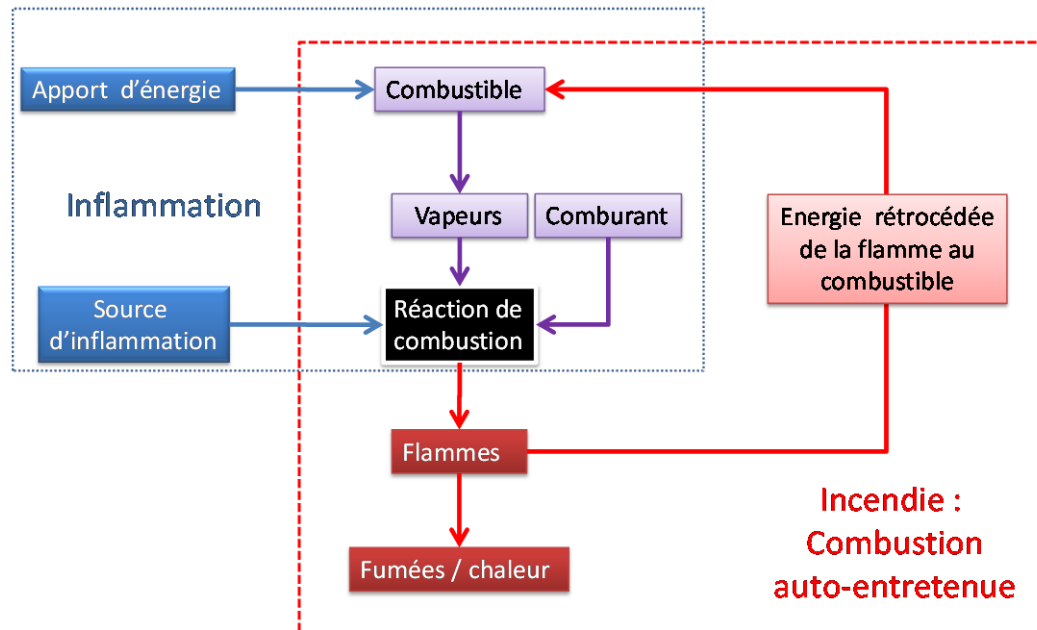


Figure 1 : Schéma du mécanisme de combustion auto-entretenue

Un feu se caractérise le plus souvent par l'émission de lumière, de chaleur et de fumées.

Ce type de sinistre peut représenter une agression pour l'homme, les équipements et l'environnement à plusieurs niveaux :

- **Flammes, chaleur** : les flammes, dont la température est variable selon la nature du combustible et les conditions de la combustion, ont été à l'origine de brûlures graves et de rayonnements destructeurs pour les structures ;
- **Fumées, gaz** : les principaux effets identifiés sont :
 - les brûlures par inhalation,
 - l'agression due à la toxicité des produits de combustion,
 - la gêne visuelle occasionnée,
 - en milieu confiné, une raréfaction de la concentration en oxygène, consommé au cours de la combustion, et une augmentation du monoxyde de carbone des gaz brûlés.

- **Pollution par les eaux d'extinction** : La perte de confinement sous l'effet de la chaleur affectant des réservoirs de substances polluantes ou l'épandage des eaux d'extinction chargées en produits toxiques pour l'environnement ont été à l'origine de pollutions au niveau local voire régional.

En effet, si ces volumes pollués ne peuvent être confinés sur le site au moyen de bassins de rétention par exemple, ils sont susceptibles de s'infiltrer dans le sol ou de s'écouler et se déverser finalement dans une rivière, un canal ou encore une station d'épuration à proximité du site.

3.2 DIFFERENTES FORMES DE COMBUSTION

Les différentes formes de combustion se caractérisent notamment par leur cinétique chimique :

- la combustion lente : elle se distingue par une absence de flamme et d'incandescence ainsi que par la faible exothermicité de la réaction. Cette combustion peut, sous couvert de modifications réactionnelles, se transformer en combustion vive et conduire à des feux de surface,
- combustion vive : cette forme de combustion caractérise les feux de surface. Les feux industriels sont en effet une combustion vive, généralement accompagnée de l'émission de lumière et de chaleur. La vitesse d'émission de calories est relativement élevée ce qui entraîne une forte exothermicité de la réaction. Les paragraphes à venir seront donc essentiellement consacrés à ce dernier mode de combustion,
- la combustion très vive et la combustion instantanée : ces types de combustions caractérisées par une vitesse de réaction très élevée ne relèvent pas a priori de l'étude des feux industriels et ne seront donc pas abordés dans le présent document.

3.3 PROCESSUS DE COMBUSTION POUR UN FEU INDUSTRIEL

Rappelons au préalable que pour les feux industriels, quel que soit l'état du combustible en présence, la combustion se fait à l'état gazeux. Dans le cadre de l'étude des feux industriels, la description du phénomène sera limitée aux seuls cas des combustibles solides et liquides.

3.3.1 COMBUSTIBLES LIQUIDES

La combustion des produits liquides (par ex. les hydrocarbures) intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé et non le liquide lui-même.

De manière schématique, le combustible émet une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. Cette **émission de vapeurs** conduit à la formation d'une zone riche en combustible au dessus de la nappe. Au fur et à mesure de son élévation, le combustible entraîne de l'air froid extérieur.

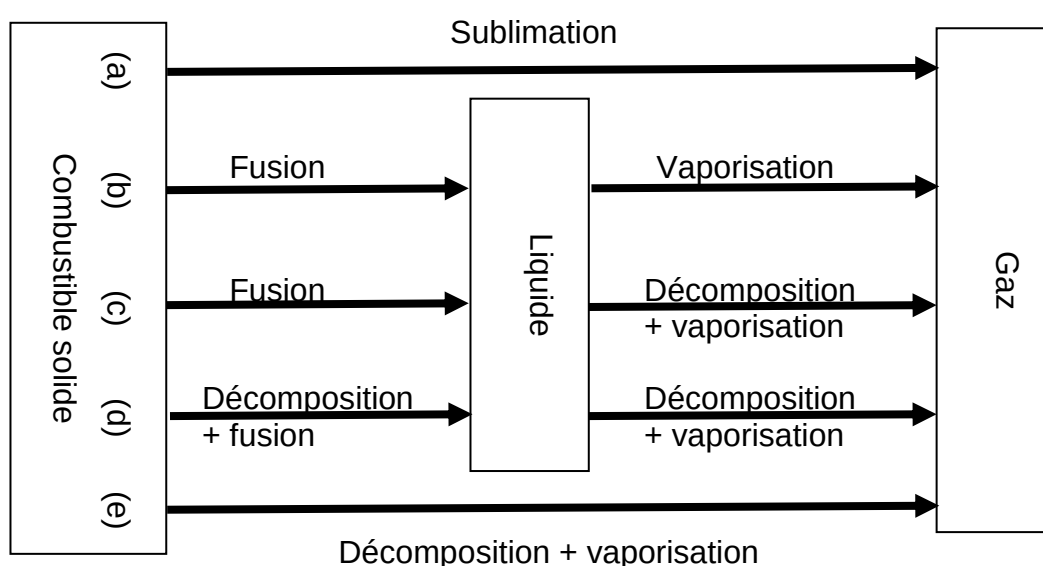
Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le **domaine d'inflammabilité** et en présence d'une **source d'inflammation**, il s'enflamme.

Les gaz brûlés sont ensuite évacués vers le haut sous l'effet de la poussée d'Archimède tout en continuant à entraîner l'air ambiant. L'essentiel de l'air entraîné (environ 90%) depuis la base de la flamme jusqu'à son sommet dilue les produits de la combustion tout en les refroidissant.

3.3.2 COMBUSTIBLES SOLIDES

Pour un combustible solide, le processus d'inflammation suit globalement le même schéma que celui présenté pour les combustibles liquides.

L'émission de vapeurs ou gaz inflammables reste toutefois plus complexe puisqu'elle met généralement en jeu des réactions de distillation, de pyrolyse, de fusion et éventuellement de sublimation comme le montre le schéma en Figure 2.



Exemple : (a) : allume feux ; (b) : cires, métaux ; (c) : résines thermo-plastiques ; (d) : polyuréthane ; (e) : cellulose, résines thermo-durcissables.

Figure 2 : Différents processus d'émission de vapeurs suivant le type de combustible solide (Drysdale, 1985).

Ces mécanismes ne seront pas détaillés dans ce document, on retiendra que les combustibles considérés généralement dans les études de sécurité brûlent en passant par la production intermédiaire d'une phase gazeuse. Le mécanisme de combustion de cette phase gazeuse est décrit dans les paragraphes suivants.

3.3.3 PRINCIPE DE LA COMBUSTION

3.3.3.1 EMISSION DE VAPEURS

La propension d'un liquide à émettre des vapeurs inflammables peut être reliée à la valeur du point d'éclair de la substance incriminée, dont une définition est donnée au chapitre 2 « Définitions principales ».

Ainsi, certains liquides émettent suffisamment de vapeurs (par évaporation ou ébullition) à la température ambiante (cas de l'essence), d'autres doivent être modérément réchauffés (gasoil, fuel domestique) ; enfin pour ce qui concerne les fuels plus lourds, l'élévation de température doit généralement être importante.

Il est également d'usage de parler de la volatilité des substances en vue de caractériser leur propriété à émettre des vapeurs à une température donnée.

Pour les solides, différents processus d'émission de vapeurs sont possibles suivant la nature du combustible (Figure 2). Cette production de vapeurs implique dans la plupart des cas une décomposition thermique, ou pyrolyse, du combustible sous l'effet de la chaleur (bois, polyuréthane). Celle-ci peut être précédée par une réaction de fusion, par exemple, pour certains polymères (PE, PVC). A noter que les solides à bas point de fusion ont un comportement similaire aux liquides.

De façon générale, la quantité de vapeurs émises par un combustible est notamment fonction de l'élévation de la température à laquelle il est soumis.

3.3.3.2 DOMAINE D'INFLAMMABILITE

L'inflammation du mélange gazeux composé des vapeurs de combustibles et de l'air est fonction de la concentration de vapeurs de combustibles dans l'air. Chaque produit possède ainsi un domaine d'inflammabilité spécifique, représenté de manière schématique dans la Figure 3 ci-après. Ce domaine est délimité par :

- la Limite Inférieure d'Inflammabilité (L I I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air.
En-dessous de cette limite, le mélange est trop pauvre en combustible (ou trop riche en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux,
- la Limite Supérieure d'Inflammabilité (L S I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air.
Au-dessus de cette limite, le mélange est trop riche en combustible (ou trop pauvre en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux.
- la courbe de condensation dans la partie gauche.
- la courbe d'auto-inflammation, qui correspond à une inflammation « spontanée » du mélange c'est-à-dire sans apport d'énergie extérieure.

Il convient de signaler que les valeurs des L I I et L S I sont déterminées pour chaque produit de manière expérimentale. A titre d'information, les limites d'inflammabilité d'un produit sont entre autres fonction de la température et de la pression.

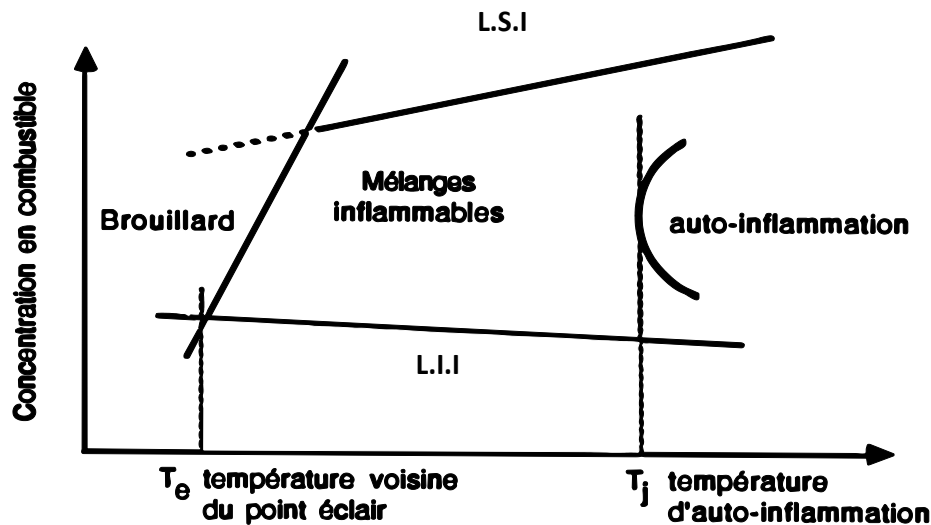


Figure 3 : Domaine d'inflammabilité (représentation schématique)(Zabetakis, 1965).

3.3.3.3 ENERGIE D'INFLAMMATION

Lorsque le mélange inflammable formé ne se trouve pas à sa température d'auto-inflammation, il est nécessaire de lui fournir une quantité d'énergie pour déclencher l'inflammation. Cette énergie, appelée énergie d'inflammation, peut être d'origine diverse (étincelles, flamme, foudre...) et varie selon les propriétés de la substance inflammable considérée.

L'énergie d'inflammation d'une substance dépend en outre de la concentration en gaz, vapeurs du mélange inflammable. Elle présente ainsi un minimum, l'énergie minimale d'inflammation, pour le mélange le plus susceptible de s'enflammer. L'énergie minimale d'inflammation correspond sensiblement à un mélange à la stœchiométrie.

A noter qu'en général, pour un solide, la quantité d'énergie nécessaire pour générer des vapeurs doit être supérieure à celle nécessaire à la vaporisation d'un liquide.

3.3.3.4 CONDITIONS D'INFLAMMATION D'UN COMBUSTIBLE LIQUIDE OU SOLIDE

En conclusion, pour qu'il y ait inflammation d'un combustible, il faut que les trois facteurs suivants soient réunis :

- Une température T supérieure au point d'éclair, afin de disposer d'une quantité suffisante de vapeurs inflammables, au-dessus du liquide ou T suffisante pour produire des gaz de pyrolyse ;

- Un mélange air-vapeurs dont la concentration se situe dans les limites d'inflammabilité ;
- Une énergie d'inflammation suffisante.

Ces trois conditions s'appliquent d'ailleurs aussi bien :

- aux gaz, distillats dégagés par les combustibles solides et provenant de réactions de distillation ou pyrolyse,
- aux vapeurs dégagées par les combustibles liquides et provenant du phénomène d'évaporation.

La combustion est ensuite auto-entretenue si l'énergie rayonnée par la flamme est suffisante pour produire suffisamment de gaz pour réalimenter la flamme.

3.4 FLAMME

La flamme est définie comme la zone où a lieu la combustion en phase gazeuse. La flamme peut ainsi être assimilée à une surface séparant gaz frais et produits de combustion gazeux (CO_2 , H_2O , ...) et suies résultant d'une combustion incomplète. Elle correspond sensiblement à la partie lumineuse de la zone de combustion.

De manière simple, une flamme est composée essentiellement de trois parties :

- En partie basse, une zone dite « persistante » de géométrie quasi constante dans le temps et l'espace. Cette zone se distingue par des températures particulièrement élevées et en conséquence, un pouvoir émissif important.
- Dans le reste de la partie lumineuse, une zone qualifiée « d'intermittente » pour laquelle la position et la géométrie de la flamme varient fortement au cours du temps. Les températures associées sont sensiblement inférieures aux températures de la zone persistante,
- En partie haute, la zone des fumées constituées des produits issus de la combustion.

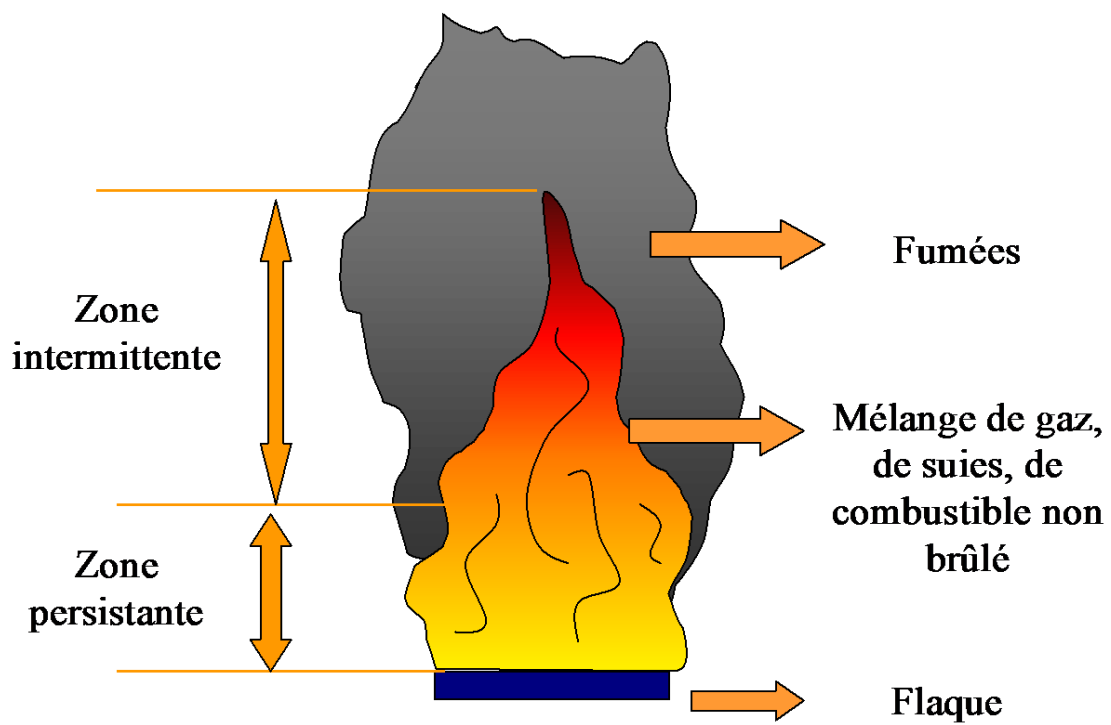


Figure 4 : Représentation schématique de la flamme

4. TRANSFERT DE CHALEUR

Lorsque les réactions de combustion sont déclenchées, d'importantes quantités de chaleur sont libérées. Ceci est traduit par la notion de *potentiel calorifique* associé à un combustible, pondérée par le *rendement de combustion* qui définit le rapport entre la quantité de chaleur disponible théoriquement dans l'incendie et celle effectivement libérée. La quantité d'énergie ainsi émise sous forme de chaleur est notamment transférée :

- Vers l'environnement extérieur de la flamme pouvant entraîner ainsi une propagation de l'incendie ;
- Vers le combustible, cette rétrocession d'énergie entretient l'émission de vapeurs inflammables.

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

- la convection,
- la conduction,
- le rayonnement.

Ces trois modes de transfert, ainsi que le transport de brandons incendiaires pour les feux de produits solides, participent à l'éventuelle propagation d'un incendie.

Ces différents mécanismes de transfert de la chaleur sont représentés de manière schématique dans la figure suivante.

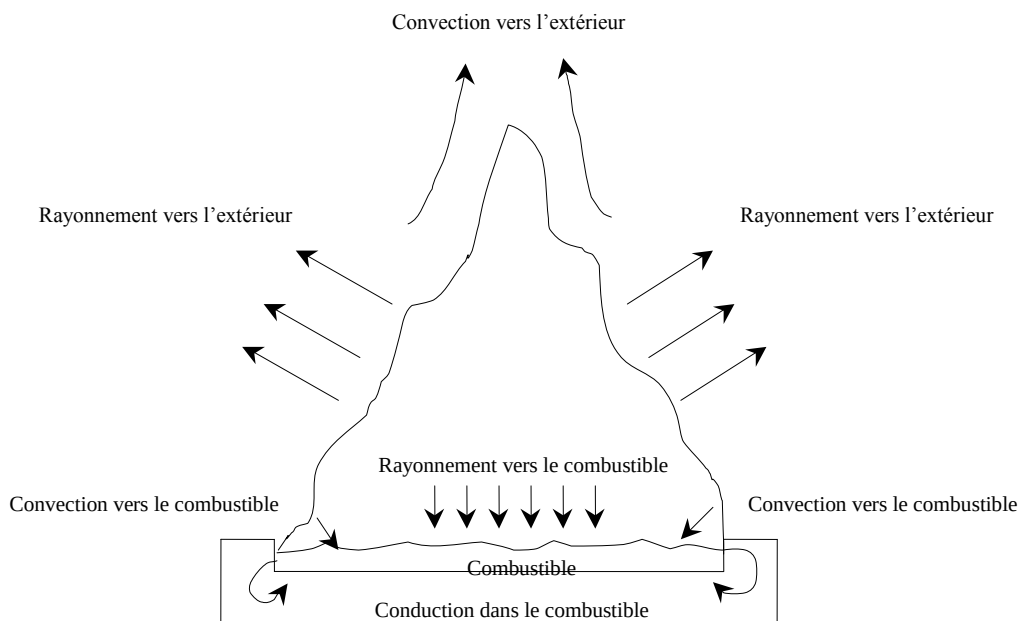


Figure 5 : Mécanismes de transfert de la chaleur dans la flamme (Alpert, Ward)

4.1 CONVECTION

La convection est le mode de transfert de la chaleur par le fluide présent dans l'environnement de la flamme (ex. air). Ce mécanisme, impliquant des mouvements de masses d'air chaud, est principalement à l'origine de la propagation verticale de l'incendie et de la formation du panache de fumées.

La convection peut être libre ou forcée selon ce qui gouverne le mouvement du fluide en question : différences de densité entre les gaz chauds et l'air froid, action mécanique extérieure telle ventilation, ou désenfumage mécanique.

4.2 CONDUCTION

La conduction est le mode de transfert de la chaleur à l'intérieur d'un corps conducteur en contact avec une source chaude, par transfert de calories (exemple, propagation d'un bâtiment à l'autre par échauffement des cloisons mitoyennes).

4.3 RAYONNEMENT

Le rayonnement thermique est le mode de transfert isotrope de la chaleur dégagée par les corps solides, liquides ou gazeux portés à haute température. Le transport de l'énergie thermique est assuré par ondes électromagnétiques. N'exigeant ainsi pas de support matériel, c'est un processus d'échange d'énergie quasi-immédiat entre deux corps distants et susceptibles de générer des effets à des distances importantes. C'est le principal vecteur pour atteindre des cibles humaines potentielles.

D'un point de vue physique, le rayonnement est le résultat d'une émission de vibrations électromagnétiques, dont les longueurs d'onde sont approximativement comprises entre 0,1 μm et 100 μm (domaine du visible et fractions de l'ultraviolet et de l'infrarouge).

Les principales grandeurs énergétiques relatives à une surface émettrice sont brièvement présentées ci-après. L'importance de ces notions de base pour la modélisation des effets thermiques liés à un feu industriel sera explicitée dans les autres parties de ce document.

En considérant une surface rayonnante, l'émittance énergétique, M , est définie comme la densité surfacique de flux énergétique émis par la surface.

$$M = \frac{d\phi_{\text{émis}}}{dS} \quad (1)$$

Dans le cas d'un corps noir, l'émittance est déterminée à l'aide de la loi de Stefan-Boltzman, comme variant proportionnellement à la puissance quatrième de sa température absolue, d'où :

$$M = \sigma T^4 \quad (2)$$

où σ = constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T = température absolue (K)

Un corps noir est défini comme un corps opaque théorique qui absorberait et émettrait, à une température donnée, toutes les radiations qu'il recevrait, quelles que soient leur longueur d'onde et leur direction ($\forall \lambda$ et $\forall D$, $a=1$).

Il convient de rappeler ici qu'une flamme peut être assimilée à une surface séparant gaz frais et produits de combustion (CO_2 , H_2O , ...), ainsi que suies portées à haute température. Chacun de ces composants contribue à l'émittance de la flamme et l'analogie avec un corps noir uniforme n'est donc pas immédiate.

L'émittance ou pouvoir émissif de la flamme, noté ϕ_0 , est alors déduit grâce à la formule suivante :

$$\phi_0 = \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (3)$$

Avec T_f : température de flamme (K)

T_a : température de l'ambiance (K)

ε : émissivité de la flamme

L'émissivité de la flamme est un nombre sans dimension, inférieur ou égal à 1, qui traduit l'aptitude de la flamme à se comporter comme un corps noir. Elle vaut ainsi 1 pour un corps noir. L'émissivité dépend principalement de la teneur en suies dans la flamme et de la composition en gaz susceptibles d'absorber les rayonnements extérieurs, essentiellement les molécules à moment dipolaire non nul comme le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau.

Pour les hydrocarbures générant beaucoup de suies, l'émissivité peut être considérée comme unitaire lorsque le diamètre du feu est supérieur à quelques mètres (LEES). La flamme se comporte alors comme un corps noir.

Par ailleurs, la plupart des auteurs (LEES) note que les fumées issues de la combustion, dont la production augmente avec le diamètre du feu, tendent à recouvrir plus ou moins totalement la surface de la flamme et jouer ainsi un rôle d'écran absorbant une partie du rayonnement émis par la flamme « nue ». Cet effet d'écran tend à diminuer le pouvoir émissif moyen de la flamme.

Il apparaît ainsi le paradoxe suivant :

- pour ce qui concerne les feux d'hydrocarbures générant des quantités importantes de suies, l'essentiel du rayonnement est lié à la contribution de suies portées à haute température par la flamme,
- dans le même temps, ces mêmes suies en se refroidissant dans le panache peuvent constituer un écran de fumées, faisant obstacle au rayonnement émis par la flamme.

5. MODELISATION DES EFFETS THERMIQUES RADIATIFS

L'objet de ce chapitre est de présenter des méthodes de calcul de mise en œuvre simple pour l'estimation des effets thermiques radiatifs associés à un feu de nappe. Bien entendu, il existe des modèles plus complexes que ceux présentés dans le présent document et qui permettent de décrire plus finement le comportement d'une flamme. Leur utilisation peut toutefois s'avérer coûteuse en temps et en moyens informatiques si bien que leur usage est souvent réservé à des cas particuliers.

Comme cela a été évoqué dans le chapitre précédent, le rayonnement est le mode de transfert privilégié de la chaleur dans un plan horizontal pour des feux de grande taille. Ainsi, il convient de s'intéresser en priorité à ce mode transfert de chaleur, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer des distances d'effets thermiques sur l'homme.

Dans cette optique, deux modèles simples peuvent être mis en œuvre :

- le modèle du point source,
- le modèle de la flamme solide.

Dans le premier modèle, le flux thermique transmis par radiation est supposé émis par une source ponctuelle. Dans le second modèle en revanche, la flamme est assimilée à un volume de géométrie simple (cylindre, cône ou parallélépipède rectangle) rayonnant de manière uniforme sur toute sa surface.

5.1 MODELE DU POINT SOURCE

Le modèle du point source est basé sur les hypothèses suivantes :

- La flamme est assimilée à une source ponctuelle ;
- Cette source ponctuelle est supposée rayonner avec une puissance équivalente à celle de la totalité de la flamme ;
- La densité de flux thermique radiatif reçue varie inversement au carré de la distance entre la source et la cible.

Il existe de nombreuses variantes de cette méthode, qui est d'usage relativement répandu. La formule donnée ci-dessous est issue de la méthode développée par Drysdale (1985).

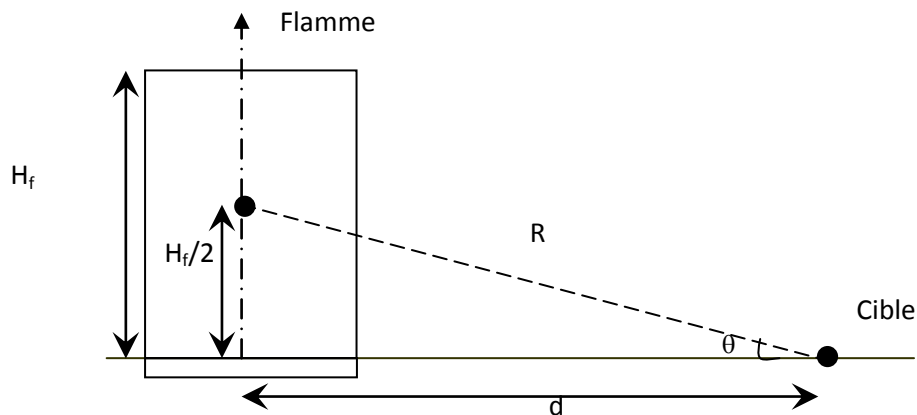
La densité de flux thermique radiatif, q_a , reçue par un récepteur situé à une distance R de la flamme (voir Figure 6) est donnée par la formule suivante :

$$q_a = \frac{Q_r \cos \theta}{4.\pi.R^2} \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (4)$$

avec Q_r : puissance totale rayonnée (kW),

R : distance cible/source ponctuelle en mètres

Q_a : densité de flux radiatif surfacique reçu par la cible (kW/m²)



$$H_f = H_{\text{flamme}}$$

Figure 6 : Configuration pour le modèle de la source ponctuelle

Cette formule pour le modèle du point source suppose bien entendu d'avoir estimé d'une part la puissance totale rayonnée par la flamme. De manière simplifiée, cette dernière, notée Q_r , peut être estimée comme une fraction de la puissance thermique totale générée par l'incendie, grâce à la formule suivante :

$$Q_r = \eta_r Q = \eta_r m'' \Delta H_c A \quad (5)$$

Avec Q_r : Puissance totale rayonnée par la flamme (kW/m²),
 η_r : fraction radiative de l'incendie (-),
 Q : Puissance totale dégagée par l'incendie (kW/m²),
 m'' : débit masse surfacique de combustion (kg/m²s),
 ΔH_c : Chaleur de combustion (kJ/kg),
 A : Surface de la nappe au sol pour un feu de liquide.

Les différents paramètres listés ci-dessus seront explicités dans les paragraphes suivants.

D'autre part, il convient de déterminer la position de la source ponctuelle et donc la hauteur de flamme.

Afin de s'affranchir de cette difficulté et dans une approche majorante, il est possible de supposer la cible et la source ponctuelle à la même altitude. La densité de flux reçu est alors donnée simplement par la formule suivante :

$$q_a = \frac{Q_r}{4.\pi.d^2} \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (6)$$

Le modèle de la source ponctuelle est un modèle relativement simple qui permet de donner rapidement des ordres de grandeur du flux reçu à une certaine distance. Toutefois, son utilisation doit être réservée aux cas de cibles situées à des distances importantes de la flamme, pour lesquelles l'hypothèse d'une flamme ponctuelle peut être jugée raisonnable. De manière tout à fait générale, il est possible de considérer que cette hypothèse s'avère valable pour une cible situé à une distance supérieure à 5 fois le diamètre de la nappe.

Du fait de cette limitation et de sa relative simplicité, le modèle de la source ponctuelle ne sera pas étudié plus avant dans le présent rapport.

5.2 MODELE DE LA FLAMME SOLIDE

Dans le modèle de la flamme solide, la flamme est assimilée à la surface extérieure d'un volume opaque de géométrie simple (cylindre, parallélépipède rectangle...). Ce modèle repose notamment sur les hypothèses suivantes :

1. La surface visible de la flamme émet des radiations thermiques vers la cible alors que la partie non visible n'en émet pas,
2. La flamme est assimilée à la surface extérieure d'un volume géométrique simple (cylindre, parallélépipède, cône..). La base de ce volume correspond alors à la base du feu et sa hauteur à la hauteur pour laquelle la flamme est visible 50 % du temps.

Bien entendu, les adaptations et les variantes de ce modèle de la flamme solide peuvent être multiples, par exemple :

- le modèle de flamme solide à une zone,
- le modèle de flamme solide à deux ou plusieurs zones.

5.2.1.1 MODELE DE FLAMME SOLIDE A UNE ZONE

Pour le modèle à une zone, la flamme est supposée rayonner de manière uniforme sur toute sa surface, ce qui revient à considérer une température de flamme et une composition homogènes sur toute la hauteur de celle-ci.

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

$$\phi = \phi_0 F \tau \alpha \quad (7)$$

avec Φ : densité de flux thermique radiatif reçue par un élément extérieur (kW/m²)

F : facteur de vue entre l'élément extérieur et la flamme (-)

τ : coefficient d'atténuation atmosphérique (-)

α : coefficient d'absorption de l'élément extérieur (-)

Φ_0 : pouvoir émissif de la flamme (kW/m²)

Dans une démarche majorante, il est possible de considérer le coefficient d'absorption de la cible comme unitaire. Dans la réalité, tout corps non noir recevant un rayonnement en réfléchit une partie.

Trois données importantes doivent ainsi être déterminées :

- la **géométrie de la flamme** qui intervient dans le calcul du facteur de vue. Ce facteur traduit en définitive l'angle solide sous lequel la cible perçoit la flamme.
- le **pouvoir émissif** de la flamme, soit la puissance rayonnée par unité de surface de flamme,
- le **coefficient d'atténuation atmosphérique**, c'est-à-dire la fraction du rayonnement absorbée par l'atmosphère

Pour peu que ces données puissent être déterminées convenablement, ce modèle permet en général d'estimer de manière relativement correcte l'impact radiatif d'un feu sur l'environnement.

5.2.1.2 MODELE DE FLAMME SOLIDE A PLUSIEURS ZONES

De manière générale, ces modèles consistent à considérer la flamme avec : $\phi_0 = f(T)$ où la température T dans le panache de flamme dépend de la hauteur et est généralement déterminée à l'aide des corrélations de Mc Caffrey (1983).

Le modèle le plus simple est le modèle de la flamme solide à deux zones qui reprend en partie les hypothèses présentées pour le modèle à une zone, la différence portant sur une discrétisation de la flamme en :

- une zone persistante en partie basse, de pouvoir émissif élevée,
- une zone intermittente, de pouvoir émissif généralement plus faible.

Ces deux zones permettent de prendre en compte les observations expérimentales d'une flamme qui mettent en évidence la présence d'une zone basse de géométrie quasi-constante dans le temps et l'espace et une zone dont la forme change continuellement.

Pour effectuer des calculs simples, il convient de supposer que chacune de ces zones émet de manière uniforme sur toute sa surface.

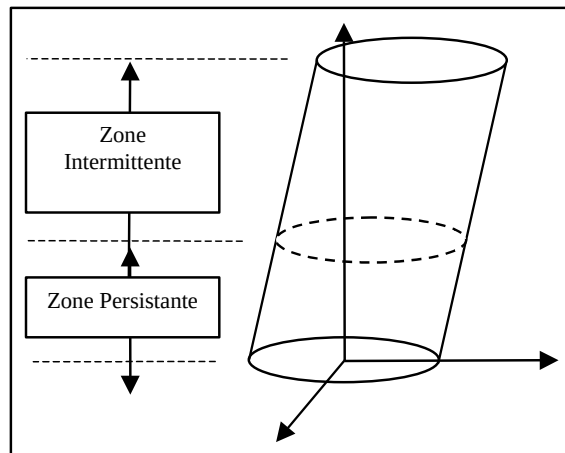


Figure 7 : Représentation schématique du modèle de flamme solide à deux zones

Le flux de radiation thermique reçu par un élément extérieur à la flamme sera alors calculé en sommant les flux émis par chaque zone de la flamme séparément.

La caractérisation du modèle de la flamme solide à deux zones passe donc par la détermination de différents paramètres :

- le profil du pouvoir émissif de la flamme, à savoir :
 - le pouvoir émissif moyen de la zone persistante,
 - le pouvoir émissif moyen de la zone intermittente,
- la géométrie de la flamme intervenant dans le calcul du facteur de vue, c'est-à-dire :
 - la hauteur totale de flamme,
 - la hauteur de la zone persistante pour la délimitation des deux zones.

Ce découpage rend bien entendu la définition des paramètres de la flamme plus complexe que pour un modèle à une zone.

5.2.2 PARAMETRES POUR LE MODELE DE LA FLAMME SOLIDE

L'application du modèle de la flamme solide nécessite la définition d'un certain nombre de paramètres, nécessaires pour estimer la densité de flux thermique radiatif reçu par une cible à partir du rayonnement émis par la flamme.

La définition de ces paramètres peut être répartie en deux grandes étapes selon qu'il s'agit :

- de caractériser le comportement de la flamme. Il convient alors de déterminer en fonction du combustible comme décrit dans les parties A et B) :
 - sa géométrie, à savoir :
 - l'aire de la base des flammes, soit le diamètre de la nappe pour un feu de combustible liquide soit la surface où repose le combustible solide,
 - la hauteur de la flamme,
 - éventuellement les effets associés à l'action du vent,
 - sa puissance surfacique rayonnée soit son pouvoir émissif.
- d'estimer la décroissance du flux thermique radiatif en fonction de la distance par le biais du calcul (indépendant du combustible) :
 - du facteur de forme traduisant l'angle solide sous lequel la cible perçoit la flamme,
 - du coefficient d'atténuation atmosphérique traduisant l'absorption par l'air ambiant d'une partie du flux thermique radiatif émis par la flamme.

5.3 CALCUL DU FLUX RAYONNE REÇU PAR LA CIBLE

Dans le modèle de la flamme solide, la cible est supposée exposée au rayonnement d'une flamme de géométrie constante et de pouvoir émissif homogène. Le flux qu'elle reçoit est alors déterminé grâce à la formule :

$$\phi = F_{1 \rightarrow 2} \cdot \tau \cdot \phi_0 \quad (8)$$

Avec ϕ : flux reçu par la cible (kW/m²),
 F : facteur de forme (-),
 τ : facteur de transmissivité atmosphérique (-),
 ϕ_0 : pouvoir émissif de la flamme (kW/m²).

La détermination du facteur de transmissivité atmosphérique et du facteur de forme est précisée dans les paragraphes qui suivent. Le calcul des autres grandeurs, plus spécifiques aux produits impliqués est détaillé dans les parties A et B.

5.3.1 FACTEUR DE TRANSMISSIVITE ATMOSPHERIQUE

Le facteur de transmissivité atmosphérique traduit le fait que les radiations émises sont en partie absorbées par l'air présent entre la surface radiante et la cible. Ce facteur de transmissivité vaut (1 – le facteur d'absorption). Quant au facteur d'absorption, sa valeur dépend des propriétés absorbantes des particules de l'air en relation au spectre d'émission du feu. A une température donnée, cette

atténuation est fonction de la distance de la cible à la flamme et de l'humidité relative de l'air. Pour la plupart des régions françaises, le taux moyen d'humidité relative de l'air est d'environ 70%. L'atténuation en question est due principalement à :

- l'absorption des radiations infrarouges par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone contenus dans l'atmosphère,
- la diffraction par les poussières et les suies en suspension.

Etant donné que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone sont les principaux composants absorbants pour la longueur d'onde correspondant à la radiation, l'approximation suivante peut être réalisée :

$$\tau = 1 - \alpha(\text{eau}) - \alpha(\text{CO}_2)$$

Les facteurs d'absorption α dépendent de la pression de vapeur saturante, de la longueur de la radiation, et des températures de radiation et ambiante. La pression de vapeur saturante du dioxyde de carbone est fixe, alors que celle de l'eau dépend de la température et de l'humidité de l'air.

Dans la littérature, différentes corrélations existent pour déterminer ce facteur de transmittivité, elles tiennent compte de la distance et de l'humidité (relative ou absolue).

5.3.1.1 LA CORRELATION DE BRZUSTOWSKI ET SOMMER

Elle donne le meilleur compromis entre précision et complexité (API, 1973).

$$\tau = 0,79 \times (100/d)^{1/16} \times (30,5/RH)^{1/16} \quad (9)$$

où d : distance de la cible à la source (m)

RH : taux d'humidité relative de l'air (%)

5.3.1.2 LA CORRELATION DE LANNOY :

Elle est donnée par la relation suivante (LANNOY, 1984):

$$\tau = 0,33 + 0,67 \cdot \exp(-0,0002 \cdot w \cdot d) \quad (10)$$

où d : distance de la cible à la source (m)

w : humidité absolue de l'atmosphère ambiante (g/kg d'air sec)

5.3.1.3 LA CORRELATION DE BAGSTER

Elle est donnée par la relation suivante (BAGSTER, 1989) :

$$\tau = 2,02 \cdot (p_w \cdot d)^{-0,09}$$

où

- d = distance entre la flamme et la cible (m)
- p_w = pression partielle d'eau dans l'air (Pa),

$$p_w = RH \cdot e^{\left(14,4114 - \frac{5328}{Ta}\right)} \cdot 1,013 \times 10^5$$

- RH : taux d'humidité de l'air (%)
- Ta : température ambiante (K)

5.3.1.4 CORRELATION DE WAYNE

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\tau = 1.006 - 0.017 \log X(H_2O) - 0.2368 (\log X(H_2O))^2 - 0.03188 \log X(CO_2) + 0.001164 (\log X(CO_2))^2$$

Où : $X(H_2O) = d \times HR \times P_{VAP(H_2O)} \times (288.73 / T)$

$X(CO_2) = d \times 273 \times t$

$P_{VAP(H_2O)}$: Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air,

RH : Taux d'humidité relative de l'air (%),

w : humidité absolue de l'air ambiant (g/ kg d'air sec).

L'influence des paramètres, température et humidité de l'air, ont été testés et il en ressort les conclusions suivantes:

- Pour les modèles de Bagster, de Wayne et de Brzustowski et Sommer, la valeur de l'humidité n'a que peu d'influence sur le facteur de transmittivité atmosphérique. En revanche, pour le modèle de Lannoy, il convient de spécifier l'humidité absolue du site.
- Pour l'ensemble des modèles exceptés Brzustowski et Sommer (qui est indépendant de la température), une variation de 20° C à un impact de l'ordre de 10% sur la valeur de la transmittivité atmosphérique.

Pour une humidité et une température donnée, la Figure 8 présente les écarts existants entre les différentes corrélations.

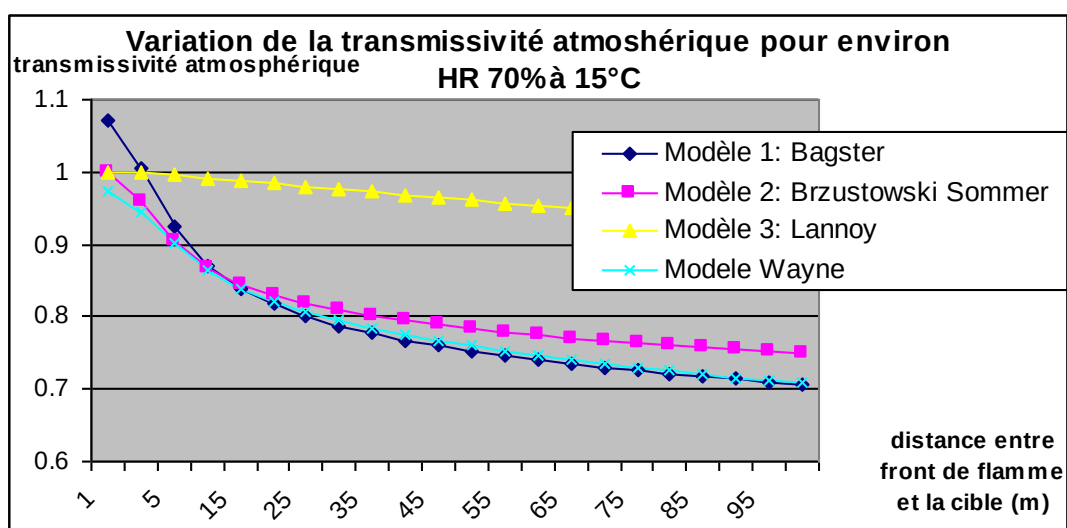


Figure 8 : Graphique comparatif des corrélations de transmittivité.

Rappelons qu'en champ proche (pour des distances inférieures à 10 m), ces modèles ne sont pas valides. Comme le montre la *Figure 8*, les écarts entre les corrélations à humidité et température données sont peu significatifs hormis pour la corrélation de Lannoy, utilisée dans les formules réglementaires de l'IT 89, qui donne les valeurs de transmittivité les plus importantes.

A noter que sauf justifications contraires, les conditions de température et d'humidité relatives à utiliser sont 15°C et 70%.

5.3.2 FACTEUR DE FORME

La technique de détermination des facteurs de forme permet de traiter le problème des échanges thermiques à distance.

Le facteur de forme entre deux surfaces (ou encore facteur de vue géométrique) traduit la fraction de l'énergie émise par une surface S_i interceptée par S_k :

$$f_{ik} = \frac{\phi_{i \rightarrow k}}{\phi_i}$$

Ainsi, il est purement géométrique et ne dépend que de la disposition relative des deux surfaces et de leur géométrie respective. La détermination des f_{ik} se fait à l'aide des deux relations suivantes :

$$f_{i1} + f_{i2} + \dots + f_{ij} + \dots + f_{ik} = 1$$

$$S_i f_{ik} = S_k f_{ki}$$

L'application au cas particulier des feux industriels, conduit à définir précisément les formes géométriques de la flamme et du récepteur. Généralement, la flamme est assimilée à une forme géométrique simple, par exemple :

- un cylindre droit dont la base est la surface circulaire de la flaque et la hauteur est estimée par des formules empiriques,
- un polyèdre dont chaque face est un rectangle dont la longueur est l'une des arêtes du polygone de base et la hauteur est estimée par des formules empiriques.

Concernant le récepteur, il est le plus souvent de petites dimensions par rapport à la surface des flammes. Etant donné par ailleurs que le rayonnement émis par les flammes est indépendant de la direction, il apparaît que le facteur de forme n'est autre que l'angle solide sous lequel la cible, considérée comme une surface unitaire, voit les flammes.

5.3.2.1 LE CALCUL INTEGRAL DU FACTEUR DE VUE

Le facteur de vue peut être calculé à partir d'un calcul intégral sur la base de la relation suivante :

$$F_{S \rightarrow C} = \sum_{ij} \frac{|\vec{r}_{ij} \cdot \vec{n}_{ij}| \cdot |\vec{r}_{ij} \cdot \vec{n}_C|}{\pi \cdot \|\vec{r}_{ij}\|^4}$$

Les différentes grandeurs sont définies sur le schéma suivant.

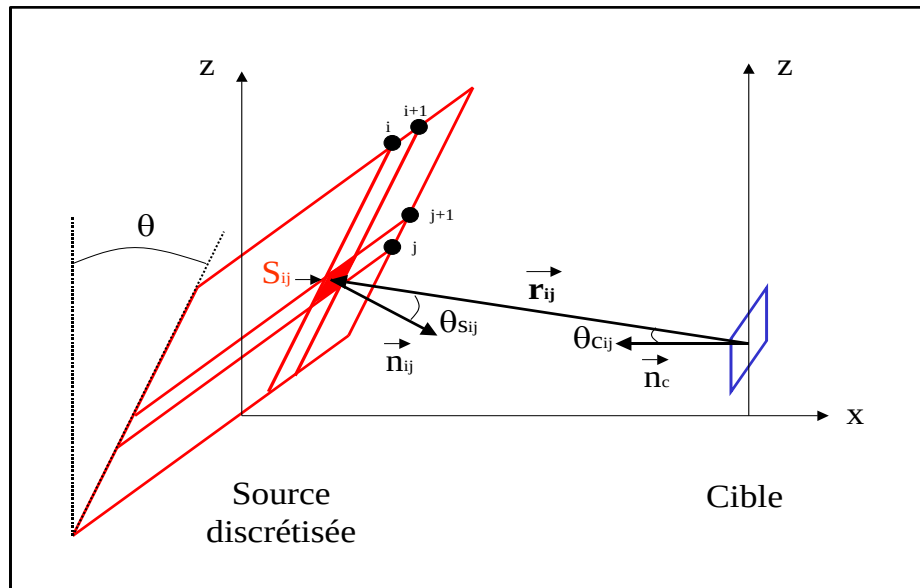


Figure 9 : Schéma général entre une flamme et une cible

La surface source est discrétisée en $n \times n$ surfaces élémentaires, puis un facteur de vue est calculé sur chacune de ces surfaces. Le facteur de vue final recherché correspond à la somme de ces derniers.

Le facteur de vue est donc obtenu par la somme suivante :

$$F_{S \rightarrow C} = \sum F_{S_{ij} \rightarrow C} = \sum_{ij} \frac{\cos \theta_{sij} \cdot \cos \theta_{cij}}{\pi \cdot r_{ij}^2}$$

Cette relation est utilisée notamment lorsque la flamme est inclinée et qu'un ou plusieurs écrans thermiques sont situés entre la flamme et la cible.

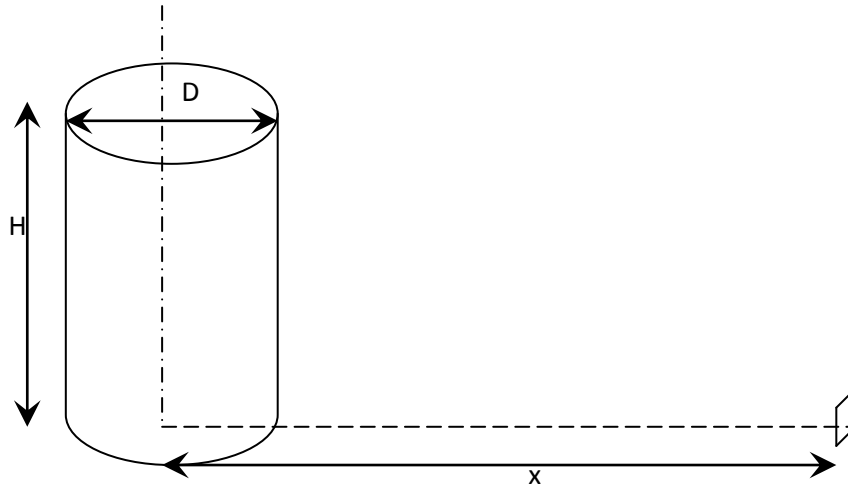
Il existe également de multiples formules analytiques permettant de déterminer le facteur de forme pour des géométries diverses (SPARROW & CESS, 1977). Les paragraphes suivants présentent quelques formules utiles pour des configurations classiques :

- cas d'un cylindre droit,
- cas d'un plan vertical.

5.3.2.2 CAS D'UN CYLINDRE DROIT

Raj. et al [21] proposent les formules suivantes afin de calculer analytiquement le facteur de forme pour un cylindre droit et une cible élémentaire située au niveau du sol.

En considérant une surface élémentaire verticale (perpendiculaire au sol) :



$$F_v = \frac{1}{\pi X} \operatorname{Arctan} \left(\frac{L}{\sqrt{X^2 - 1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[\frac{(A - 2X)}{X \sqrt{AB}} \operatorname{Arctan} \sqrt{\frac{A(X-1)}{B(X+1)}} - \frac{1}{X} \operatorname{Arctan} \sqrt{\frac{X-1}{X+1}} \right] \quad (11)$$

où :

$$R = D/2$$

$$L = H/R$$

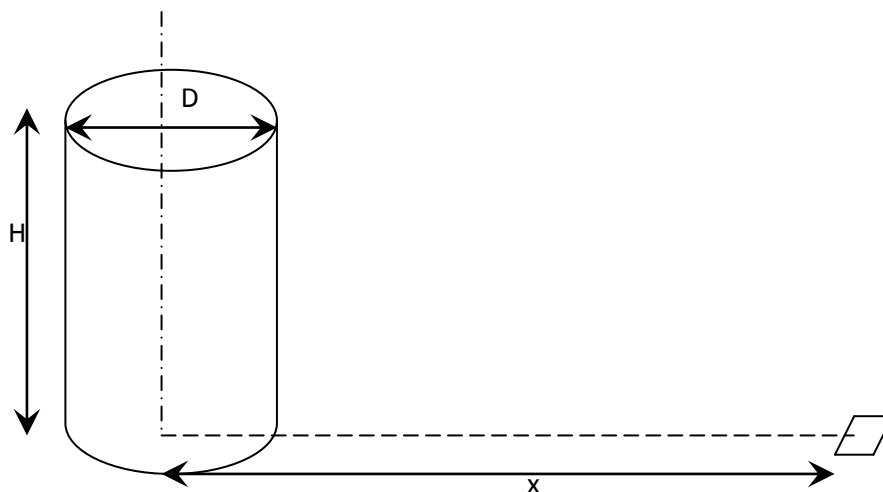
$$X = x/R$$

$$A = (X+1)^2 + L^2$$

$$B = (X-1)^2 + L^2$$

F_v : Facteur de forme pour une cible verticale

En considérant une surface élémentaire horizontale (parallèle au sol) :



$$F_h = \frac{1}{\pi} \left[\text{Arc tan} \left(\frac{\sqrt{X+1}}{\sqrt{X-1}} \right) - \left(\frac{X^2 - 1 + L^2}{\sqrt{AB}} \right) \text{Arc tan} \left(\sqrt{\frac{(X-1)A}{(X+1)B}} \right) \right] \quad (12)$$

où :

$R = D/2$	$A = (X+1)^2 + L^2$
$L = H/R$	$B = (X-1)^2 + L^2$
$X = x/R$	F_h : Facteur de forme pour une cible horizontale

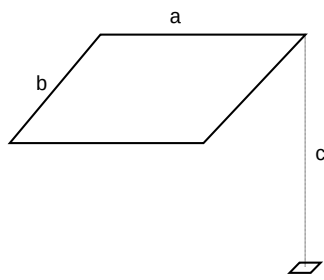
A noter que pour une cible à une hauteur h du sol, il suffit de décomposer le cylindre de flamme en deux selon un plan horizontal à l'altitude h afin de pouvoir appliquer les formules précédentes sur chaque moitié de cylindre.

5.3.2.3 CAS D'UN PLAN VERTICAL

De la même façon, des formules analytiques simples permettent de déterminer le facteur de forme pour un plan vertical et une cible élémentaire.

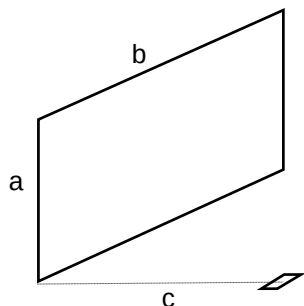
Les formules suivantes ont ainsi été proposées par Sparrow et Cess [22].

Considérant une surface élémentaire verticale (parallèle au mur de flamme), le facteur de forme est donné par la formule suivante :



$$F_v = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \text{Arctg} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \text{Arctg} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right] \quad (13)$$

Pour une surface élémentaire orientée perpendiculairement au plan émetteur (cible horizontale), le facteur de forme est déduit à partir de la formule suivante :



$$A = \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$X=a/b$$

$$Y=c/b$$

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left(\text{Arctg} \frac{1}{Y} - A \cdot Y \cdot \text{Arctg} A \right)$$

(14)

Bien entendu, les formules deviennent plus complexes lorsqu'il s'agit de prendre en compte l'effet du vent par exemple.

En outre, mentionnons que la présence d'un obstacle éventuel ou d'un écran entre les flammes (mur coupe-feu par exemple) et la cible peut également être prise en compte dans la détermination des facteurs de forme. Il s'agit alors de déterminer le facteur de forme de l'obstacle en question et le soustraire au facteur de forme entre la cible et la flamme.

Une autre formule de facteur de vue plus générique existe et permet de traiter les cas avec et sans vent ainsi que toutes les positions de cibles possibles (notamment, verticale, horizontale et latérale).

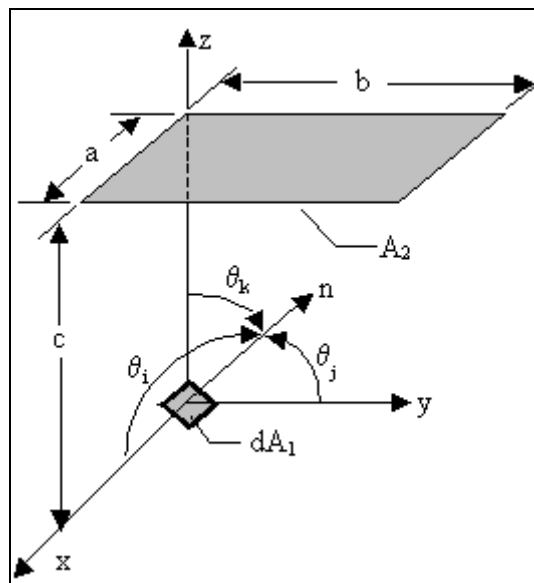


Figure 10 : Schéma pour le calcul analytique du facteur de vue

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} B \times \cos \theta_i + \tan^{-1} A \times \cos \theta_j + \frac{A \cos \theta_k - \cos \theta_i}{(1 + A^2)^{1/2}} \tan^{-1} \frac{B}{(1 + A^2)^{1/2}} \right. \\ \left. + \frac{B \cos \theta_k - \cos \theta_j}{(1 + B^2)^{1/2}} \tan^{-1} \frac{A}{(1 + B^2)^{1/2}} \right]$$

Où $A=a/c$; $B=b/c$

Cette formule ne peut pas être utilisée lorsque le plan formé par la cible coupe la flamme. Dans un tel cas, le facteur de vue doit être déterminé par la formule faisant intervenir l'intégrale double (§ 5.3.2.1).

5.3.3 APPLICATION AU CAS D'UNE CIBLE HUMAINE

L'approche communément retenue pour modéliser la cible consiste à considérer deux surfaces élémentaires : l'une horizontale et l'autre verticale (cf § 5.3.2.2 et 5.3.2.3). Le mode de calcul décrit dans le présent paragraphe découle du fait qu'une cible humaine (sa tête) se compose de plusieurs surfaces approximativement horizontales et verticales. Deux flux sont donc calculés et une norme est ensuite appliquée pour obtenir une valeur unique (cf Equation (15)).

Soit, à titre d'exemple, la configuration reproduite Figure 11 :

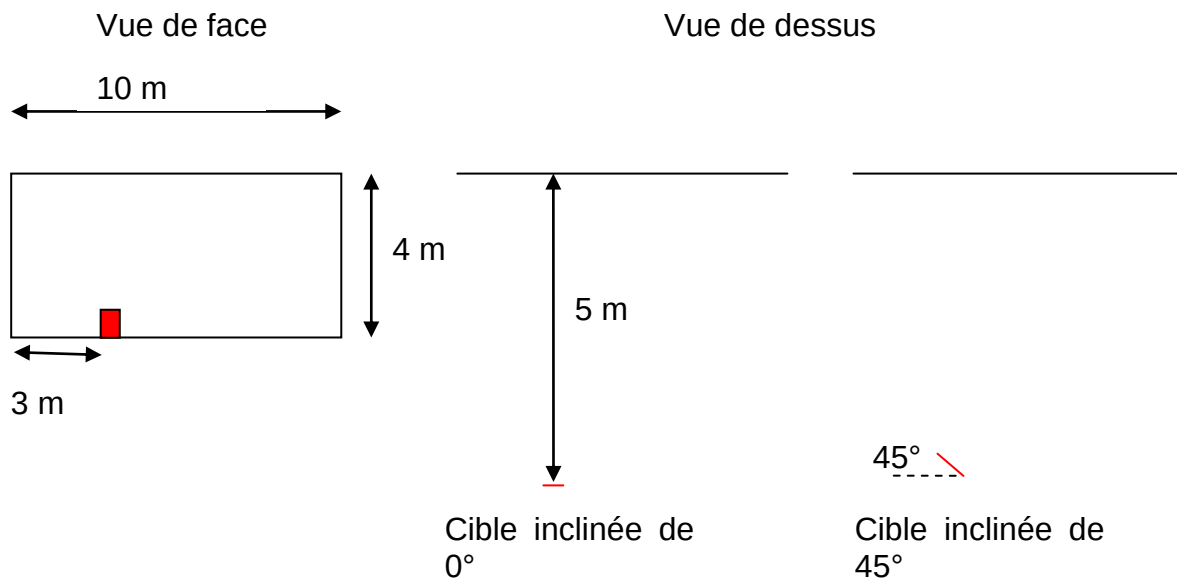


Figure 11 : Schéma d'une surface émettrice verticale et d'une cible

Le carré rouge représente la cible élémentaire. Le facteur de forme varie en fonction de l'angle de la cible (par rapport au plan de la surface émettrice) et donne la courbe de la Figure 12. Dans cet exemple précis, du fait de la position de la cible, le maximum est obtenu pour un angle de 11° et vaut 0,235. Cette valeur est différente de celle obtenue en prenant la norme des cas à 0° et à 90° .

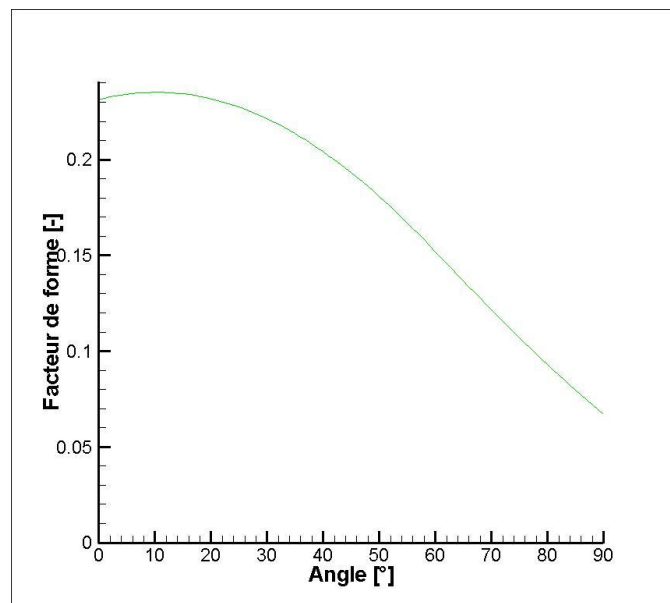


Figure 12 : Facteur de forme en fonction de l'angle d'inclinaison

Dans ce cas, la valeur obtenue est majorante mais cette approche n'est pas adaptée aux cas où :

- la flamme est inclinée par rapport à la verticale,
- la surface en feu comporte des parois obliques (entrepôt ou cuvette non rectangulaire),
- l'ensemble cible verticale – cible horizontale voit plusieurs surfaces émettrices (Figure 13).

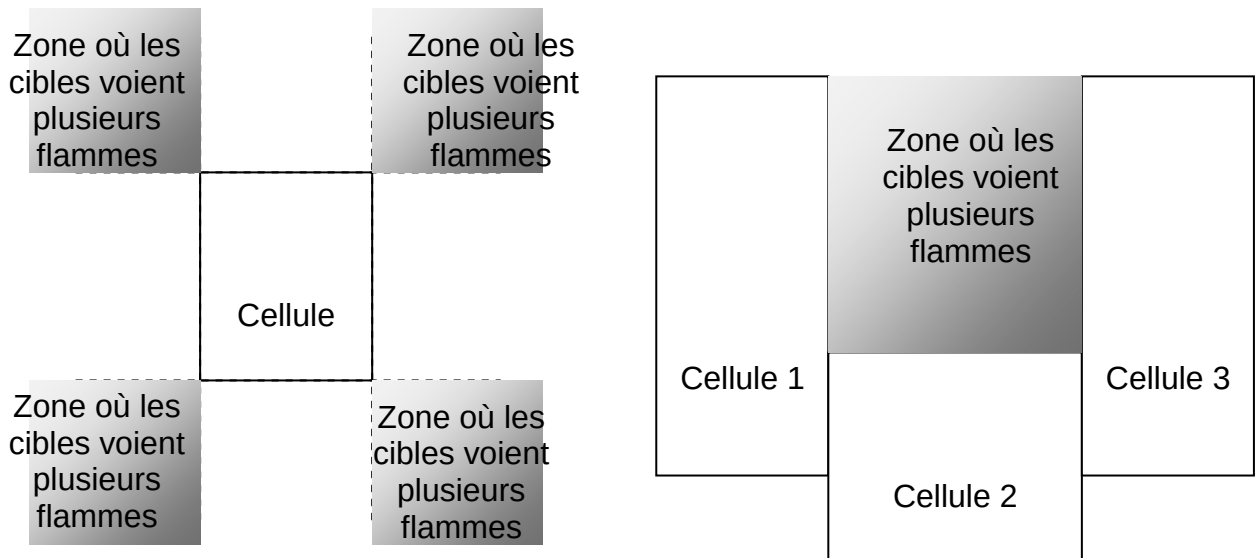


Figure 13 : Exemples de configuration où la cible voit plusieurs plans de flammes

Pour traiter ces situations, il est possible de considérer une cible élémentaire de type cube. Ainsi, quelle que soit la position de la cible et des cellules, la cible est toujours capable de voir les surfaces émettrices. Le calcul du flux reçu se fait donc de la manière suivante :

- le flux reçu par chaque face du cube élémentaire est calculé en considérant toutes les surfaces émettrices visibles,
- les flux reçus sont comparés sur 2 faces opposées et le plus grand des 2 est retenu,
- une moyenne exprimée équation **(15)** est appliquée sur les 3 valeurs obtenues pour en déduire une unique valeur.

La cible élémentaire est matérialisée par 5 faces susceptibles de recevoir un flux : 2 faces latérales (1 et 1'), 2 verticales (2 et 2') et 1 horizontale (3) (la face 3' n'est pas considérée car elle ne reçoit pas de rayonnement) (Figure 14).

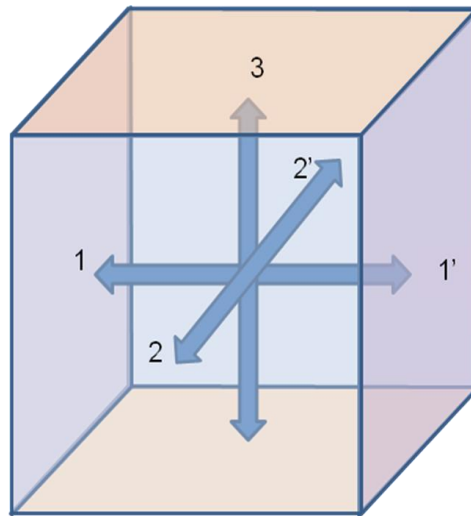


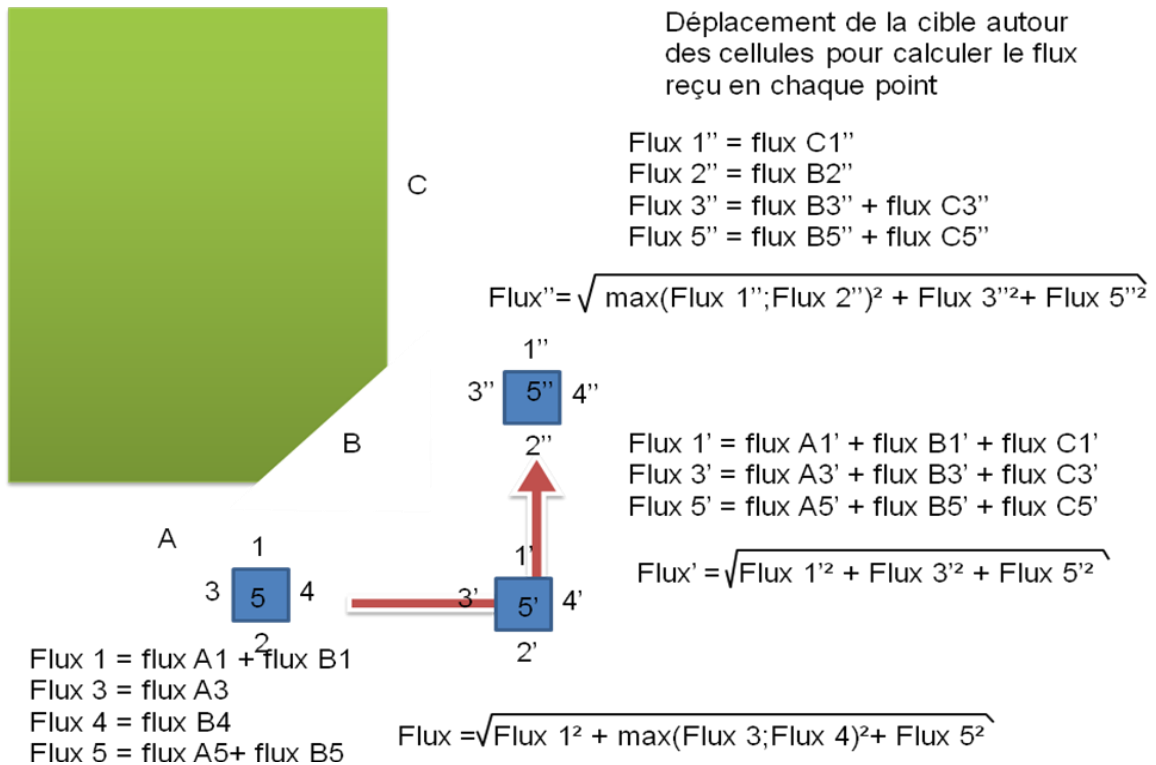
Figure 14 : Schéma de la cible élémentaire

Les flux reçus par 2 cibles opposées (1 et 1') ou (2 et 2') sont comparés 2 à 2 et le maximum des 2 flux est conservé pour calculer la moyenne quadratique des différents flux telle que :

$$Flux = \sqrt{\max(Flux1; Flux1')^2 + \max(Flux2; Flux2')^2 + (Flux3)^2} \quad (15)$$

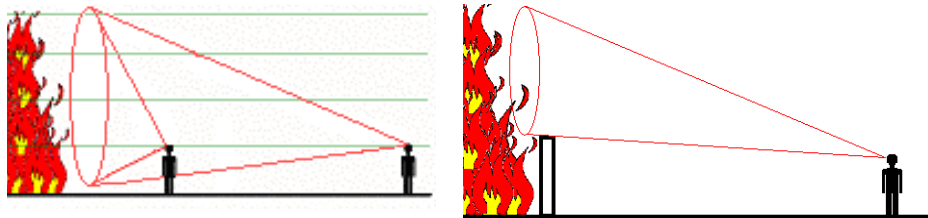
Où Flux1 et Flux1' sont les flux reçus par les faces latérales, Flux2 et Flux2' sont les flux reçus par les faces verticales et Flux3 est le flux reçu par la face horizontale supérieure (Figure 14).

Un exemple de calcul est proposé ci-après pour une cible se déplaçant autour d'une cellule.



5.3.4 RAPPEL SUR LE RÔLE DES ÉCRANS THERMIQUES

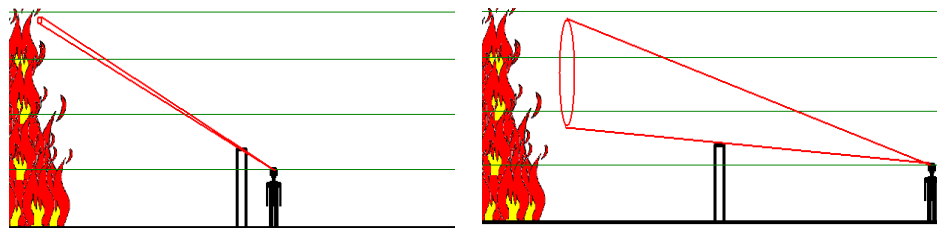
Les écrans jouent un rôle protecteur pour les cibles potentielles en masquant partiellement ou totalement les surfaces émettrices (Figure 15).



Situation en l'absence d'écran Situation en présence d'écran

Figure 15 : Rôle protecteur des écrans proche de la flamme.

Ils jouent ce rôle d'autant mieux qu'ils sont placés loin de la source et donc près de la cible (Figure 16).



Cible proche de l'écran

Cible loin de l'écran

Figure 16 : Rôle protecteur des écrans déportés.

Les éléments qui peuvent être considérés comme écrans sont les merlons, les dénivelés, les parois périphériques ou encore les murets de cuvette de rétention.

6. EFFETS ET SEUILS RETENUS

6.1 PREAMBULE

Les conséquences associées à un feu sont essentiellement liées :

- au rayonnement thermique, sur l'homme et les équipements,
- aux dégagements de fumées, particulièrement aux gaz toxiques qu'elles véhiculent, mais aussi à la diminution de la visibilité induite.
- à la pollution des eaux ou des sols liée par exemple, au transport de substances dangereuses pour l'environnement via les eaux d'extinction.

L'objet de ce chapitre est de décrire les effets associés à un feu industriel, en se limitant aux seuls effets thermiques radiatifs. Les démarches d'évaluation des dangers liés à l'incendie, telles que décrites au chapitre précédent, permettent de caractériser l'intensité de l'incendie par comparaison à des valeurs seuils. L'ensemble de ces critères permet d'évaluer l'étendue des zones à risques correspondant aux premiers décès et aux premières atteintes irréversibles sur l'homme, les équipements ou les biens.

6.2 EFFETS DU RAYONNEMENT THERMIQUE

6.2.1 NOTION DE BRULURES

Les dangers liés au rayonnement thermique se caractérisent par les brûlures. La brûlure est une destruction du revêtement cutané, voire des tissus sous-jacents, provoquée par la chaleur sous toutes ses formes et mettant d'emblée en cause l'intégrité du milieu intérieur.

Sa gravité dépend de plusieurs facteurs :

- de son étendue et de sa profondeur,
- du terrain sur lequel elle survient,
- de sa localisation (compromettant une fonction vitale, entraînant un risque fonctionnel, majorant un risque infectieux),
- de l'âge du blessé,
- de la précocité de la mise en route d'une thérapeutique substitutive.

6.2.2 VULNERABILITE

Un être humain exposé à un rayonnement thermique peut subir des brûlures allant du simple érythème à la brûlure du 3^{ème} degré. Ces brûlures sont ou non fatales suivant la surface de peau brûlée et la gravité des lésions.

En terme de vulnérabilité des individus aux radiations thermiques, plusieurs seuils critiques sont généralement retenus, par ordre de gravité croissante :

- le **seuil de douleur**, qui permet de déterminer le temps d'exposition supportable pour un flux donné,
- le **seuil des brûlures significatives**, qui correspond à l'apparition de cloques (phlyctènes) caractéristiques des brûlures du 2^{ème} degré,
- le **seuil de létalité**, donné souvent à 1%, 5%, 50% et 100% de mortalité.

6.2.3 EFFETS ET DOSE

D'une manière tout à fait générale, afin d'estimer les effets d'un phénomène physique dangereux sur l'homme ou l'environnement, il est nécessaire d'évaluer à la fois :

- l'intensité des conséquences du phénomène. Cette intensité peut par exemple s'exprimer en terme de concentration (ppm) pour ce qui concerne la dispersion de gaz toxiques ou de densité de flux thermiques pour des phénomènes de combustion (incendie, BLEVE...),
- la durée d'exposition, soit le temps pendant lequel la cible est exposé aux conséquences du phénomène dangereux,
- ces deux paramètres définissent ainsi la notion de dose, qui relie les effets d'un accident à une fonction de l'intensité des conséquences du phénomène et de la durée d'exposition.

A priori, dans le cas d'un feu industriel, la cible peut être exposée à des flux thermiques radiatifs pendant toute la durée de l'incendie. C'est pourquoi, pour l'évaluation des effets d'un phénomène aussi long dans le temps, la durée d'exposition n'est pas prise en compte et il faut s'appuyer alors sur les seuils d'effet définis dans la réglementation dans l'arrêté du 29 septembre 2005 qui sont:

Pour les effets sur l'homme :

- 3 kW/m², seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- 5 kW/m², 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 ;
- 8 kW/m², 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.

Pour les effets sur les structures :

- 5 kW/m², seuil des destructions de vitres significatives ;
- 8 kW/m², seuil des effets domino¹ 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.

Un feu industriel peut donner lieu à des effets sur les structures dans la mesure où sa durée peut être plus ou moins prolongée (de quelques minutes à plusieurs heures en général).

Outre ce facteur « temps » qui intervient de façon prépondérante, les autres paramètres à prendre en compte sont :

- la nature du matériau,
- son pouvoir d'absorption,
- son aptitude à former des produits volatils et inflammables lorsqu'il est chauffé,
- la présence ou non de flammes ou flammèches qui pourraient enflammer ces vapeurs,

Il devient alors difficile de donner des valeurs seuils de façon simple et univoque. La littérature propose cependant un certain nombre d'indications utiles sur les valeurs limites du flux incident, permettant ainsi d'appréhender le risque.

¹ *Seuil à partir duquel les effets domino doivent être examinés. Une modulation est possible en fonction des matériaux et structures concernés (cf Référentiel « Résistance des structures aux actions accidentelles », 2007).*

7. CONCLUSION

Cette partie générale s'est attachée à décrire les généralités communes aux feux de liquides et de solides.

Il a traité en particulier de la description générale de l'incendie, des modes de transfert de chaleur d'un incendie avant de détailler le cas du rayonnement thermique.

Ce type de transfert est en effet modélisé de la même façon pour les 2 types d'incendie. Il en est également de même pour l'évaluation de l'impact sur l'environnement au sens large (personnes et installation industrielle).

A la suite de cette partie commune, les parties A et B suivantes décrivent en détail respectivement les modèles afférents aux feux de nappe et aux feux d'entrepôt.

8. REFERENCES

M.G. ZABETAKIS(1965)

FLAMMABILITY CHARACTERISTICS OF COMBUSTIBLE GASES AND VAPOURS
US Bureau of Mines, Bulletin 627, 1965

DRYSDALE (1985)

An introduction to fire dynamics ;
John Wiley & sons, New York, 1985

Mc CAFFREY,

MOMENTUM IMPLICATIONS FOR BUOYANT DIFFUSION FLAMES,
Combustion and Flame, 52, p 149-167, 1983.

LIHOU, MAUND (1982)

Thermal radiation hazard from fireballs ;
Int.Chem.Eng.Symp.Series 71, 1982

American Petroleum Institute (1973)

Guide for pressure relieving and depressing systems ;
API Recommended Practice 521, appendix A, 1973

LANNOY (1984)

Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre
Etudes déterministe et probabiliste du scénario d'accident ;
Electricité de France – Direction des Etudes et Recherches, 1984

D.G. BAGSTER, R.M. PITTLADO (1989)

THERMAL HAZARDS IN THE PROCESS INDUSTRY
Chemical Engineering Progress, pp. 69-75, 1989

E.M. SPARROW, R. D. CESS, 1977

RADIATION HEAT TRANSFER, Hemisphere publishing corporation,
augmented edition, 1977.

HAMILTON, MORGAN (1952)

Radiant interchange configuration factors ;
NACA Technical Note 2386, 1952

STANNARD (1977)

Fire Technology, p.35-41, 13, 1977

DELICHATSIOS (1987)

Air Entrainment into Buoyant Jet Flames and Pool Fires
Combustion and Flame, **70**, pp 33-46, 1987

F. P. LEES

Tome 2, Fire section16
Loss Prevention in the Process Industries, 2nd edition

RAPPORT D'ÉTUDE

14 / 03 / 2014

Réf. : DRA-14-141478-03176A

Feux industriels de liquides

Partie A

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	3
1.1 Définition.....	3
1.2 Démarche observée	3
2. ACCIDENTOLOGIE : DESCRIPTIF D'ACCIDENTS CARACTERISTIQUES..	5
2.1 Démarche	5
2.2 Analyse de l'accidentologie.....	5
2.2.1 Feux de nappe, incendies consécutifs à un débordement	6
2.2.2 Stockages de solvants	8
3. ESTIMATION DES CONSEQUENCES D'UN INCENDIE DE FEU DE LIQUIDE	9
3.1 Caractérisation de la géométrie de la flamme.....	9
3.1.1 Surface de la base de flamme : notion de diamètre équivalent.....	9
3.1.2 Cas d'un rejet dans une cuvette de rétention circulaire.....	9
3.1.3 Cas d'un rejet dans une cuvette de rétention non circulaire.....	10
3.1.4 Cas d'un rejet en champ libre.....	10
3.1.5 Remarques relatives au diamètre équivalent	11
3.2 Hauteur de la flamme	11
3.2.1 Débit massique surfacique de combustion.....	11
3.2.2 Remarques relatives à la détermination du débit massique surfacique de combustion.....	15
3.3 Corrélations pour le calcul de la hauteur de flammes (H)	16
3.3.1 Corrélation de Thomas [8].....	16
3.3.2 Corrélation de Moorhouse [12].....	17
3.3.3 Corrélation de Stewart [26].....	17
3.3.4 Corrélation de Zukoski [27]	18
3.3.5 Corrélation de Cox et Chitty [28]	18
3.3.6 Corrélation de Heskestad [9].....	19
3.3.7 Grands feux de nappe.....	19
3.3.8 Conclusions sur le calcul de la hauteur de flammes	19
3.4 Effets dus au vent.....	20
3.4.1 Inclinaison de la flamme	21

3.4.2 Diminution de la hauteur moyenne de flamme	22
3.4.3 Elargissement de la base de la flamme.....	23
3.4.4 Conclusions relatives aux effets dus au vent	24
3.5 Pouvoir émissif de la flamme	25
3.5.1 Importance de la fraction radiative	25
3.5.2 Estimation du pouvoir émissif.....	27
3.5.3 Conclusions relatives à la détermination du pouvoir émissif de la flamme.....	29
4. OUTILS DE CALCUL DEVELOPPES PAR L'INERIS	31
4.1 Outil FNAP	31
4.1.1 Champ d'application de FNAP	31
4.1.2 Modèles utilisés par FNAP	32
4.1.2.1 Diamètre équivalent	32
4.1.2.2 Débit masse surfacique de combustion	32
4.1.2.3 Hauteur des flammes.....	32
4.1.2.4 Pouvoir émissif des flammes	32
4.1.2.5 Transmissivité atmosphérique	33
4.1.2.6 Positionnement de la cible	33
4.1.3 Mise en œuvre de l'outil : comparaison avec des valeurs issues de l'expérimentation	34
4.2 Outil de calcul de la Circulaire DPPR/SEI2/AL- 06- 357 du 31/01/07	37
4.2.1 Hypothèses et corrélations du modèle de la Circulaire	37
4.2.2 Comparaison avec les autres modèles	40
4.2.3 « Validation » expérimentale	42
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION DES OUTILS DE CALCUL.....	45
6. GLOSSAIRE	47
7. REFERENCES.....	49
8. LISTE DES ANNEXES.....	53

1. INTRODUCTION

1.1 DEFINITION

Le terme « feu de nappe », ou « feu de flaque », décrit un incendie résultant de la combustion d'une nappe de combustible liquide en atmosphère libre. Ce phénomène implique principalement la surface de la nappe en contact avec l'air.

Les dimensions et la géométrie de la nappe peuvent être tout à fait variables. Il convient ainsi de distinguer :

- Les feux de réservoir : le feu est alors contenu dans une enceinte dont la surface est déterminée par les dimensions du réservoir ;
- Les feux de cuvette (de rétention) : l'extension de la nappe peut alors être limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé notamment par les exigences réglementaires applicables au stockage ;
- Les feux de flaque libre : en l'absence de moyens physiques prévus pour limiter l'extension de la nappe ou lorsque la cuvette de rétention n'est pas complètement envahie ; l'extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et des conditions de rejet du combustible.

La formation d'une nappe au sol peut être observée suite à l'épandage d'une substance liquide ou à la fusion de corps solides susceptibles de se liquéfier sous l'effet de la chaleur (ex. certains plastiques, bitumes..).

De plus, le domaine d'application défini ci-dessus peut être étendu, dans une certaine mesure, aux liquides ou aux solides fusibles stockés à l'intérieur de bâtiments, tels que des entrepôts par exemple. Dans une telle configuration, le comportement de la flamme peut être significativement modifié par la présence de structures matérielles. Par ailleurs, l'apport d'oxygène, indispensable à la combustion, peut être limité en milieu confiné.

1.2 DEMARCHE OBSERVEE

La démarche adoptée pour ce présent rapport consacré à l'étude du phénomène de « feu de nappe » est décrite ci-après :

- chapitre 2 : Accidentologie : descriptif d'accidents caractéristiques,
- chapitre 3 : Estimation des conséquences d'un incendie de feu de liquide,
- chapitre 4 : Modèles développés par l'INERIS et comparaison avec d'autres modèles ainsi qu'avec des résultats expérimentaux

2. ACCIDENTOLOGIE : DESCRIPTIF D'ACCIDENTS **CARACTERISTIQUES**

2.1 DEMARCHE

D'une manière générale, l'analyse des accidents passés est souvent riche d'enseignements. Elle permet de mettre en évidence les éléments caractéristiques d'un phénomène accidentel et particulièrement :

- les conditions d'occurrence,
- le type de produits impliqués,
- l'installation en question et son environnement.

L'objet de ce chapitre est de présenter une synthèse de l'analyse d'accidents de type « feu de nappe » effectuée à partir des données disponibles.

La base de données utilisée a été constituée au fur et à mesure des travaux réalisés par l'INERIS dans le domaine des feux de nappe.

Elle provient essentiellement :

- d'articles et de photos parus dans les revues spécialisées tels que Fire Prevention, Face au risque, Le Sapeur-Pompier, etc...
- de listes d'accidents extraites de la base de données ARIA du BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles du MEDDE). Les listes de la base ARIA sont disponibles dans les annexes 1 à 3. Les numéros figurant dans les synthèses à suivre font référence aux accidents répertoriés dans ces annexes.

Dans le cadre du présent rapport, seuls les documents les plus pertinents ont été exploités.

2.2 ANALYSE DE L'ACCIDENTOLOGIE

Les deux thèmes suivants ont fait l'objet d'une interrogation de la base de données ARIA du BARPI :

- les feux de nappes ou incendies résultant d'un débordement : principalement feux de bacs ou de cuvettes concernant des hydrocarbures,
- les incendies concernant les stockages de solvants.

Ce paragraphe a pour objectif de décliner les éléments généraux de l'accidentologie relevés à partir de l'analyse des accidents passés.

2.2.1 FEUX DE NAPPE, INCENDIES CONSECUTIFS A UN DEBORDEMENT

L'interrogation de la base ARIA sur le sujet très général des feux de nappe a donné lieu à l'émission d'un recueil d'accidents concernant essentiellement des raffineries ou dépôts d'hydrocarbures (carburants, solvants, pétrole, fuel, gasoil, etc.). Les dépôts d'hydrocarbures sont naturellement identifiés comme des installations particulièrement concernées par le phénomène de feu de nappe.

Les principales conséquences observées de manière récurrente sont :

- la pollution des eaux de surface ainsi que la contamination des sols, voire des eaux souterraines,
- plus rarement, des blessés ou des morts.

Les 17 accidents répertoriés par la base ARIA , sur une période de 1955 à aujourd'hui (liste disponible en Annexe 1) concernent des feux de grande ampleur survenus sur le territoire français ou européen. Les enseignements directement exploitables sont reportés ci-après :

1. Concernant les causes identifiées, il convient de noter que:

- la malveillance a été à l'origine du sinistre de manière récurrente,
- l'épandage accidentel de combustible est survenu de manière récurrente suite à une fuite sur des équipements de transferts :
 - pompe (n°4998),
 - raccord de ligne de vidange (n°2914),
 - vanne (n°10120),
 - canalisation (n°8623),
 - regard de purge (n°3396).
- le surremplissage d'une capacité a été à l'origine d'un accident (n°16828),
- les sources d'inflammation du combustible peuvent être de nature diverse :
 - moteur électrique (n°7500),
 - travaux de soudage (n°3396, 9598),
 - étincelle (n°16828),
 - foudre et mauvaise équipotentialité (n°8183, 5959).

2. D'un point de vue factuel, les éléments suivants ont été relevés :

- des feux de bac ont été à l'origine de Boil Over (cas n°6051 et 6077), conduisant à un feu généralisé à l'ensemble de la cuvette ainsi qu'à la ruine par effet domino des autres réservoirs,
- dans certains cas, la ruine d'un réservoir suite à une explosion aérienne a conduit à la création d'une « vague » de combustible enflammé qui a submergé le merlon et propagé l'incendie au-delà de la cuvette,
- d'une manière générale, seuls quelques éléments descriptifs pertinents sont disponibles, et parmi eux :
 - « des flammes de 10 m de haut » relativement à l'épandage du contenu d'un camion citerne (n°4763),
 - « un incendie de taille gigantesque » (n°9598),
 - « des vagues de feu de 10 m » (n°12507),
 - « un rayonnement très fort » (n°16828),
 - « des fumées noires » (n°16828) et « une colonne de fumées qui s'élève à 1200 m » (n°10120).

3. Les facteurs pouvant être qualifiés d'« aggravants » sont :

- l'absence de capacités de rétention (n°6051),
- une cuvette commune à plusieurs bacs, voire à tout un dépôt (n°3610, 10120, 8183),
- l'alimentation continue du feu en combustible par la non fermeture des vannes, résultant d'un dysfonctionnement (n°7500) ou d'une erreur humaine associée à un défaut de conception du système de sécurité (n°3396),
- l'entraînement des hydrocarbures enflammés par les eaux d'extinction, facilitant la propagation de l'incendie (n°5959).

4. En ce qui concerne la gravité de tels événements, les comptes-rendus des accidents passés font part de victimes chez les pompiers ou le personnel de l'installation et d'importants dommages matériels sur l'installation ou sur l'environnement proche (habitations voisines, végétation, points d'eau, cours d'eau ou station d'épuration pollués, sols souillés par les hydrocarbures, pollution atmosphérique...).

Enfin, dans la plupart des cas relevés dans cette liste, la durée des accidents est relativement longue. La lutte et l'extinction des feux de cuvette ou de bac sont des opérations souvent difficiles qui se chiffrent en plusieurs dizaines d'heures (n°2838, 3610, 6077, 7500 par exemple) voire quelques jours (n°8183, 9598, 16828).

2.2.2 STOCKAGES DE SOLVANTS

La liste des accidents dont une synthèse est présentée ci-dessous est disponible en Annexe 2. Les numéros figurant entre parenthèses se réfèrent directement à cette liste.

1. Les causes des accidents listés concernent principalement :

- des étincelles produites par des travaux de soudure (n°476), par une ébarbeuse (n°6108), par une disqueuse (n°6985),
- des erreurs de manutention provoquant la chute d'un bidon (n°4219) ou d'un fût (n°9040) suivie d'une inflammation au contact de matériel électrique, un chariot élévateur allumant des vapeurs inflammables (n°10168, 5793) ou perçant un fût (n°8702),
- la malveillance (n°2659, 5518, 8983),
- la foudre (n°9996),
- une mauvaise maîtrise du procédé (n°2404), notamment lors des opérations de transfert de produits (pompage, remplissage de bidons),
- une inflammation spontanée (n°14555) ou l'explosion d'un bidon à l'ouverture (n°3337).

2. En ce qui concerne les effets de ce type de sinistre, il convient de retenir que :

- la propagation des incendies listés est souvent rapide, et ce d'autant plus qu'elle est attisée par un vent violent,
- certains accidents relatés ont provoqué des dommages significatifs sur les bâtiments voisins de l'usine (n°765). En particulier, l'incendie a pu se propager à l'usine adjacente (n°14421), ou tout au moins à l'ensemble des ateliers d'une installation,
- les systèmes de sécurité en place n'ont pas toujours eu l'efficacité prévue : « la présence d'un système de sécurité de type déluge n'a pu stopper le début d'incendie » (n°7485).

3. Enfin, deux événements apparaissent particulièrement instructifs pour la description du phénomène de feux de nappe.

Ainsi, pour ce qui concerne l'incendie ayant affecté un entrepôt de solvants à GRAULHET (81) le 25/08/92, des flammes de 50 mètres de haut ont été observées. Les fumées dégagées par l'incendie étaient visibles à plus de 10 km. Enfin, un périmètre de sécurité de 500 m autour de l'établissement a dû être installé.

Un incendie sur ce type stockage, survenu en Belgique le 6/04/1993, s'est caractérisé par des boules de feu de 100 mètres de diamètre, une colonne de fumée de 100 m de haut ont pu être observées et des projections de fûts à 50 m.

3. ESTIMATION DES CONSEQUENCES D'UN INCENDIE DE FEU DE LIQUIDE

Ce paragraphe présente une synthèse de corrélations et de lois empiriques usuelles permettant d'évaluer simplement les différents paramètres à prendre en compte pour l'application du modèle de la flamme solide. Il convient de rappeler d'une part, qu'il ne s'agit aucunement d'une liste exhaustive et d'autre part, que le parti a été pris de proposer diverses approches possédant chacune des domaines d'application spécifiques.

3.1 CARACTERISATION DE LA GEOMETRIE DE LA FLAMME

Dans le modèle de la flamme solide, la flamme est assimilée à un volume de géométrie simple (cylindre vertical, parallélépipède rectangle, cône) aux propriétés variables ou homogènes (notamment au niveau des paramètres tels que la géométrie et le pouvoir émissif de la flamme).

Pour caractériser la géométrie de la flamme, il est indispensable de déterminer entre autres :

- la surface de la base de la flamme,
- sa hauteur H ,
- si nécessaire, les effets dus à l'action du vent.

3.1.1 SURFACE DE LA BASE DE FLAMME : NOTION DE DIAMETRE EQUIVALENT

En fonction des conditions de rejet du combustible, des caractéristiques du terrain et de la présence éventuelle de cuvettes de rétention, la surface occupée par la nappe peut prendre des géométries diverses. 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. Ce paramètre n'est a priori utile que pour l'emploi de ces corrélations. Une définition sera fournie en fonction des différents cas étudiés.

3.1.2 CAS D'UN REJET DANS UNE CUVETTE DE RETENTION CIRCULAIRE

Dans le cas d'une nappe se développant dans une cuvette de rétention circulaire, le diamètre équivalent peut être assimilé au diamètre de la cuvette pour peu que les conditions suivantes soient respectées :

- la quantité de liquide rejetée est suffisante pour occuper toute la surface de la cuvette,
- la cuvette de rétention est capable de retenir la majeure partie du liquide et ainsi limiter les risques de débordements, par effets de vague par exemple,
- la tenue mécanique de la cuvette de rétention est assurée durant toute la durée du rejet et de l'incendie.

3.1.3 CAS D'UN REJET DANS UNE CUVETTE DE RETENTION NON CIRCULAIRE

Pour un feu de cuvette non circulaire, le diamètre équivalent, D_{eq} , peut être estimé par la formule suivante :

$$D_{eq} = 4 \times \frac{\text{Surface de la cuvette}}{\text{Périmètre de la cuvette}} \quad (1)$$

Cependant, ce diamètre équivalent peut ne pas être représentatif des caractéristiques du feu, en particulier dans le cas d'une cuvette rectangulaire de forme allongée, dont le rapport entre la longueur et la largeur est supérieur à 2 [26]. Pour une telle configuration, il est souvent plus pertinent de retenir la plus petite des dimensions caractéristiques de la cuvette afin d'estimer le diamètre équivalent du feu.

3.1.4 CAS D'UN REJET EN CHAMP LIBRE

Lorsque la quantité de combustible rejetée est insuffisante pour occuper toute la surface de la cuvette de rétention ou si le rejet n'a pas lieu dans une cuvette, la nappe tend à occuper la surface maximale pouvant être couverte en fonction des conditions de rejet, des caractéristiques topographiques et météorologiques et des conditions d'inflammation. Il convient ainsi de distinguer le cas d'un épanchement continu ou instantané.

Dans le cas de la ruine totale d'un réservoir (épanchement instantané), la taille de la flaque augmente régulièrement jusqu'à atteindre un diamètre maximal, fonction notamment des caractéristiques de la substance, du terrain et des conditions ambiantes. Le diamètre de la flaque décroît ensuite au fur et à mesure de la combustion. Ce type d'accident survient lors de la rupture rapide d'un réservoir, laissant échapper la totalité de son contenu liquide en un temps très court. Dans une approche prudente, il peut être jugé pertinent de prendre le diamètre maximal d'étalement comme diamètre équivalent du feu.

Dans le cas d'une fuite continue pour laquelle l'inflammation survient dans les premiers instants du rejet, la taille de la flaque augmente jusqu'à l'équilibre entre le débit de combustion et le débit d'alimentation de la flaque en combustible. C'est le type d'accident qui se produit lors de la rupture d'une canalisation véhiculant un combustible liquide ou lors de la fissuration d'un réservoir. Le diamètre équivalent peut alors être défini à partir de la formule suivante :

$$D_{eq} = 2 \sqrt{\frac{Q_{epanch}}{\pi v}} \quad (2)$$

Avec Q_{epanch} : débit volumique de combustible (m^3/s)
 v : vitesse de régression (m/s)

Lorsque l'inflammation ne peut survenir avant la fin du rejet, le diamètre équivalent peut être défini comme le diamètre maximal d'étalement de la nappe, dans une approche prudente.

3.1.5 REMARQUES RELATIVES AU DIAMETRE EQUIVALENT

Pour le modèle de la flamme solide, la notion de diamètre équivalent intervient essentiellement dans les corrélations visant à déterminer la hauteur ou le pouvoir émissif de la flamme. Ainsi, il est possible d'assimiler la flamme à un parallélépipède rectangle ou à un cylindre pour la suite des calculs faisant intervenir le facteur de forme notamment.

Dans la suite du document, le diamètre équivalent sera noté D pour des raisons de commodité d'écriture.

3.2 HAUTEUR DE LA FLAMME

La hauteur de flamme associée à un feu de nappe peut être estimée grâce à des corrélations établies à partir d'essais ou de données disponibles dans la littérature. En règle générale, ces dernières font intervenir la notion de débit masse surfacique de combustion ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$), noté m'' .

3.2.1 DEBIT MASSIQUE SURFACIQUE DE COMBUSTION

Le débit masse de combustion par unité de surface, m'' , représente la quantité de combustible participant à l'incendie par unité de temps et de surface de combustible au sol.

Il peut ainsi être associé à la vitesse de combustion ou vitesse de régression linéaire de la nappe¹, v (m/s), qui est définie comme la vitesse de diminution de l'épaisseur d'une nappe soumise à un incendie. La formule suivante relie ces deux grandeurs physiques :

$$m'' = \rho \times v \quad (3)$$

où m'' : débit masse surfacique de combustion ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

ρ : masse volumique du combustible (kg/m^3)

v : vitesse de régression de la nappe (m/s)

Le débit masse surfacique de combustion dépend naturellement des propriétés physico-chimiques de la substance combustible, mais également du diamètre de la flaque et de l'alimentation du feu en oxygène.

De manière générale, le débit masse surfacique de combustion tend vers une valeur constante pour des diamètres de feux importants (Mudan, [5]). Ce constat est d'ailleurs corrélé par les travaux de Blinov et Kyudyakov [32] dont la Figure 1 est extraite. Cette dernière présente l'évolution de la vitesse de combustion en fonction du diamètre pour différents produits.

¹ La notion de vitesse de régression linéaire est plus particulièrement utilisée dans l'industrie pétrolière.

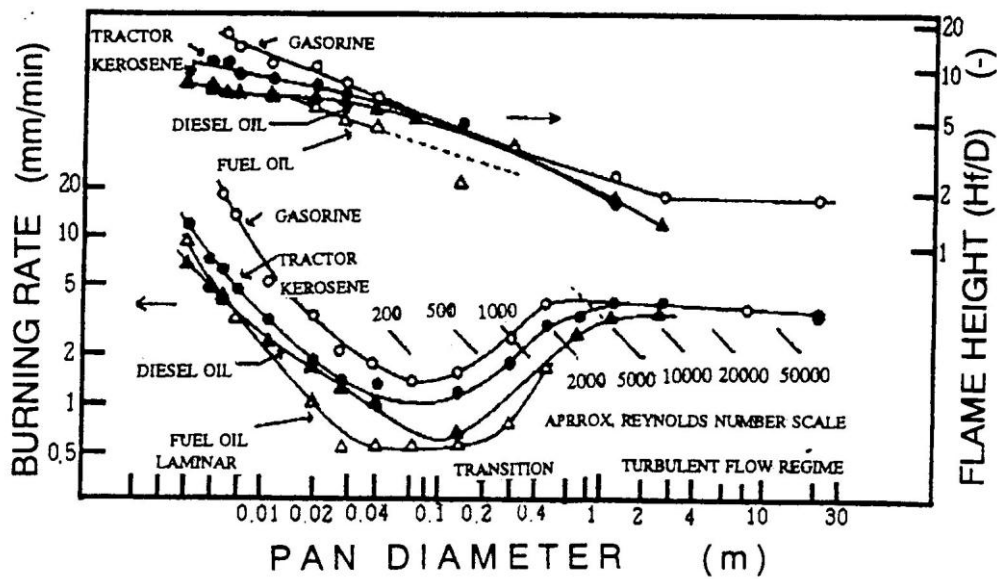


Figure 1 : Evolution de la vitesse de combustion en fonction du diamètre pour différents produits [32]

Afin d'estimer la valeur du débit masse surfacique de combustion, Babrauskas [1] propose la corrélation suivante :

$$m'' = m''_{\infty} (1 - \exp^{-k \cdot \beta \cdot D}) \quad (4)$$

avec m''_{∞} : débit masse surfacique pour une nappe de taille infinie ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

$k\beta$: coefficient d'extinction de la nappe (m^{-1})

D : diamètre équivalent de la nappe (m)

Cette formule est cohérente avec les observations expérimentales citées ci-dessus dans la mesure où pour de grands diamètres, le débit masse surfacique de combustion tend vers une valeur fixe, m''_{∞} .

Pour les alcools de faible masse moléculaire, Babrauskas propose d'utiliser la formule suivante :

$$m'' = m''_{\infty} \text{ pour } D \geq 0,2 \text{ m} \quad (5)$$

Cette relation a été obtenue à partir de feux de petite taille (inférieure à 1 m^2).

Son domaine de validité ainsi que celui des valeurs numériques proposées est donc relativement limité.

Les essais menés par le GESIP [31] tendent à montrer que, dans le cas de l'éthanol, l'approche de Babrauskas revient à sous-estimer fortement le débit masse surfacique de combustion. Les valeurs relevées lors de ces essais seraient de l'ordre de $60 \text{ g/m}^2\text{s}$ pour des feux de diamètre supérieur ou égal à 10 m .

En ce qui concerne les autres types de produits, la corrélation de Babrauskas donne un ordre de grandeur globalement correct pour le débit masse surfacique de combustion.

Elle nécessite toutefois de connaître les valeurs de m_{∞}'' et $(k\beta)$, déterminées à partir d'essais sur des bacs de différents diamètres et de techniques mathématiques d'ajustement de courbes.

Le Tableau 1, proposé par Babrauskas [1], présente une série de valeurs pour divers produits.

Ce tableau présente notamment des valeurs relatives aux gaz liquéfiables. Il peut paraître a priori surprenant de retrouver cette catégorie de combustibles dans le cadre de l'étude de feux de nappe, compte tenu de leur point d'ébullition particulièrement bas. Il convient cependant de souligner que les nappes de gaz liquéfiables correspondent bien à une réalité physique. Ainsi, Minzer et Eyre [4], entre autres, ont réalisé des essais sur des feux de nappe impliquant des GPL ou des GNL. En condition accidentelle, la formation de nappe de gaz liquéfiables peut être observée pour des rejets associés à des stockages cryogéniques ou dans des conditions de rejet particulières pour ce qui concerne des stockages sous pression.

Nature du combustible	Densité (kg/m ³)	Δh _v (kJ/kg)	Δh _c (MJ/kg)	m _∞ '' (kg/m ² .s)	kβ (m ⁻¹)	k (m ⁻¹)	T _f (K)	X _f ^(c) (-)
Gaz liquéfiables								
H ₂ liquide	70	442	120,0	0,017 (±0,001)	6,1 (±0,4)	-	1600	0,25
Gaz naturel liquéfié (fréquemment CH ₄)	415	619	50,0	0,078 (±0,018)	1,1 (±0,8)	0,5	1500	0,16-0,23
Gaz de pétrole liquéfié (fréquemment C ₃ H ₈)	585	426	46,0	0,099 (±0,009)	1,4 (±0,5)	0,4	-	0,26
Alcools								
Méthanol (CH ₃ OH)	796	1195	20,0	0,017 ???	a	-	1500	0,17-0,20
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	794	891	26,8	0,015 ???	a	0,4	1490	0,20
Combustibles organiques classiques								
Butane (C ₄ H ₁₀)	573	362	45,7	0,078 (±0,003)	2,7 (±0,3)	-	-	0,27-0,30
Benzène (C ₆ H ₆)	874	484	40,1	0,085 (±0,002)	2,7 (±0,3)	4,0	1460	0,14-0,38
Hexane (C ₆ H ₁₄)	650	433	44,7	0,074 (±0,005)	1,9 (±0,4)	-	1300	0,20-0,40
Heptane (C ₇ H ₁₆)	675	448	44,6	0,101 (±0,009)	1,1 (±0,3)	-	-	
Xylènes (C ₈ H ₁₀)	870	543	40,8	0,090 (±0,007)	1,4 (±0,3)	-	-	
Acétone (C ₃ H ₈ O)	791	668	25,8	0,041 (±0,003)	1,9 (±0,3)	0,8	-	
Dioxane (C ₄ H ₈ O ₂)	1035	552	26,2	0,018 ^b	5,4 ^b	-	-	
Diéthyl éther (C ₄ H ₁₀ O)	714	382	34,2	0,085 (±0,018)	0,7 (±0,3)	-	-	
Hydrocarbures								
Ether de pétrole	740	-	44,7	0,048 (±0,002)	3,6 (±0,4)	-	-	
Essence	740	330	43,7	0,055 (±0,002)	2,1 (±0,3)	2,0	1450	0,18
Kérosène	820	670	43,2	0,039 (±0,003)	3,5 (±0,8)	2,6	1480	0,35
JP-4	760	-	43,5	0,051 (±0,002)	3,6 (±0,1)	-	1250	
JP-5	810	700	43,0	0,054 (±0,002)	1,6 (±0,3)	0,5	1250	
Huile pour transformateur	760	-	46,4	0,039 ^b	0,7 ^b	-	1500	
Fioul lourd	940-1000	-	39,7	0,035 (±0,003)	1,7 (±0,6)	-	-	
Brut	830-880	-	42,5-42,7	0,022-0,045	2,8 (±0,4)	-	-	0,18

(a) – Valeur indépendante du diamètre pour un régime turbulent. Attention, Formule non adaptée aux alcools

(b) – Seulement deux données disponibles.

(c) – Pour des diamètres d'environ 1 m. Valeurs à minorer dans les cas de petits ou très grands diamètres.

Tableau 1 : Paramètres permettant d'estimer le débit masse surfacique de combustion (Données de Babrauskas [1]).

Il est clair que les valeurs de m_{∞}'' et $(k\beta)$ ne sont pas toujours disponibles pour un produit donné.

Cependant, conformément aux observations expérimentales relayées par la formule proposée par Babrauskas, il est raisonnable d'assimiler le débit masse surfacique de combustion au débit obtenu pour une nappe de taille infinie, pour des diamètres de nappe importants (supérieur à une vingtaine de mètres).

Ce dernier, noté m_{∞}'' , peut être estimé grâce à la corrélation proposée par Bürgess et al [3]

$$m_{\infty}'' = 10^{-3} \cdot \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v^*} \quad (6)$$

avec ΔH_c : chaleur de combustion par unité de masse (kJ/kg)

$$\Delta H_v^* = \Delta H_v + \int_{T_0}^{T_b} C_p dT \quad (\text{kJ/kg})$$

ΔH_v : chaleur de vaporisation au point d'ébullition (kJ/kg)

T_b : température d'ébullition (°K)

T_0 : température ambiante (°K)

C_p : chaleur spécifique (kJ/kg.K)

L'application de cette formule n'est pas toujours chose aisée compte tenu des paramètres d'entrée qu'elle nécessite. Les corrélations présentées ci-dessous sont essentiellement adaptées à des **corps liquides**.

3.2.2 REMARQUES RELATIVES A LA DETERMINATION DU DEBIT MASSIQUE SURFACIQUE DE COMBUSTION

Le débit masse surfacique de combustion est un paramètre fondamental pour la caractérisation de la flamme associée à un feu de nappe.

La corrélation de Babrauskas permet de donner un ordre de grandeur vraisemblable du débit masse surfacique de combustion pour la plupart des substances courantes. Elle nécessite cependant de connaître deux paramètres, m_{∞}'' et $(k\beta)$, déterminés expérimentalement. En ce sens, l'approche de Bürgess et al apparaît comme complémentaire puisqu'elle permet de déterminer le débit masse surfacique de combustion pour une nappe infinie.

Par ailleurs, les essais menés par le GESIP ont montré que la corrélation de Babrauskas n'était pas applicable aux cas de feux d'alcools de diamètre important, le débit massique surfacique de combustion étant alors fortement sous-estimé. Ce point pose clairement le problème de l'échelle à partir de laquelle les corrélations ont été établies. Aussi, il conviendra de rester prudent quant à l'exploitation directe de résultats expérimentaux obtenues à l'échelle du laboratoire et le cas échéant, de faire intervenir un facteur d'échelle afin d'ajuster les débits mesurés au cas à modéliser. Par ailleurs, des travaux menés par Chivas & al. [35] ont montré qu'une approche avec le calorimètre de Tewarson serait capable de prendre en compte ce facteur d'échelle entre l'échelle du laboratoire et la moyenne échelle en modulant soit la concentration d'oxygène soit le flux incident sur l'échantillon.

Le débit masse surfacique de combustion tel que défini au paragraphe 3.2.1, représente la quantité de combustible participant à l'incendie par unité de temps et de surface de combustible au sol. Ainsi, ce paramètre permet, dans une certaine mesure, d'estimer l'ordre de grandeur de la durée de l'incendie de manière simple :

$$T = \frac{M}{m'' \times S} \quad (7)$$

avec T : temps estimé de l'incendie,

M : masse totale de combustible participant à l'incendie (kg),

m'' : débit masse surfacique de combustion (kg/(m²s))

S : surface au sol de combustible (m²)

Bien entendu, il s'agit ici d'un calcul purement théorique, qui suppose le régime maximal de combustion rapidement établi. Cette approximation peut être raisonnable dans le cas d'un feu de nappe impliquant un combustible liquide.

3.3 CORRELATIONS POUR LE CALCUL DE LA HAUTEUR DE FLAMMES (H)

Les principales corrélations, développées à partir d'essais et décrites dans la littérature, sont présentées ci-dessous.

3.3.1 CORRELATION DE THOMAS [8]

Dans des situations sans vent, la hauteur de flammes d'un feu de nappe peut être calculée à partir de la corrélation de Thomas, obtenue à partir de feux de bûchers de bois. Elle reste valide pour les feux dont le rapport H/D reste compris entre 3 et 10. Cette corrélation est d'un usage répandu et est souvent extrapolée faute de mieux à des incendies d'hydrocarbures par exemple.

$$H = 42 \times D \cdot \left(\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0,61} \quad (8)$$

avec m'' : débit massique surfacique de combustion (kg/m².s)

ρ_a : masse volumique de l'air à température ambiante (kg/m³)

g : accélération gravitationnelle (= 9,81 m/s²)

Notons ici que le terme $\left(\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}}\right)$ peut également s'écrire comme suit :

$$\left(\frac{\rho_v \times v}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}}\right) = \frac{\rho_v}{\rho_a} \times \sqrt{Fr}$$

avec : $Fr = \frac{v^2}{g \cdot D}$, le nombre de Froude

v : vitesse moyenne de combustion du liquide (m/s),

ρ_v : masse volumique du combustible en phase liquide (kg/m³)

3.3.2 CORRELATION DE MOORHOUSE [12]

Cette corrélation a été établie, à partir d'essais réalisés, en l'absence de vent, sur des grands feux de gaz naturel liquéfié, dont le rapport H/D reste compris entre 1 et 3 :

$$H = 6,2 \times D \times \left(\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}}\right)^{0,254} \quad (9)$$

La remarque effectuée relativement à la corrélation de Thomas quant au nombre de Froude, reste ici encore valable.

3.3.3 CORRELATION DE STEWART [26]

Stewart propose la corrélation suivante tirée de données disponibles dans la littérature et d'essais sur des jets de gaz enflammés.

$$H = 14,73 \times D \times \left[\frac{\omega \cdot (r + \frac{\omega}{\rho_0})}{(1 - \omega)^5} \right] \cdot \left[\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right]^{0,4} \quad (10)$$

avec ω : expansion volumique inverse

r : rapport stœchiométrique air/combustible

ρ_0 : masse volumique du combustible (kg/m³)

Pour le méthane, pour une hauteur H comprise entre 1 et 3 m, Stewart obtient l'expression simplifiée suivante :

$$H = 31,4 \times D \times \left[\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right]^{0,4} \quad (11)$$

De la même manière que pour la corrélation de Thomas, le rapport H/D peut être directement relié au nombre de Froude, Fr .

3.3.4 CORRELATION DE ZUKOSKI [27]

Cette corrélation a été établie à partir de feux de gaz naturel de diamètre compris entre 10 et 50 cm. Afin d'estimer la hauteur de flamme associée à un feu de nappe, Zukoski introduit le paramètre Q^* , nombre sans dimension caractéristique de la flamme et défini comme suit :

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}} \quad (12)$$

avec : Q : puissance théorique libérée par la combustion (kW),

ρ_{∞} : masse volumique du gaz de référence, généralement l'air ambiant (kg/m^3),

C_p : chaleur spécifique du gaz de référence, généralement l'air ambiant ($\text{kJ}/(\text{kg.K})$),

T_{∞} : température absolue du gaz de référence, généralement l'air ambiant (K),

D : diamètre de la nappe (m),

g : accélération de la pesanteur (m/s^2).

La puissance théorique libérée par la combustion Q peut être estimée comme suit :

$$Q = \eta_{comb} \times m' \times A \times \Delta H_c \quad (13)$$

avec : η_{comb} : rendement de la combustion

A : aire de la base de la flamme (m^2),

ΔH_c : chaleur de combustion (kJ/kg).

Notons ici que le paramètre Q^* peut être relié au nombre de Froude, Fr .

Zukoski propose alors les formules suivantes pour l'estimation de la hauteur de flamme

$$H/D = 40 (Q^*)^2 \text{ pour } Q^* < 0,15$$

$$H/D = 3.3 (Q^*)^{2/3} \text{ pour } 0,15 < Q^* < 1$$

$$H/D = 3.3 (Q^*)^{2/5} \text{ pour } 1 < Q^* < 40$$

3.3.5 CORRELATION DE COX ET CHITTY [28]

Cette corrélation a été établie à partir d'essais sur des feux de gaz naturel de base carrée de 45 et 60 cm de diamètre. Les formules proposées par Cox et Chitty font intervenir le paramètre Q^* défini ci-dessus.

$$H/D = 15.1 (Q^*)^2 \text{ pour } 0,13 < Q^* < 0,28$$

$$H/D = 3.2 (Q^*)^2 \text{ pour } 0,28 < Q^* < 0,55$$

Notons ici que, comme pour la corrélation de Zukoski, le rapport H/D peut être relié au nombre de Froude, Fr .

3.3.6 CORRELATION DE HESKESTAD [9]

C'est une corrélation relativement récente (1984). Elle possède le domaine de validité le plus important que ce soit en terme de produit ou de type de feu.

$$H = \left(-1,02 + 15,6 N^{\frac{1}{5}} \right) \times D \quad (14)$$
$$N = \frac{Cp_0 T_0}{g \Delta H_c} \left(\frac{\eta_{comb} m'}{\rho_a} \right)^2 \frac{r_s^3}{D^5}$$
$$r_s = 137,87 \frac{x + y/4 + z/2}{12x + y + 16z}$$

avec Cp_0 : capacité calorifique du gaz de référence (air) (J/kg.K)

T_0 : température de l'air (K)

r_s : rapport stœchiométrique air/combustible

m' : débit de combustion (kg/s) ($m' = m'' \times$ Surface de combustible au sol)

Cette relation est valable pour des valeurs de N comprises entre 10^{-5} et 10^{+5} , pour un hydrocarbure liquide de formule brute $C_xH_yO_z$. Le rendement η_{comb} tient compte du fait qu'une partie du produit ne participe pas à la combustion. D'après des mesures réalisées par Tewarson, cité par Drysdale [10], ce rendement peut varier entre 0,35 et 0,99, avec une valeur moyenne de 0,7.

En revanche, Bagster et Pitblado [11] donnent une valeur plus élevée comprise entre 0,90 et 0,95. Il semble donc que le rendement ne peut pas être connu de façon précise, et que seul un ordre de grandeur est utilisable.

Heskestad propose une formule simplifiée qui constitue une approximation raisonnable de cette corrélation pour les combustibles les plus courants dans des conditions atmosphériques classiques.

$$H / D = -1,02 + 0,235 Q^{\frac{2}{5}} / D \quad (15)$$

avec Q : puissance dégagée par la combustion (kW) (voir Equation (13))

La corrélation d'Heskestad peut également être reliée au nombre de Froude, Fr .

3.3.7 GRANDS FEUX DE NAPPE

Des expériences réalisées sur des grands feux de nappe de kérosène, d'essence et de gazole (Hofmann [6]) ont montré que le rapport H/D tend vers la valeur constante égale à 1,7.

3.3.8 CONCLUSIONS SUR LE CALCUL DE LA HAUTEUR DE FLAMMES

En guise de premier constat, il convient de souligner qu'il existe de nombreuses corrélations visant à estimer la hauteur de flamme à partir des propriétés physico-

chimiques du combustible et du diamètre de nappe ; à ce titre, la liste présentée au paragraphe précédent ne se veut en aucun cas exhaustive.

Les corrélations relevées ci-avant nécessitent de connaître différents paramètres d'entrée tels que le débit masse surfacique de combustion, la puissance dégagée par l'incendie... Cependant, il a été relevé que l'ensemble de ces formules fait intervenir de manière plus ou moins directe le même paramètre, à savoir le nombre de Froude, noté *Fr*.

En définitive, ces corrélations se basent donc sur les mêmes hypothèses physiques et diffèrent principalement par :

- le degré d'information nécessaire à l'introduction des différents coefficients de la corrélation. A titre d'exemple, la corrélation d'Heskestad demande l'introduction de paramètres liés aux propriétés physico-chimiques du combustible tel que la chaleur de combustion, le rapport stœchiométrique de la réaction...
- la nature des produits combustibles pour lesquels les corrélations ont été établies,
- la plage de diamètre de nappe pour laquelle les corrélations ont été établies.

Il paraît ainsi difficile de juger de la pertinence relative de ces formules empiriques. Leur utilisation et leur extension à un domaine de validité plus large doivent être considérées de manière prudente et étudiée au cas par cas selon la famille de produit considéré.

En outre, la plupart de ces corrélations ont été établies pour des diamètres de feu restreints, de l'ordre de la dizaine ou de la vingtaine de mètres. En condition accidentelle, les diamètres de feu considérés peuvent être significativement plus importants et il existe en définitive peu de données relatives à des incendies de grande échelle. Dans de tels cas, un avis d'expert et les enseignements tirés du retour d'expérience sont souvent indispensables en vue d'estimer la hauteur de flamme associée à l'incendie considéré.

Rappelons enfin que pour ce qui concerne le modèle de flamme à deux zones décrit dans la partie commune du rapport, il convient naturellement de déterminer :

- la hauteur moyenne de la flamme,
- la hauteur de la zone de flamme dite « persistante ».

3.4 EFFETS DUS AU VENT

De manière schématique, les effets associés à l'action du vent sur le comportement de la flamme sont :

- l'inclinaison de la flamme par rapport à la verticale,
- la modification de la hauteur moyenne de flamme (selon les vitesses de vent),
- l'élargissement de la base des flammes dans la direction du vent.

Il est clair que l'estimation de ces phénomènes est complexe compte tenu notamment du caractère intermittent du vent à l'échelle locale. Dans le cadre de ce document, il a été choisi de présenter quelques corrélations visant à caractériser simplement ces phénomènes.

3.4.1 INCLINAISON DE LA FLAMME

L'inclinaison de la flamme sera représentée par l'angle θ , repéré par rapport à la verticale, conformément à la Figure 2.

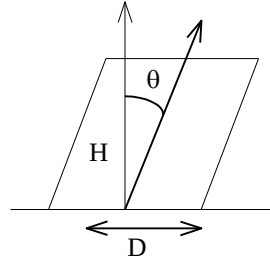


Figure 2 : Inclinaison de la flamme sous l'effet du vent

Cet angle peut être estimé à partir de la vitesse du vent grâce à la formule établie par l'American Gas Association (AGA), à partir de feux de gaz naturel [29]:

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{g m'' D}{\rho_a} \right)^{1/3}} \quad (16)$$

Si $u^* < 1$ alors $\cos \theta = 1$

Sinon

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\sqrt{u^*}} \quad (17)$$

avec : u_w : vitesse du vent mesurée à une hauteur de 1.6 m

Welker et Sliepcevitch [15] proposent une autre corrélation, établie à partir d'essais sur des feux de combustibles liquides dont le diamètre n'excédait pas 60 cm.

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = 3,3 \left[\frac{D u_w}{\nu} \right]^{0,07} \left[\frac{u_w^2}{g D} \right]^{0,8} \left[\frac{\rho_g}{\rho_a} \right]^{-0,6} \quad (18)$$

Avec : ν : viscosité cinématique de l'air ($\text{m}^2.\text{s}$)

ρ_g : masse volumique des vapeurs de combustibles à la température d'ébullition (pression atmosphérique) (kg/m^3)

D'après ses travaux sur des feux de produits cellulosiques, Thomas [8] propose la corrélation suivante pour le calcul de l'angle d'inclinaison:

$$\cos \theta = 0,7 \left[\frac{u_w}{\left(\frac{g m'' D}{\rho_a} \right)^{1/3}} \right]^{-0,49} \quad (19)$$

3.4.2 DIMINUTION DE LA HAUTEUR MOYENNE DE FLAMME

Les corrélations disponibles traduisent le fait que la hauteur moyenne de flamme est inversement proportionnelle à la vitesse du vent.

Ainsi, Thomas propose la corrélation suivante [14] :

$$H = 55 \times D \times \left[\frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{gD}} \right]^{0,67} \times u^{*-0,21} \quad (20)$$

Avec : $u^* = u_w / u_c$: vitesse adimensionnelle du vent

u_w : vitesse du vent (m/s)

$u_c = \left[gD \frac{m''}{\rho_a} \right]^{1/3}$: vitesse caractéristique

si $u < u_c$, $u^* = 1$

De même, les résultats expérimentaux sur LNG obtenus par Moorhouse [12] ont montré un comportement physique semblable à celui fourni par la corrélation de Thomas. Il propose ainsi de « corriger » sa corrélation sur la hauteur de flammes en introduisant un facteur supplémentaire dû au vent :

$$H = 6,2 \times D \times [m''_{ad}]^{0,254} \times [u_{10}^*]^{-0,044} \quad (21)$$

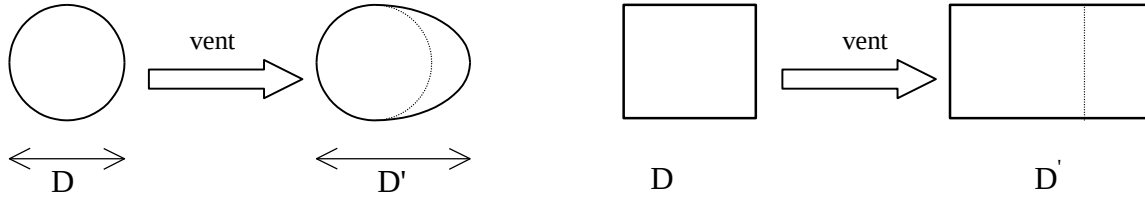
$$\text{et } m''_{ad} = \frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{gD}}$$

Avec u_{10}^* : vitesse adimensionnelle du vent à 10 m d'altitude

Suite à des mesures effectuées, il semble qu'en présence de vent la corrélation de Thomas donne des résultats légèrement meilleurs que celle de Moorhouse.

3.4.3 ELARGISSEMENT DE LA BASE DE LA FLAMME

Sous l'effet du vent, la base de la flamme a tendance à se déformer dans la direction imposée par le vent. Cet effet est représenté de manière tout à fait schématique dans la Figure 3.



Cas d'une nappe circulaire

Cas d'une nappe rectangulaire

Figure 3 : Elargissement de la base de la flamme sous l'effet du vent

Ce phénomène a été évalué par Welker et Sliepcevich [15]. Ainsi, le diamètre allongé de la base de la flamme, D' , est donné par :

$$D' = 2,1 \times D \times \left[\frac{\rho_g}{\rho_a} \right]^{0,48} Fr^{0,21} \quad (22)$$

avec Fr : nombre de Froude défini en fonction de la vitesse du vent, u (m/s)

$$Fr = \frac{u^2}{g D}$$

ρ_g : masse volumique des vapeurs de combustibles (kg/m³)

Moorhouse a proposé une autre corrélation basée sur des feux de LNG soumis à plusieurs vitesses de vent [12] :

$$D' = 1,5 \times D \times Fr_{10}^{0,069} \quad (23)$$

avec $Fr_{10} = u_{10}^2 / D.g$: nombre de Froude indice 10

u_{10} : vitesse du vent à une hauteur de 10 m

Plus récemment, Mudan [5] en a généralisé l'expression à tous les hydrocarbures liquides.

$$D' = 1,25 \times D \times \left[\frac{\rho_g}{\rho_a} \right]^{0,48} Fr_{10}^{0,069} \quad (24)$$

3.4.4 CONCLUSIONS RELATIVES AUX EFFETS DUS AU VENT

Les effets sur la flamme dus au vent constituent un phénomène souvent difficile à estimer.

D'un point de vue pratique, il convient ainsi de relever les points suivants :

- Lorsque la vitesse du vent est très grande, la flamme a tendance à se fractionner et il y a lieu de faire intervenir un coefficient d'intermittence. Ce phénomène s'ajoute au caractère intermittent de la flamme, observé même en condition de vent faible.
- La convection induite par le vent constitue un facteur de dispersion de la température. Cette dispersion est difficilement appréciable simplement.
- Lorsque la vitesse du vent est faible et à grande distance du feu, l'inclinaison de la flamme a vraisemblablement une incidence très relative sur les flux radiatifs perçus au niveau du sol.
- Le vent perturbe non seulement la géométrie de la flamme mais également son comportement radiatif, en modifiant l'allure du panache des fumées. Le rabattement des fumées peut ainsi augmenter l'effet d'écran au rayonnement de la flamme.
- Le vent en lui-même est la plupart du temps un phénomène intermittent.

En définitive, la détermination des effets dus au vent sur le comportement de la flamme ne s'avère pas nécessaire pour une cible très éloignée de l'incendie, ce qui est généralement le cas lorsqu'il s'agit de déterminer des effets sur l'homme. Cependant, il convient de garder en mémoire entre autres les éléments suivants :

- L'inclinaison et l'élargissement de la base de la flamme peuvent constituer un facteur favorable en terme d'effet domino sur des équipements à proximité du feu.
- Le vent est un vecteur possible de la propagation de l'incendie (ex. transport de brandons incendiaires),
- Il y a lieu de relativiser les résultats obtenus dans le champ proche pour des effets strictement radiatifs.

3.5 POUVOIR EMISSIF DE LA FLAMME

Le pouvoir émissif de la flamme correspond à la quantité d'énergie rayonnée, par unité de surface de flamme et de temps. Dans la suite du document, ce paramètre sera noté ϕ_0 et exprimé en kW/m².

3.5.1 IMPORTANCE DE LA FRACTION RADIATIVE

Le pouvoir émissif 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.

$$\phi_0 = \frac{\eta_r \cdot \phi_{comb}}{S_f} = \frac{\eta_r \cdot m'' \cdot A_{nappe} \cdot \Delta H_c}{S_f} \quad (25)$$

avec η_r : fraction radiative

S_f : surface de la flamme (m²)

ϕ_{comb} : puissance thermique libérée par la combustion (kW)

m'' : débit masse de combustion (kg/s)

A_{nappe} : Surface de la nappe au sol (m²)

ΔH_c : chaleur massique de combustion (kJ/kg)

La fraction radiative, η_r , traduit la perte d'une partie de la chaleur de la flamme par rayonnement. Il est clair que la fraction radiative est en général difficile à estimer et ce d'autant plus qu'elle varie en fonction du type de combustible et du diamètre de nappe considéré.

La Figure 4 présentée ci-dessous est extraite des travaux réalisés par Koseki [33] et décrit l'évolution de la fraction radiative en fonction du diamètre de nappe pour différents produits.

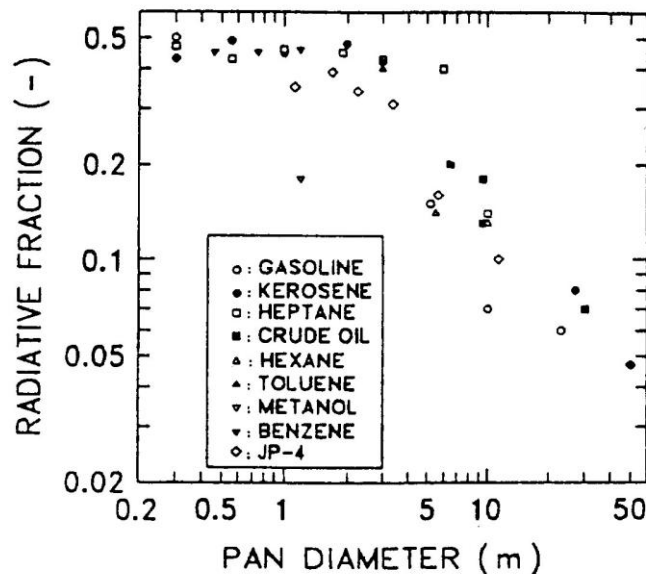


Figure 4 : Fraction radiative en fonction du diamètre de nappe (Koseki, [33])

La décroissance de la fraction radiative pour des hydrocarbures générant beaucoup de suies (kérosène, heptane..) peut s'expliquer par l'effet de masque du rayonnement par les fumées, dont la production augmente avec le diamètre du feu.

Concernant des feux de produits générant au contraire peu de suies comme les alcools, Koseki observe que ces derniers sont moins rayonnants pour de petits diamètres et suppose que la fraction radiative associée est peu influencée par le diamètre de la flamme.

D'une manière générale, ces essais montrent que la fraction radiative associée à des feux de nappe de grande taille est relativement faible (inférieure à 10 %).

Les difficultés à déterminer précisément la fraction radiative peuvent rendre l'application de l'approche énergétique (équation **(25)**) problématique.

Néanmoins, cette démarche indique que le pouvoir émissif de la flamme et la hauteur de flamme sont liés par la fraction radiative. Surestimer dans le même temps ces deux paramètres peut revenir à considérer une énergie thermique dont l'incendie ne dispose pas physiquement.

Aussi, les efforts lors de la modélisation doivent porter **sur l'estimation du couple (Pouvoir émissif ; Hauteur de flamme)** et non sur chacun de ces paramètres pris séparément.

Afin d'illustrer l'importance de la fraction radiative dans le modèle de la flamme solide, le graphique suivant présente les distances d'effets à 3 et 5 kW/m² obtenues pour des couples (pouvoir émissif ; hauteur de flamme) correspondant à une même fraction radiative².

Ces dernières sont globalement du même ordre de grandeur pour peu que les couples considérés soient réalistes.

² Les valeurs numériques figurant dans le graphique sont données à titre purement illustratif, le principal résultat étant l'allure générale de la courbe.

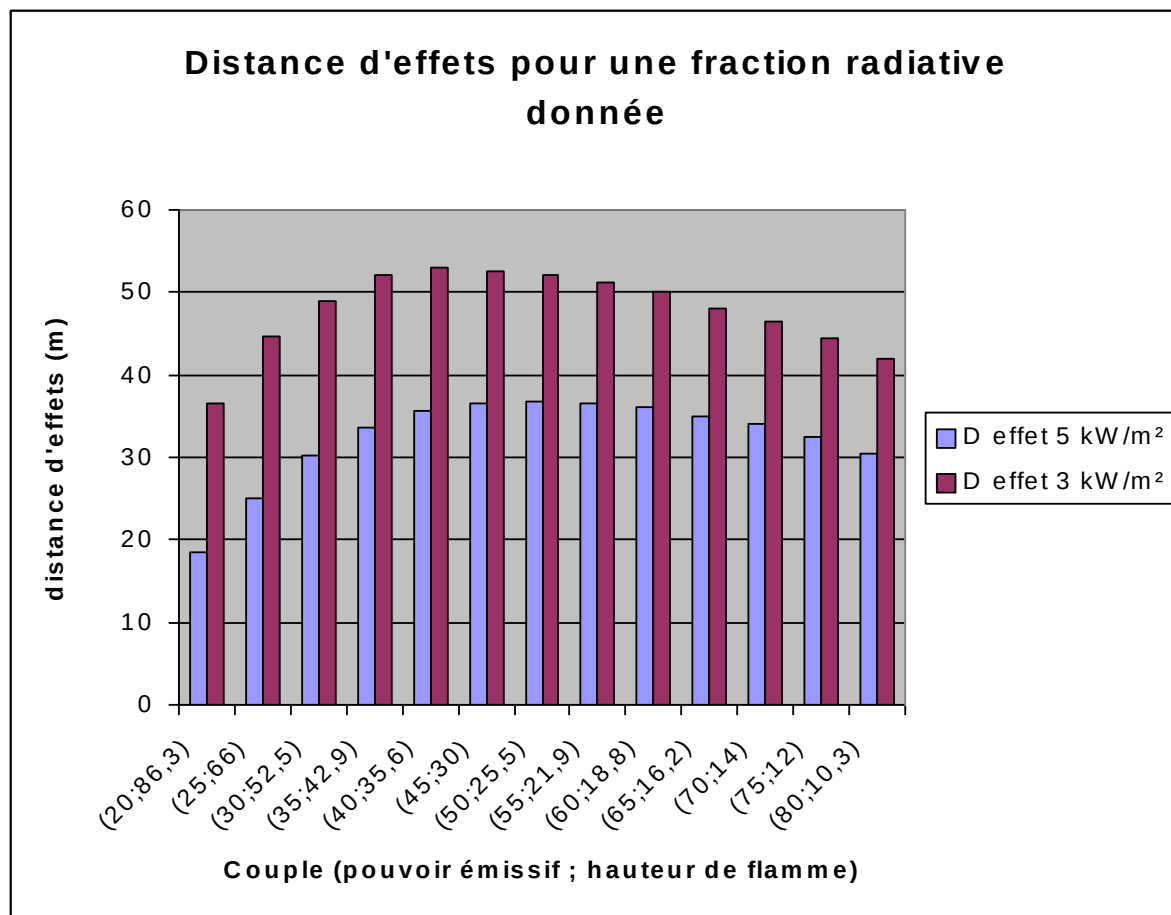


Figure 5 : Distances d'effets pour une fraction radiative donnée

En conclusion, il est généralement pertinent de s'assurer que les valeurs de pouvoir émissif et de hauteur de flamme retenues sont cohérentes avec un ordre de grandeur vraisemblable de la fraction radiative.

3.5.2 ESTIMATION DU POUVOIR EMISSIF

Le pouvoir émissif de la flamme peut être déduit de la loi de Stephan-Boltzman grâce à l'équation ci-dessous :

$$\phi_0 = \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (26)$$

- avec ϕ_0 : pouvoir émissif de la flamme (kW/m²)
 σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
 T_f : température de flamme (K)
 T_a : température de l'ambiance (K)
 ε : émissivité de la flamme

En pratique, cette formule s'avère souvent difficile à appliquer dans la mesure où :

- la température de la flamme est généralement difficile à déterminer, si ce n'est à l'aide de modèles performants,
- la détermination de l'émissivité suppose de connaître la composition de la flamme (suies, dioxyde de carbone, vapeur d'eau...),
- les fumées issues de la combustion peuvent jouer un rôle d'écran, absorbant une partie du rayonnement de la flamme vers l'extérieur. A noter que ces fumées peuvent dans certains cas recouvrir la quasi-totalité de la flamme.

Il existe cependant des modèles thermochimiques relativement élaborés, permettant d'estimer ces différents paramètres. L'objet du présent rapport étant de présenter de méthodes de calcul simples, ces modèles ne seront pas examinés plus avant.

En règle générale, il peut être plus aisé de déterminer directement la densité de flux rayonné par les flammes (pouvoir émissif) pour effectuer le calcul des radiations reçues, en s'affranchissant de la détermination de l'émissivité et de la température de flamme.

Des résultats expérimentaux relatifs au pouvoir émissif de feux de nappe sont disponibles dans la littérature pour les produits les plus courants.

Le tableau suivant propose une synthèse de quelques résultats provenant de différentes sources.

Produits	Diamètre de nappe (m)	Pouvoir émissif (kW/m²)		
		Tewarson [34]	Yumoto [33]	Minzer / Eyre [4]
GNL (sur terre)	1-3	-	76	-
	20	-	-	150-220
GPL (sur terre)	20	-	-	50-60
Propane	1-3	-	74	-
Butane	1-3	-	83	-
Essence	1,5-223	30	-	-
	1-3	-	58	-
Kérosène	30-80	29	-	-
	1-3	-	50	-
	20	-	-	35
Hexane	0,75-10	37	-	-
	1-3	-	85	-
Heptane	1,2-10	32-37	-	-
	1-3	-	90	-
Diesel	1-3	-	42	-
Fuel lourd	2,6-23	29	-	-
Dodécane	0,94	30	-	-
Benzène	0,75-6	44	-	-
	1-3	-	62	-
Toluène	1-3	-	86	-
Methanol	1,2-2,4	22-27	-	-
	1-3	-	10	-
Ethanol	1-3	-	12	-
Acetone	1,52	24	-	-

Figure 6 : Mesures expérimentales du pouvoir émissif

En complément, citons les résultats de l'opération Proserpine [16] menée sur un feu de pétrole brut de Parentis d'une surface de 2000 m². Le CEA/CESTA proposait de retenir à la suite de ces essais, un pouvoir émissif de 30 kW/m².

La relative disparité de certains résultats pose clairement le problème de l'exploitation directe de mesures expérimentales pour la modélisation de situations accidentelles.

D'une part, le pouvoir émissif étant, entre autres fonction du diamètre du feu, il convient de s'assurer que la valeur mesurée expérimentalement correspond bien en terme d'échelle au scénario à modéliser. D'autre part, il est souvent indispensable de connaître le protocole mis en place (conditions d'essais, dispositifs de mesures..) afin de juger de la pertinence de ces résultats vis-à-vis d'une situation accidentelle.

En conclusion, ces résultats constituent une source précieuse d'informations, dont l'exploitation doit cependant être faite avec prudence. En ce sens, un avis d'expert est souvent nécessaire en vue d'utiliser ces valeurs expérimentales dans le cadre de modélisation d'accidents.

Afin d'estimer directement le pouvoir émissif associé à des feux produisant des quantités importantes de suies, Mudan et Croce [17] proposent d'utiliser la formule suivante :

$$\phi_0 = \phi_{\max} \times e^{(-SD)} + \phi_{\text{fumées}} \times (1 - e^{(-SD)}) \quad (27)$$

avec $\phi_{\max}$: pouvoir émissif maximum des parties lumineuses de la flamme (140 kW/m²),

$\phi_{\text{fumées}}$: pouvoir émissif des fumées (20 kW/m²),

S : coefficient expérimental égal à 0,12 m⁻¹.

Une telle corrélation présente l'avantage de prendre en compte l'influence du diamètre du feu sur le comportement thermique de la flamme. En effet, pour les feux d'hydrocarbures générant beaucoup de suies, le pouvoir émissif peut être réduit par l'effet d'écran joué par les fumées. Un observateur est ainsi soumis de manière intermittente au rayonnement des parties lumineuses visibles de la flamme et au rayonnement des fumées. Ainsi, le terme e^{-SD} est représentatif de la fraction surfacique de la flamme non recouverte de fumées. Cette corrélation établie notamment à partir de feux de kérosène, GPL... n'est adaptée qu'à des feux produisant des suies en quantité significative.

3.5.3 CONCLUSIONS RELATIVES A LA DETERMINATION DU POUVOIR EMISSIF DE LA FLAMME

La détermination du pouvoir émissif est bien entendu une étape primordiale pour l'estimation de distances d'effets, dans la mesure où le flux reçu par une cible est supposé directement proportionnel à la puissance rayonnée par la surface de flamme, dans le modèle de la flamme solide.

En pratique, ce paramètre est généralement difficile à estimer finement. Il dépend en outre du type de combustible et de la surface de la nappe au sol. Cette remarque met en lumière les précautions à prendre pour ce qui concerne l'exploitation de résultats expérimentaux. Il est ainsi généralement indispensable de s'assurer que ces valeurs ont été obtenues pour des conditions similaires aux

conditions accidentelles à modéliser. Dans le cas contraire, un avis d'expert s'avère souvent nécessaire.

La corrélation proposée par Mudan et Croce, permet, dans une certaine mesure, de prendre en compte l'influence du diamètre de la nappe, sur le pouvoir émissif, pour des feux produisant des quantités significatives de suies (hydrocarbures lourds, GPL...). Pour ces composés, elle donne généralement un ordre de grandeur plausible de la puissance rayonnée par la flamme.

Par ailleurs, il est généralement pertinent de s'assurer que les valeurs retenues pour le pouvoir émissif de la flamme et la hauteur de flamme sont compatibles avec une fraction radiative « vraisemblable »³.

³ Pour des produits classiques et des nappes de diamètre supérieur à la dizaine de mètres, les mesures expérimentales donnent des valeurs maximales autour de 10 %.

4. OUTILS DE CALCUL DEVELOPPES PAR L'INERIS

Dans le présent paragraphe, il est proposé de présenter dans ses grandes lignes l'outil de modélisation FNAP conçu et utilisé par l'INERIS pour ses propres modélisations. Dans la suite, sont présentés son champ d'application ainsi que les modèles théoriques auxquels il fait appel. Un second outil proposé par le GTDLI et développé par l'INERIS est présenté également dans ces grandes lignes.

4.1 OUTIL FNAP

4.1.1 CHAMP D'APPLICATION DE FNAP

L'INERIS a développé en 1994 le logiciel FNAP pour un usage interne. Cet outil de modélisation a été conçu afin de déterminer la densité de flux thermique radiatif reçue par une cible, exposée au rayonnement d'un feu de nappe. La cible considérée est plane et de surface élémentaire. Le feu de nappe peut quant à lui avoir une base circulaire ou rectangulaire, les flammes étant toujours supposées verticales.

Le logiciel FNAP met en œuvre le modèle de la flamme solide à une zone décrit au § 5.2.1.1 de la partie commune. Ainsi, de manière très schématique, le logiciel FNAP comporte deux parties successives :

- *Modèle de flamme* : détermination des caractéristiques géométriques et énergétiques de la flamme,
- *Modèle de transfert thermique* : calcul du transfert de la chaleur par rayonnement à partir de la flamme caractérisée à l'étape précédente.

Afin de déterminer la hauteur et le pouvoir émissif de la flamme, le modèle de flamme s'appuie sur des corrélations établies essentiellement à partir de feux d'hydrocarbures et de produits cellulosiques, de diamètre restreint. Son utilisation dans le cas de combustibles de nature différente ou pour des surfaces de flamme au sol importantes doit donc être faite de manière prudente.

A l'inverse, l'utilisation du modèle de transfert thermique est justifiée dès lors qu'il s'agit d'estimer l'impact radiatif d'une flamme pérenne, de géométrie constante dans l'espace et dans le temps.

Ainsi, pour peu que les caractéristiques de la flamme puissent être déterminées directement par l'utilisateur (i.e en se passant du modèle de flamme), le logiciel FNAP peut être utilisé pour évaluer uniquement la décroissance du flux rayonné par la flamme en fonction de l'éloignement de la cible.

La principale difficulté associée à la modélisation des effets thermiques radiatifs d'un feu de nappe est donc bel et bien la description des paramètres de la flamme.

4.1.2 MODELES UTILISES PAR FNAP

L'objet de ce paragraphe n'est pas de décrire les diverses corrélations utilisées dans FNAP, présentées ci-avant dans le rapport. Les numéros des paragraphes se rapportant à ces formules seront toutefois rappelés pour plus de clarté.

4.1.2.1 DIAMETRE EQUIVALENT

Dans le cas d'un feu de nappe dans une cuvette circulaire, il convient simplement de s'assurer que la cuvette de rétention est effectivement dimensionnée afin de recueillir la quantité rejetée et d'assurer cette fonction pendant toute la durée de l'incendie. Le diamètre équivalent peut alors être assimilé au diamètre de la cuvette.

Dans le cas d'une cuvette rectangulaire, le calcul d'un diamètre équivalent peut être effectué selon la formule présentée au paragraphe 3.1.1 équation n°(1) page10.

4.1.2.2 DEBIT MASSE SURFACIQUE DE COMBUSTION

FNAP propose deux approches pour la détermination du débit masse surfacique :

- lorsque la vitesse de régression linéaire est connue, il suffit d'entrer la valeur en question ainsi que la masse volumique du combustible afin d'estimer le débit masse surfacique de combustion.
- dans le cas contraire, FNAP permet de calculer le débit massique de combustion à partir de la formule de BABRAUSKAS.

Ces approches sont présentées au paragraphe 3.2.1. Par ailleurs, l'approche de Bürgess et al. peut le cas échéant être mise en œuvre en complément de ces méthodes. Elle n'a cependant pas été introduite dans le logiciel FNAP.

4.1.2.3 HAUTEUR DES FLAMMES

Parmi les corrélations disponibles dans la littérature pour le calcul de la hauteur de flammes, FNAP permet à l'utilisateur de retenir au choix celles de THOMAS, MOORHOUSE ou HESKESTAD (voir paragraphe 3.2). La valeur calculée pour les grands feux (soit 1,7 fois le diamètre équivalent de la nappe) est également systématiquement proposée.

Le logiciel affiche les valeurs des hauteurs de flammes correspondant aux corrélations demandées. L'utilisateur possède alors l'opportunité de retenir la hauteur jugée la plus pertinente selon le cas étudié et vérifie que les valeurs déterminées sont cohérentes avec le domaine de validité de ces corrélations.

4.1.2.4 POUVOIR EMISSIF DES FLAMMES

Dans le logiciel FNAP, le pouvoir émissif peut être calculé selon la formule de MUDAN et CROCE. Par ailleurs, les résultats des essais PROSERPINE ($\varphi_0=30 \text{ kW/m}^2$) sont systématiquement rappelés (voir paragraphe 3.5.2).

L'utilisateur a également l'opportunité de retenir les valeurs proposées par le logiciel ou de définir lui-même la valeur d'entrée sur la base de calculs différents ou de valeurs tirées de l'expérimentation.

4.1.2.5 TRANSMISSIVITE ATMOSPHERIQUE

Il est possible avec le logiciel FNAP :

- de négliger l'atténuation atmosphérique ;
- d'utiliser la formule de LANNOY, à partir de l'humidité absolue de l'air ambiant en g/kg d'air sec ;
- d'utiliser la formule de BRZUSTOWSKI et SOMMER, si le taux d'humidité relative de l'air ambiant est connu.

Il convient de noter à ce stade que cette dernière formule est plus simple d'utilisation. Par ailleurs, compte tenu des flux thermiques radiatifs effectivement observés lors d'accidents ou d'essais (souvent inférieurs à ceux prédits par les calculs), il ne semble pas déraisonnable de considérer un coefficient d'absorption atmosphérique.

4.1.2.6 POSITIONNEMENT DE LA CIBLE

Ce paragraphe ne traite plus de corrélations ou d'outils théoriques disponibles lors de l'utilisation de FNAP, mais des possibilités d'exposition aux rayonnements thermiques pouvant être étudiées.

Selon la configuration géométrique du feu (rectangulaire ou circulaire), la cible peut être exposée :

- à au plus deux murs d'une même flamme dans le cas d'une nappe rectangulaire,
- à un demi-cylindre droit de flamme dans le cas d'une nappe circulaire.

Les autres cas ne sont pas considérés par FNAP ; par exemple, il est impossible de calculer le flux reçu à la verticale du feu, où il est bien évident que la part prise par la convection dans les échanges de chaleur rend le calcul purement radiatif incomplet.

Pour un feu rectangulaire, FNAP permet de calculer le flux reçu en des points situés sur un plan horizontal. Pour un feu circulaire, et compte tenu de la symétrie du problème, FNAP permet le calcul de la densité de flux reçue en différents points situés dans le même plan vertical contenant l'axe du feu.

Cas particulier : FNAP peut prendre en compte la présence d'un obstacle opaque situé entre le feu et la cible et masquant partiellement les flammes. Le masque ainsi pris en compte par FNAP est considéré comme un corps noir, absorbant tout le rayonnement qu'il reçoit sans rien réémettre. FNAP calcule alors l'ombre portée sur les flammes par l'obstacle vu depuis la cible, les facteurs de forme partiels correspondants, et le facteur de forme global par sommation, avant de définir le flux thermique reçu par rayonnement par la cible.

4.1.3 MISE EN ŒUVRE DE L'OUTIL : COMPARAISON AVEC DES VALEURS ISSUES DE L'EXPERIMENTATION

Les valeurs expérimentales considérées ici sont issues d'un essai concernant un feu d'éthanol réalisé par l'INERIS en 1994. L'objectif de l'essai en question était de tester l'efficacité d'une extinction mise en œuvre par déversoir en application douce d'une part et en application indirecte (lance + obstacle) d'autre part. Ces essais d'extinction ont été accompagnés de campagnes de mesures thermiques (thermocouples, fluxmètres, thermomètres, etc) grâce à l'installation de capteurs (cf. figure ci-après). Le dispositif expérimental mis en place était une fosse carrée de 50 m² équipée en son centre d'un bidon de deux mètres de diamètre. La quantité d'éthanol déversée était de 5 000 litres.

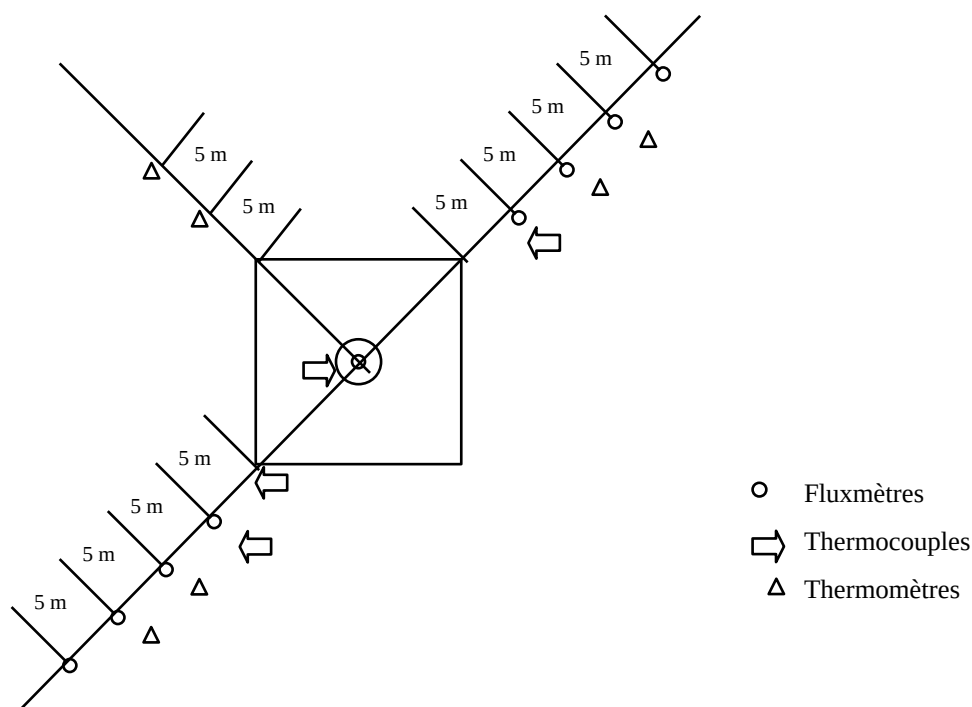


Figure 7 : Schéma de la zone d'essai et implantation des points de mesure

Les mesures de flux, ont été effectuées à 1,5 – 2 mètres de hauteur. Le tableau répertorie les valeurs mesurées au cours de trois essais menés successivement :

Fluxmètre Placé à	Flux mesurés lors de l'essai (kW/m ²)		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3
20 m	1,47	1,03	0,52
15 m	2,06	1,55	0,84
10 m	3,94	2,92	1,74
5 m	8,93	6,67	3,95
5 m	5,28	11,19	10,54
10 m	2,19	4,13	3,46

Fluxmètre Placé à	Flux mesurés lors de l'essai (kW/m ²)		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3
15 m	1,21	2,10	1,60
20 m	0,73	1,24	0,86
Temps de combustion	1 min 15 s	2 min 50 s	3 min 10 s

A noter que, du fait des conditions météorologiques dont l'influence est difficile à quantifier, la dispersion des mesures est relativement importante.

En définitive, les flux moyens suivants ont été déduits des mesures effectuées à différentes distances des coins de la cuvette :

- à 20 m, 1 kW/m²,
- à 15 m, 1,6 kW/m²,
- à 10 m, 3,1 kW/m²,
- à 5 m, 7,8 kW/m².

Pour les calculs, le débit masse surfacique de combustion a été fixé à 50 g/m²s conformément aux résultats obtenues par le GESIP [31].

La hauteur de flamme a été estimée grâce à la corrélation d'Heskestad et ainsi fixée à 12 m. Le rapport hauteur de flamme / diamètre est alors bien dans le domaine de validité de la corrélation ($0.5 < H/D < 100$). De plus, les corrélations de Thomas et Moorhouse donnent des ordres de grandeur similaires pour la hauteur de flamme.

Il existe peu de données pertinentes permettant d'estimer le flux rayonné par un feu d'éthanol de 50 m². Le GESIP [31] note cependant que le pouvoir émissif d'un tel feu est environ moitié moindre que celui d'un feu d'essence pour des nappes de petit diamètre et tend vers le pouvoir émissif de l'essence, le diamètre de nappe allant croissant. Parallèlement, Koseki [33] observe que la fraction radiative d'un feu d'alcool, comprise entre 10 et 20 % semble peu influencée par le diamètre de la nappe, bien qu'il n'existe pas assez de données expérimentales pour estimer la part rayonnée par des feux d'alcool de grand diamètre.

A partir de ces considérations, le pouvoir émissif du feu d'éthanol considéré pour cette application a été estimé à 25 kW/m². Cette valeur correspond à une fraction radiative de l'ordre de 16 %, compatible en ordre de grandeur avec les observations de Koseki [33] et Babrauskas [1].

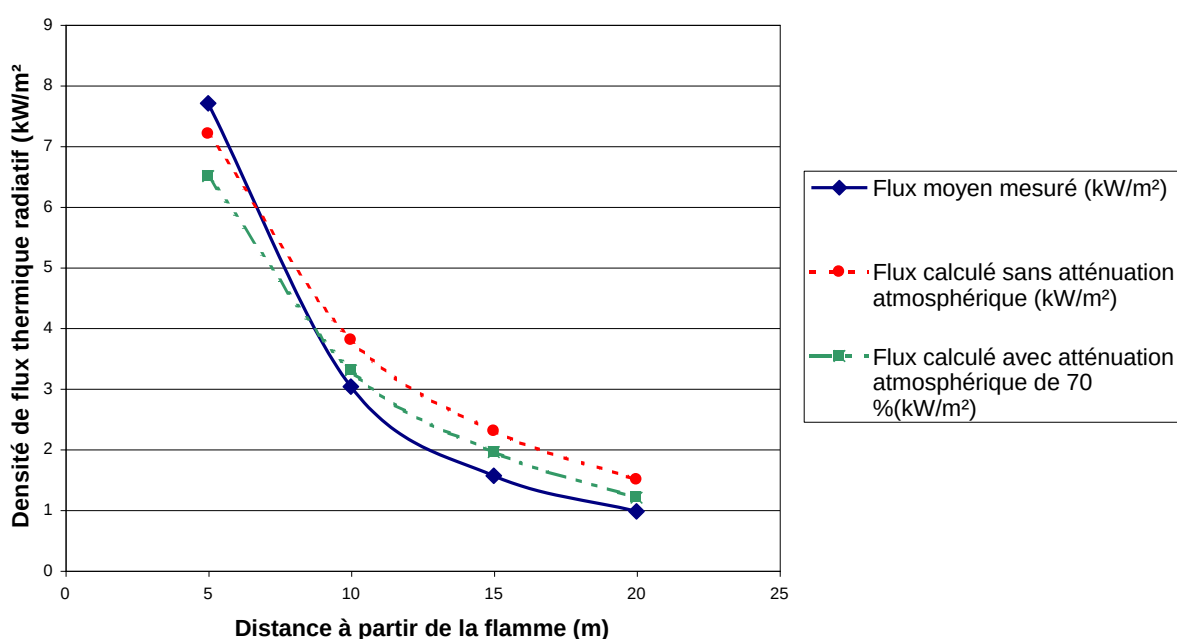
Les résultats de calcul obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous pour les deux cas de figure suivants :

- en négligeant l'atténuation atmosphérique (calcul majorant),
- en considérant une humidité relative moyenne de l'air ambiant de 70% (corrélation de Brzustowski et Sommer).

Distance de la cible	Flux moyen mesuré (kW/m ²)	Flux calculé sans atténuation atmosphérique (kW/m ²)	Flux calculé pour 70% d'humidité relative (kW/m ²)
20 m	1	1,5	1,2
15 m	1,6	2,3	1,95
10 m	3,1	3,8	3,3
5 m	7,8	7,2	6,5

Le graphique qui suit permet de visualiser et de comparer d'une part la valeur moyenne correspondant à l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, et d'autre part les résultats obtenus par le calcul avec FNAP, selon les deux conditions atmosphériques étudiées.

Comparaison des résultats expérimentaux et des calculs FNAP



Les valeurs calculées sont, à l'exception d'un point en champ proche, supérieures à la moyenne des valeurs expérimentales. Ceci traduit la démarche a priori majorante mise en œuvre par FNAP par rapport à la réalité du feu de nappe. Les résultats obtenus par le calcul restent toutefois d'un ordre de grandeur tout à fait comparable aux valeurs expérimentales.

4.2 OUTIL DE CALCUL DE LA CIRCULAIRE DPPR/SEI2/AL- 06- 357 DU 31/01/07

Dans le cadre des travaux menés par le GTDLI⁴, les parties prenantes se sont entendues sur la caractérisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbures liquides de catégorie B et C ainsi que d'alcool.

L'ensemble de ces travaux fait l'objet d'une note technique explicitant en détail les modalités ayant permis d'aboutir à ce consensus et qui est annexée à la Circulaire DPPR/SEI2/AL- 06- 357 du 31/01/07 relative aux études de dangers des dépôts de liquides inflammables (Texte abrogé par la circulaire du 10 mai 2010).

Sur la base du travail de comparaison effectué dans cette note technique et des réunions organisées entre l'administration, les experts (INERIS et Technip) et la profession, les hypothèses et corrélations suivantes ont été proposées pour évaluer les distances d'effets associées à un flux thermique.

Ces propositions et synthèses des travaux du GTDLI ont donné lieu à une feuille de calcul développée par l'INERIS et annexée à la Circulaire DPPR/SEI2/AL- 06- 357 du 31/01/07 relative aux études de dangers des dépôts de liquides inflammables.

4.2.1 HYPOTHESES ET CORRELATIONS DU MODELE DE LA CIRCULAIRE

Tous les paramètres sont fixés dans le modèle excepté les dimensions de la nappe en feu. Ce paragraphe présente le squelette de l'outil de calcul.

– **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 l'éthanol, le débit de combustion est pris égal à 0,025 kg/m² s.

– **Corrélations du modèle :**

• **Diamètre équivalent :**

Pour un feu de nappe circulaire :

- $Deq = \text{Diamètre de la nappe en feu}$

⁴ Le GTDLI est le groupe de travail sectoriel « dépôts de liquides inflammables », piloté par la DRIRE Ile de France dont la 1^{ère} réunion s'est tenue le 25 juin 2003. Ce groupe a vocation à être un lieu privilégié pour faciliter les échanges entre la profession (UFIP, GESIP, USI, UNGDA), les experts (INERIS, TECHNIP), l'inspection des Installations classées (DRIRE Ile de France, DRIRE Nord Pas de Calais, et STIIIC) et les ministères concernés (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable DPPR, Ministère de l'Intérieur DDSC)

Pour un feu de forme rectangulaire :

- $Deq = 4 S / P$ si la Longueur $< 2,5 \times$ largeur
- $Deq =$ largeur si la Longueur $> 2,5 \times$ 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 :

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

avec $m'' = 0,055 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ (valeur retenue pour les hydrocarbures liquides)

• 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 ($1.9 \times 10^{-5} \text{ (kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1})$)

- Pouvoir émissif :

Corrélation de Mudan and Croce :

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

- 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 :

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

TVAP(H₂O)=1665 Pa à 15°C

HR= 70 %

Remarque 1 :

De manière conservative, la distance d'effet calculée pour chacun des seuils 3, 5 et 8 kW/m² est arrondie à la **demi-décade supérieure**.

Remarque 2 :

Dans le cas des cuvettes de forme quelconque, dès qu'un des angles intérieurs de la cuvette est largement supérieur à 90° et suivant où est située la cible, la feuille de calcul ne peut plus s'appliquer. En effet, dans les cas présentés sur le schéma de la Figure 8, la cible ne perçoit pas seulement le rayonnement du front de flamme situé en face d'elle mais également celui du ou des fronts de flamme qui se trouvent à côté. Or, le modèle de cette feuille de calcul ne permet de considérer qu'un seul front de flamme à la fois. Dans ces conditions, il s'avère nécessaire d'utiliser un autre outil de calcul pour déterminer les distances d'effets.

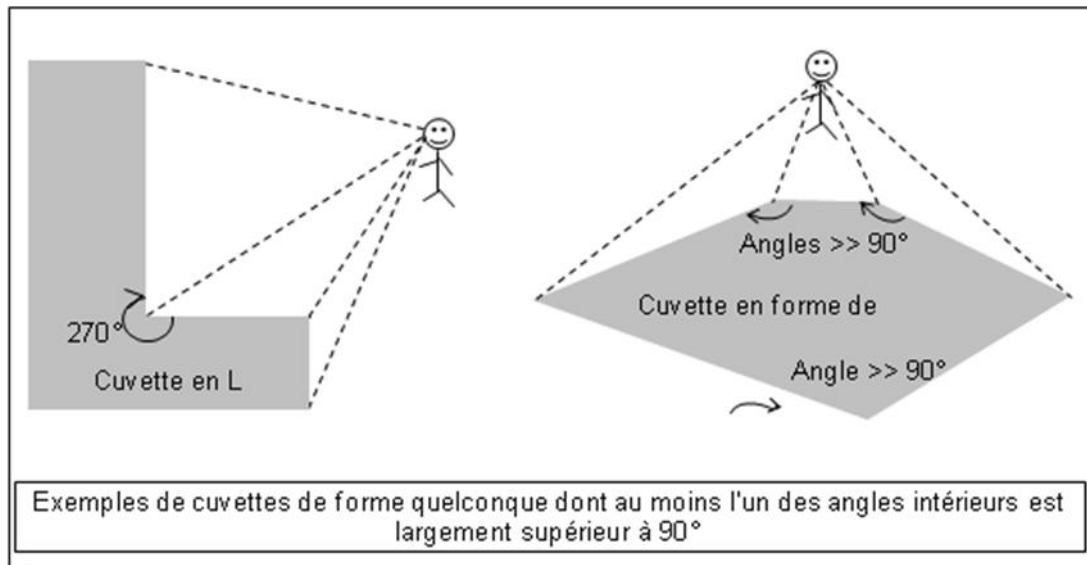


Figure 8 : Cas des cuvettes à géométrie complexe.

4.2.2 COMPARAISON AVEC LES AUTRES MODELES

Les résultats obtenus avec le modèle de la Circulaire pour un scénario de feu de cuvette ont été comparés à ceux donnés par des modèles de calcul d'effets thermiques couramment utilisés.

Les modèles (ou codes de calculs) présentés dans ce comparatif sont les suivants:

- le logiciel PHAST (version 6.4.2) de DNV,
- le logiciel FNAP de l'INERIS,
- le logiciel FRED de Shell,
- l'outil développé par Technip,
- le code exposé dans le "Guide bleu" de l'UFIP,
- le code exposé dans le Yellow Book du TNO,
- le modèle 3D, FDS proposé par Technip,
- et les formules de l'Instruction Technique de 1989 (IT-89).

Le scénario qui a servi de base à ce comparatif est un feu de cuvette d'essence, de 2400 m² de forme rectangulaire (37 x 65 mètres), dans laquelle se trouvent 2 bacs de 16 m de diamètre. Les distances d'effets figurant sur le graphique de la Figure 9 correspondent à une exposition au flux du grand côté de la cuvette.

Les modélisations ont été réalisées avec les hypothèses propres à chaque logiciel.

Pour les logiciels FRED et PHAST, aucune recommandation concernant la prise en compte ou non des surfaces des bacs pour définir la surface en feu de la cuvette n'est précisée. De ce fait, pour ces logiciels, deux modélisations ont été réalisées.

	Hypothèses					Distance d'effet		
	Diamètre équivalent	Surface	Pouvoir émissif	Facteur de vue	Transmissivité atmosphérique	d (8kW/m²)	d (5kW/m²)	(3kW/m²)
IT 89	Cf annexe	Brute	30 kW/m²	Cf annexe	Lannoy	57	72	93
UFIP	4S/P	Nette	Mudan and Croce	cylindrique 5m/s	Bagster	20	37	57
Technip	4S/P	Nette	30 kW/m²	plan sans vent	Non prise en compte	41	60	84
TNO	4S/P	???	Mudan and Croce	cylindrique sans vent	Bagster	25	40	59
FNAP (INERIS)	4S/P	Brute	Mudan and Croce	plan sans vent	Brzustowski and Sommer	17	35	56
Phast 1	4S/P	Brute	Mudan and Croce	cylindrique 5m/s	Bagster	29	49	66
Phast 2	4S/P	Nette	Mudan and Croce	cylindrique 5m/s	Bagster	24	41	55
FRED 1	4S/P	Brute	Mudan and Croce	cylindrique 5m/s	Wayne	33	53	73
FRED 2	4S/P	Nette	Mudan and Croce	cylindrique 5m/s	Wayne	27	45	62
Flamme claire	-	-	-	-	-	25	40	59
FDS avec bac	-	Brute	-	-	-	38	50	63
FDS sans bac	-	Nette	-	-	-	31	41	51
Modèle de la circulaire	-	Brute	Mudan and Croce	Calcul intégral 5m/s	Bagster	30	45	61

Remarque :

- la surface brute correspond à la surface de la cuvette sans soustraire la surface des bacs.
- la surface nette correspond à la surface de la cuvette à laquelle on soustrait la surface des bacs.

Comme le montre la figure ci-dessous, le modèle de la Circulaire se situe dans la moyenne pour les distances associées aux flux de 3, 5 et 8 kW/m².

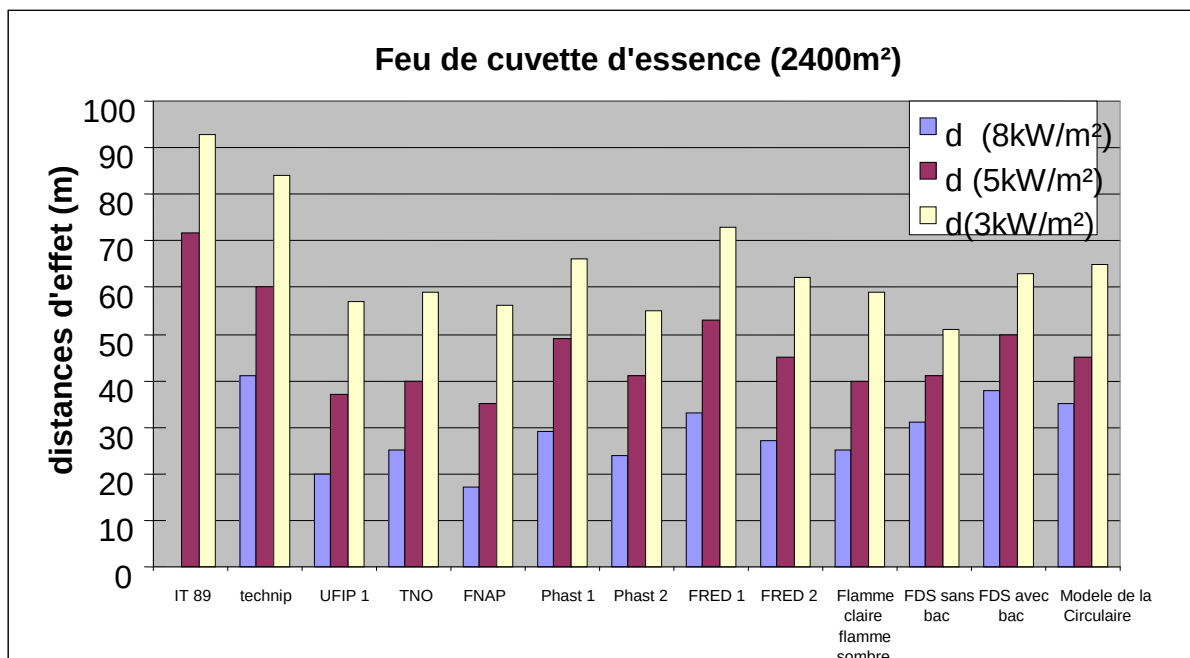


Figure 9 : Comparatif des différents modèles.

4.2.3 « VALIDATION » EXPERIMENTALE

L'objectif de ce paragraphe est de vérifier que le modèle de la Circulaire est en adéquation avec les flux mesurés expérimentalement à différentes distances (D).

Il est particulièrement difficile dans la littérature de trouver l'ensemble des données nécessaires, à savoir :

- la surface en feu,
- le flux mesuré,
- la distance (D) de la mesure.

Le rapport relatif aux essais Proserpine (1977) donne ces différentes informations.

Le tableau suivant résume l'intensité des radiations mesurées par les fluxmètres disposés autour de la cuvette à l'occasion de l'essai Proserpine.

	D	I (kW/m ²)
G Placé à D face à la largeur de la cuvette (40 m)	150m	0,50
	80m	0,95
	50m	2,3
E Placé à D face à la longueur de la cuvette (50 m)	150m	0,50
	80m	1,40

Le modèle de la Circulaire a déterminé quel flux thermique recevrait une cible positionnée à D mètres du front de flamme.

Les résultats de l'ensemble de ces simulations sont présentés dans le tableau ci-après. Pour information, les distances d'effets aux seuils critiques sont également déterminées.

Face à la longueur de la cuvette 50 m		Face à la largeur de la cuvette 40 m	
D (m)	I (kW/m ²) obtenu avec modèle de la Circulaire	D (m)	I (kW/m ²) obtenu avec modèle de la Circulaire
150	0,3	150	0,3
80	1,4	80	1,1
		50	2,9
55	3	50	3
40	5	40	5
30	8	25	8

Le comparatif réalisé avec les essais Proserpine montre que l'outil de calcul annexé à la Circulaire du 31/01/07 (texte abrogé par la Circulaire du 10 mai 2010) modélise de façon correcte les effets radiatifs engendrés par un feu de nappe.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION DES OUTILS DE CALCUL

Cette partie A sur les feux de nappe s'est attachée après l'analyse d'accidents, à passer en revue les différentes corrélations permettant de caractériser la flamme d'un incendie de produits liquides.

Ces formules permettent de définir la géométrie de flamme soumise ou non au vent et de déterminer le pouvoir émissif de flamme, étape importante pour l'estimation des distances d'effets.

Les grands principes de deux outils de calcul développés par l'INERIS ont été ensuite déclinés : l'outil de calcul FNAP et celui de la circulaire du 31/01/07 (Texte abrogé par la circulaire du 10 mai 2010) relative aux études de dangers des dépôts de liquides inflammables.

Même si ces outils montrent un bon accord avec les données expérimentales, ils pourraient faire l'objet d'améliorations dans le cadre de développements ultérieurs telles que :

- tracé automatique des courbes isoflux,
- possibilité de considérer simultanément plusieurs feux de cuvette ou de bac en sommant toutes les contributions radiatives,
- prise en compte des géométries complexes de cuvettes (forme en L par exemple) et pas seulement les formes cylindriques ou rectangulaires,
- prise en compte de la partie convective de la chaleur produite par le feu afin d'obtenir des résultats plus réalistes en champ proche,
- calcul du pouvoir émissif de la flamme à partir de la puissance totale dissipée et de la fraction radiative estimée ou inversement, dans un souci de cohérence, estimation de la fraction radiative à partir des données fournies par l'utilisateur.

6. **GLOSSAIRE**

ARIA :Analyse, Recherche et Information sur les Accidents

BARPI : Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles

FNAP : Feu de NAPpe, nom donné au code de calcul permettant de modéliser les feux de nappe à l'INERIS

LNG : Gaz Naturel Liquéfié

LPG : Gaz de Pétrole Liquéfié

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et l'Energie

NIST : National Institute of Standards and Technology

TNO : The Netherlands Organization of Applied Scientific Research

7. RÉFÉRENCES

- [1] BABRAUSKAS
Estimating large pool fire burning rates ;
Fire technology, 19, p.251-261, 1983
- [2] BABRAUSKAS
Pool fires : burning rates and heat fluxes ;
NFPA, Tome 1, Chap.6 p. 36-42, 1990
- [3] BÜRGESE, HERTZBERG
Radiation from pool flames ;
Heat transfer in flames, ch.27, ed. Afgan and Beer, 1978
- [4] MINZER, EYRE
Large scale LNG and LPG pool fire ;
Inst.Chem.Eng.Symp.Series 71, p.147-163, 1982
- [5] MUDAN
Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires ;
Prog Energy comb. Sci., Vol.10, p.59-80, 1984
- [6] HOFMANN
Modeling of fire for risk assessment in petrochemical industries ;
Heavy gas and risk assessment Symposium, Francfort, 1982
- [7] BURGESS, ZABETAKIS
Fire and explosion hazards associated with LNG ;
US Bureau of Mines, RI 6099, 1962
- [8] THOMAS
The size of flames from natural fires ;
9th international symposium on combustion, p 844-859, 1963
- [9] HESKESTAD
Engineering relations for fire plumes ;
Fire safety journal 7, 1984
- [10] DRYSDALE
An introduction to fire dynamics ;
John Wiley & sons, New York, 1985
- [11] BAGSTER, PITBALDO
Thermal hazards in the process industry ;
Chemical Engineering Progress, 1989
- [12] MOORHOUSE
Scaling criteria for pool fires derived from large-scale experiments ;
Int. Chem. Ing. Sym. Series 71, 1982

- [13] PUTNAM, SPEICH
A model study of the interacting effects on mass fires ;
Battelle Memoriol Institute ; Columbus Ohio, research report, 1961
- [14] THOMAS
Fire research note 600 ;
Fire research station, Borehamwood, England, 1965
- [15] WELKER, SLIEPCEVICH
Fire Technology, 2, 1966
- [16] COMMISSARIAT A l'ENERGIE ATOMIQUE
Opération Proserpine ;
GESIP – Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques, 1977
- [17] MUDAN, CROCE
Fire hazards calculations for large open hydrocarbon fires ;
SFPE Handbook of fire protection engineering, 1986
- [18] LIHOU, MAUND
Thermal radiation hazard from fireballs ;
Int.Chem.Eng.Symp.Series 71, 1982
- [19] American Petroleum Institute
Guide for pressure relieving and depressing systems ;
API Recommended Practice 521, appendix A, 1973
- [20] LANNON
Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre
Etudes déterministe et probabiliste du scénario d'accident ;
Electricité de France – Direction des Etudes et Recherches, 1984
- [21] HAMILTON, MORGAN
Radiant interchange configuration factors ;
NACA Technical Note 2386, 1952
- [22] STANNARD
Fire Technology, p.35-41, 13, 1977
- [23] INERIS, C. CWIKLINSKI
Distilleries et chais de cognac – Sécurité incendie-explosion ;
Rapport référencé EXI-CCw/Jle 31AZ15, 05/09/1994
- [24] Faculté Polytechnique de Mons, MRRC, C. DELVOSALLE, N.NIEMIROWSKI
Logiciel EDITH – Effets Domino Initiés Thermiquement – Manuel
théorique (2000)
- [25] DELICHATSIOS
Air Entrainment into Buoyant Jet Flames and Pool Fires
Combustion and Flame, 70, pp 33-46, 1987
- [26] STEWART
Comb. Sci. And tech., 2, 203, 1985

- [27] ZUKOSKI
Proceedings of the First International Symposium on Fire Safety Science,
Fire Safety Science, 1984
- [28] COX and CHITTY
Combustion and Flame, 60, 219, 1985
- [29] American Gas Association (AGA)
Report IS 3-1
LNG safety research program
- [30] F. P. LEES
Tome 2, Fire section 16
Loss Prevention in the Process Industries, 2nd edition
- [31] GESIP
"Taux expérimentaux d'extinction de feux d'alcool éthylique"
Rapport n°99/04, Edition 24/07/2000
- [32] BLINOV & KHUDIANOV
"Certain laws governing diffusive burning of liquids"
Academiia Nank, SSR Doklady, 1957
- [33] KOSEKI
"Scale Dependency of Radiation and Smoke Emission from Large Pool Fires"

Second Symposium on Scale Modelling (Inter.) pp87-96, 1997
- [34] TEWARSON
"Generation of Heat and Fire Products"
Long Range Research Program – Flammability and Extinguishability Project FE-B, Factory Mutual Research, May 1995
- [35] CHIVAS, BERTRAND, DUPLANTIER, AUDOUIN & RIGOLLET
"Method to obtain large scale burning rate of liquids with lab scale tests"
11th International Symposium, Interflam 2007, September 2007.

8. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb pages
Annexe 1	Feux de nappes ou incendies suite à débordement	10
Annexe 2	Stockages de solvants	13

***ANNEXE 1 :
FEUX DE NAPPES OU INCENDIES SUITE A DEBORDEMENT***

**Ministère de l'Aménagement du territoire et de
l'environnement**
Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques

Base de données ARIA

Feux de nappes ou incendies suite à
débordement
(17 cas)

N° 6051 15/10/55 – Japon – YOKKAICHI

23.2 – Raffinage de pétrole

Dans une raffinerie, un bac à toit fixe de 8 000 m³ rempli à près de 90 % de FO s'enflamme (l'origine de l'incendie reste inconnue). Après 6 h 30 de feu de surface de bac, un Boilover se produit. Environ 2 000 à 2 500 m³ d'HC débordent du réservoir. En l'absence d'éléments de rétention, la vague de FO en feu se répand – dans un premier temps – jusqu'à plus de 120 m, et fait des victimes parmi les pompiers. Le sinistre se propage ensuite rapidement sur plus de 10 000 m² de surface. 4 autres bacs de Brut/FO/GO/Essence ainsi que l'immeuble des bureaux sont incendiés et détruits. L'extinction finale est réalisée 28 h après le début de l'accident. Le coût global de celui-ci est estimé à près de 420 Millions de Yens (1955).

N° 2838 - 05/08/75 – 57 – FLORANGE

51.5 – Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Suite à un acte de malveillance, un incendie se déclare vers 1 h 00 dans un dépôt d'hydrocarbures et de solvants divers. L'alerte est donnée après ½ heure. Le feu intéresse rapidement la totalité de la cuvette de rétention (4 160 m²) d'un bac de capacité 7 330 m³ (hauteur 16,20 m, diamètre 24 m) contenant 7 000 m³ de FOD. L'extinction est obtenue après une intervention de 30 h. Au moins 330 pompiers sont mobilisés, dont 85 % de volontaires. 11,6 km de tuyaux de 110 mm et 5,4 km de tuyaux de 70 mm sont mis en batterie pour alimenter 5 canons à mousse de 2x1 200, 2x3 000 et 5 500 l/min (débit maxi instantané d'eau supérieur à 600 m³/h). 100 m³ d'émulseurs sont amenés et consommés. La quantité de FOD brûlée pendant le sinistre a été estimée à 3 700 m³.

N° 3420 – 07/08/75 – 57 – WOIPPY

51.5 – Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Vers 1 h 40 du matin, plusieurs explosions d'origine malveillante incendient un dépôt de 10 410 m³ contenant 6 617 m³ d'hydrocarbures. La cuvette de rétention de 4 000 m² est rapidement embrasée. L'incendie est éteint en 13 h avec 4 canons-mousses (1 200, 3 000, 5 600 et 24 000 l/min). 15,8 km de tuyaux de diamètre 110 mm et 8,9 km de tuyaux de diamètre 70 mm sont installés (débit instantané maxi supérieur à 600 m³/h). Sur les 238 m³ d'émulseurs approvisionnés (7,6 m³ en réserve sur le site), 105 m³ sont consommés. La réserve en eau de l'établissement de 500 m³ est rapidement épuisée.

N° 3610 – 14/03/81 – 36 – CHATEAUROUX

51.5 – Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Dans un dépôt de 9 000 m³ (capacité 18 000 m³) de FOD/GO/Essence répartis sur 9 bacs (8 toits fixes et 1 écran interne), un feu de cuvette d'origine malveillante est allumé. Par l'intermédiaire de la cuvette, l'incendie se généralise à tout le dépôt (bacs + 3 500/4 500 m² de cuvette). La phase gazeuse d'un bac de GO explose (⇒ ouverture du toit). L'atmosphère libre de l'écran interne explose, la soudure robe/fond se déchire, le bac se soulève et retombe sur le merlon ; les 900 m³ de super créent une vague qui submerge les merlons et infiltre le réseau pluvial (combustion/explosions ⇒ pollution évitée). La lutte (> 21 h) nécessite l'intervention de 144 pompiers et l'utilisation de 200 m³ d'émulseurs. 7 000 m³ d'HC sont détruits. Le coût global est estimé à 35 MF.

N° 6077 – 30/08/83 – Royaume Uni – MILFORD HAVEN

23.2 – Raffinage de pétrole

Dans une raffinerie, la surface d'un toit flottant (fissuration chronique par contraintes mécaniques du vent) d'un bac de 94 000 m³ rempli à ½ de Brut léger (PE=38°C) s'enflamme (ignition probable par des escarbilles issues d'une torche). En 2 h, les 4 800 m² de surface de bac sont embrasés. Le toit flottant s'enfonce. 12 h après, un Boilover survient et génère une boule de feu ainsi qu'un débordement d'HC (feu des 16 800 m² de cuvette). 2 h après, un second Boilover engendre la rupture partielle de la liaison robe/fond. De l'HC est libéré mais les merlons (H = 5 m) de la cuvette résistent. Le feu de bac persiste et ne sera éteint que 15 h plus tard. Au total, 150 pompiers interviennent durant 60 h. Plus de 700 m³ d'émulseurs sont utilisés. 6 pompiers sont blessés.

N° 4998 – 02/06/87 - 69 – LYON

51.5 – Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Dans une cuvette d'un dépôt pétrolier, une fuite d'additif (PE=12°C) se produit sur une pompe. Un aérosol se forme et flashe rapidement. Une seconde après, une explosion se produit et un feu alimenté est allumé. 10 s après, la phase gazeuse d'un bac non frangible de 630 m³ rempli au tiers du même additif explose. La liaison robe/fond se rompt, le bac décolle jusqu'à 200 m de haut et retombe à 60 m. 4 000 m² de cuvette sont embrasés. Un Boilover survient sur un bac en feu de 2 900 m³ rempli au tiers de GO. Une boule de feu de 200 m de diamètre s'élève jusqu'à 450 m de haut. Le bac se rompt et libère une vague de 1 m qui submerge le merlon. 200 pompiers interviennent durant 22 h ; 200 m³ d'émulseurs sont utilisés. L'accident s'est produit alors que plusieurs entreprises sous-traitantes effectuaient les travaux ; 2 de leurs employés sont tués et 15 autres personnes sont blessées. Au civil, le chef d'établissement a été condamné à 10 mois de prison et la Shell est reconnue responsable.

N° 7500 – 25/11/90 – Etats Unis - DENVER

62.1 – Transports aériens réguliers

Suite à une fuite dans une fosse à vannes et à son allumage par le moteur électrique, un incendie survient dans le dépôt de carburant de l'aéroport international d'une superficie de 6,5 ha. La canalisation génère 2 jets de 7 à 9 m de haut qui emplissent la fosse et alimentent l'incendie. La canalisation aval (vers l'aéroport) se vidange dans la fosse à cause du dysfonctionnement d'une vanne de régulation de débit. La vanne de coupure est située à plus de 3 km. Environ 6 000 m³ de kérosène brûlent pendant plus de 55 heures et 7 des 12 réservoirs sont endommagés. La ville met ses équipes d'intervention à disposition et les aéroports d'autres états ainsi qu'un fabricant fournissent des émulsifiants. Les dommages sont estimés à 150 MF (30 M\$).

N° 3396 – 14/06/91 – 93 – SAINT-OUEN

51.5 – Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Dans un dépôt de carburant, des travaux de soudage sont en cours dans l'aire d'accès aux cuvettes de rétention. Sur cette zone – réputée hors risque – une fuite se produit au niveau d'un regard de purge du collecteur entrée (opercule du piquage 3'' mal remonté). Un flash survient suivi d'un feu de nappe (100 m²) puis d'un feu alimenté (150 m³/h) contre lequel 500 pompiers luttent en vain durant 4-5 h. La maîtrise du sinistre n'est obtenue qu'après la découverte de la source d'alimentation. Il s'agit d'un bac de 9 000 m³ de super dont la vanne de pied – réputée fermée – initialement ouverte (erreur humaine) l'est restée malgré le déclenchement du système de sécurité (défaut général de conception). 15 pompiers sont blessés dont 4 sérieusement brûlés.

N° 2914 – 07/10/91 - 44 – SAINT-HERBLAIN

51.5 – Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Dans un dépôt pétrolier, une fuite se produit au niveau d'un raccord sur la ligne de vidange en aval de la vanne de pied d'un bac de 6 500 m³ rempli à 70 % de SP98. Un aérosol se forme, déborde le merlon (H = 2 m) de la cuvette et se répand par gravité sur le parking. Au bout de 20 secondes, le nuage (V estimé à posteriori à 25 000 m³) s'allume. Le VCE génère d'importants dégâts dans la zone de stationnement des camion-citernes (qui sont retournés), ainsi qu'aux structures jusqu'à 100 m et aux vitres jusqu'à 1 km. Un chauffeur décède (des suites de ses brûlures), 2 autres sont blessés ainsi que 2 employés du dépôt. Après rassemblement des moyens nécessaires (durant environ 7 h), 200 pompiers éteignent le feu des 1 100 m² de (2) bacs et des 5 400 m² de leur cuvette en un peu plus de 1 h.

N° 4763 – 15/10/93 - 03 – CUSSET

60.2 – Transports urbains et routiers

Un feu puis une explosion se produisent sur un camion-citerne (32 m³) en dépotage dans un dépôt de fuel domestique et gasoil (3 cuves enterrées de 30 m³ et 3 cuves aériennes de 70 m³). Des flammes de 10 m de haut sont observées, avec danger d'extension à un dépôt voisin de 35 000 m³. L'incendie est rapidement maîtrisé par 45 pompiers et 18 véhicules d'intervention. Des barrages de sable, l'épandage de produits absorbants et l'obstruction des égouts permettent de limiter la pollution des eaux, mais le sol poreux du dépôt est souillé par les hydrocarbures. Des opérations de nettoyage sont nécessaires. Quelques traces d'hydrocarbure sont aperçues dans la STEP de Vichy-Cusset, dans le Jolan, le Sichon et l'Allier.

N° 5959 – 02/11/94 – Egypte – DRONKA

75.2 – Services de prérogative publique

Des inondations sans précédent depuis 50 ans seraient à l'origine de l'érosion d'une voie ferrée, causant le renversement de 2 wagons de carburant dans un dépôt militaire stratégique de 40 000 t (diesel, kérosène). La foudre aurait allumé la nappe, provoquant l'explosion puis l'embrasement des 8 réservoirs du dépôt. Les 15 000 t d'hydrocarbures enflammés présentes sont entraînées par les eaux hors du site et propagent l'incendie à de nombreuses habitations (entre 80 et 200 selon les sources). La végétation est détruite sur une zone de 100 ha. Officiellement, 427 victimes sont à déplorer, parmi lesquelles plusieurs dizaines seraient directement liées au feu (18 signalées). L'armée est mobilisée pour lutter contre le sinistre et reloger les sans-abris.

N° 8623 – 14/08/95 – Russie – PERM

23.2 – Raffinage de pétrole

Un incendie se produit dans une raffinerie de pétrole. Du pétrole fuit au niveau d'un pipeline et se répand sur 300 m². L'unité de raffinage du pétrole brut est mise hors service. Un bassin de décantation est endommagé. 150 pompiers aidés de 30 camions ont pu réduire la zone incendiée à 100 m². Selon l'ingénieur chef, un surcroît de capacité permettrait à l'installation de fonctionner normalement. La commission d'état enquête sur les origines de l'accident.

N° 8183 – 24/10/95 Indonésie – CILACAP

23.2 – Raffinage de pétrole

La foudre frappe le dispositif de jaugeage automatique d'un réservoir à toit fixe de 38 800 m³ en cours de remplissage par du kérosène à 43,5°C (température supérieure au point éclair). La mauvaise équipotentialité des diverses parties du dispositif est à l'origine d'étincelles qui initient un incendie. Le ciel gazeux du réservoir explose et le toit est détruit. Le liquide enflammé transmet le sinistre aux 6 autres réservoirs présents dans la cuvette. Les habitants du voisinage et les employés sont évacués. Aucune victime n'est signalée. Près de 600 habitations sont endommagées et des centaines de points d'eau sont pollués. Les navires desservant la raffinerie sont retardés. L'incendie est éteint après 3 jours. Les dommages sont estimés à 560 MF.

N° 9598 – 24/07/96 – Russie – VOLGOGRAD

23.2 – Raffinage de pétrole

Dans une raffinerie, un feu se déclare sur un stockage de résidus pétroliers (étang de décantation) inutilisé depuis 2 ans. L'incendie se propage à toute la zone jusqu'à atteindre une taille gigantesque (840 000 m²). Une pollution atmosphérique (fumées) très importante est générée. De nombreux pompiers et militaires interviennent, utilisant notamment 17 véhicules de pompiers ainsi que des bulldozers, pelleteuses, véhicules amphibies, canons à eau automoteurs, pontons, lance-roquettes et hélicoptères porteurs d'eau. Le feu est éteint au bout de 16 jours. L'inflammation a pour origine un non respect des règles de sécurité lors de travaux de soudage effectués par des employés d'une société extérieure expérimentant leur procédé de recyclage de déchets.

N° 10120 – 12/11/96 – Mexique – SAN JUAN IXHUATEPEC

51.5 – Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Dans un dépôt d'hydrocarbures, une fuite sur la vanne d'un bac de 16 000 m³, contenant 12 800 m³ d'essence, s'enflamme lors de l'intervention d'ouvriers. Le bac explose 1 h 40 plus tard et le feu s'étend à la cuvette. Un autre bac de 16 000 m³ contenant 4 000 m³ d'hydrocarbures implanté dans la même cuvette explose. Un 3^{ème} bac (800 m³) est menacé. Une colonne de fumée s'élève à 1 200 m. Au moins 16 personnes sont blessées, dont 5 mortellement (brûlures) et 5 gravement. Les habitations proches et les écoles sont évacuées (5 000 personnes). Des centres d'hébergement sont ouverts. Des consignes sont données à la population (se confiner, boire, etc). La Croix Rouge secourt 950 personnes. Plus de 17 000 m³ d'essence ont brûlé. Le débit d'eau d'extinction atteint 30 m³/s. Le sinistre est éteint 48 h plus tard.

N° 12507 – 27/02/98 – Equateur – ESMERALDAS

60.3 – Transports par conduites

A la suite de pluies torrentielles liées au phénomène climatique El Nino, un glissement de terrain provoque la rupture d'un oléoduc à une douzaine de km du terminal portuaire de 500 km, acheminant le pétrole de l'Amazonie vers la côte Pacifique. Environ 2 500 m³ de pétrole se déversent dans les rivières et dans l'océan ; l'explosion et l'incendie qui suivent détruisent quelques 160 habitations. L'incendie se propage jusqu'aux quais du port, mais épargne la raffinerie et un gazoduc. Des vagues de feu de 10 m sont observées. Sept personnes sont tuées, 110 personnes sont blessées dont 40 brûlées à 50 %, 40 ont disparu et 600 personnes sont évacuées. L'intervention qui dure 6 h est contrariée par un manque d'eau à la suite de la rupture des canalisations.

N° 16828 – 02/12/99 – Thaïlande

23.2 – Raffinage de pétrole

Une explosion suivie d'un incendie détruit 4 des 9 réservoirs de pétrole d'une raffinerie. 7 employés sont tués et 11 autres blessés dont 5 sont restés à l'hôpital plusieurs jours (5 j). Les 5 autres réservoirs ont été protégés avec de la mousse (15 000 l) pour éviter la propagation de l'incendie. Des voitures et vitres de maisons aux alentours sont détruites et l'explosion a été ressentie jusque dans les villes à quelques km. La zone est couverte d'une fumée noire. Les réservoirs restants devraient être transvasés par sécurité. Les dommages sont estimés à 22 millions de dollars US. Sur les 86 000 m³ stockés, 30 000 ont été détruits. Le rayonnement très fort a empêché les pompiers d'intervenir au plus près. L'incendie a duré 2 jours. Enquête et expertises sont en cours, l'installation étant arrêtée par les autorités pour 3 mois. L'accident serait dû à une imprudence lors du remplissage d'un des bacs (1 500 m³) : il y aurait eu surremplissage et débordement puis allumage par une étincelle.

N° 22939 - 24/07/2002 - ETATS-UNIS - 00 - SOUTHLAWN

G46.12 - Intermédiaires du commerce en combustibles, métaux, minéraux et produits chimiques

Dans un dépôt de carburant et de gaz, un incendie se déclare sur un camion alors que ce dernier était utilisé pour le remplissage d'un réservoir fixe. A l'arrivée des pompiers, un réservoir d'un peu moins de 2 m³ était en flammes, de même que le camion citerne et une trentaine de bouteilles de propane. Selon les services de secours, en fin de remplissage, le réservoir aurait débordé et les vapeurs d'hydrocarbures auraient été enflammées par une machine en fonctionnement. Le conducteur, ayant détecté le débordement, aurait alors coupé l'arrivée de carburant pendant que les 3 personnes travaillant dans la zone évacuaient cette dernière. Les flammes de l'incendie atteignent une vingtaine de mètres. Des bouteilles de gaz, sous l'action du feu, explosent en formant des boules de feu. Devant la possibilité d'extension du sinistre, les secours interrompent la circulation des véhicules sur les axes voisins. Ils procèdent par ailleurs au refroidissement des capacités du site non touchées et des immeubles voisins. L'incendie est maîtrisé en une quarantaine de minutes. L'estimation des dégâts se situe entre 250 000 et 500 000\$.

N° 25731 - 10/10/2003 - FRANCE - 69 - GIVORS

H52.10 - Entreposage et stockage

Vers 12h20, dans un dépôt pétrolier, un employé constate le débordement d'un bac de bitume, en cours de remplissage. Le produit hors du bac provoque du fait de sa température une émanation de vapeurs et l'inflammation des matériaux d'isolation recouvrant la capacité. Le site met en oeuvre ses dispositifs de secours et le POI est déclenché à titre préventif. Les secours sont alertés et le dépôt est partiellement évacué. Les pompiers établissent deux canons à mousse et évitent la propagation du feu aux autres bacs situés à proximité. L'exploitant procède au soutirage du bitume du bac concerné. L'incendie est maîtrisé vers 13h20 et le POI levé à 14h00. La fuite de produit est restée confinée dans la cuvette de rétention. Les dégâts matériels sont peu importants. Selon l'analyse de l'exploitant, divers paramètres se sont conjugués pour conduire au débordement du bac : excès de produit, puits de jauge endommagé ayant permis l'écoulement, débordement non détecté. L'excès de produit était dû à une demande ponctuellement plus faible de l'unité chargée de la fabrication du produit fini, le stock étant déjà important. La non détection de la montée du niveau dans le bac puis du débordement est due à : indisponibilité de la réglette de niveau dont la réparation n'avait pas encore été effectuée car elle nécessitait la vidange du bac, mauvais fonctionnement du niveau très haut /dispositif à lames vibrantes (non maintenu, pas de dossier technique, adaptation/produit mesuré?), décalage de 24h dans l'application (informatique ?) de suivi du stock, pas de consultation de l'information donnée par la jauge de niveau en local. L'inflammation du produit quant à elle serait due au fait que le bac était chaud et à la présence de sulfures pyrophoriques. En terme d'action corrective, l'exploitant s'engage à remettre en état la réglette, à étudier et mettre en place un détecteur de niveau très haut. Sur le plan organisationnel, les opérateurs ont été formés pour le calcul des stocks dans l'application, la rédaction et la mise en oeuvre d'une procédure de maintenance avec vérifications périodiques sont prévues pour l'entretien de l'ensemble des niveaux du site. De manière plus générale, l'exploitant s'organise pour suivre la mise en place des actions d'amélioration (dont actions correctives).

N° 31312 - 11/12/2005 - ROYAUME-UNI - 00 - BUNCEFIELD

G46.71 - Commerce de gros de combustibles et de produits annexes

Des explosions et un incendie se produisent dans un dépôt pétrolier stockant 150 000 t de carburant (essence, gasoil, kérosène). La 1^{ère} la plus importante à 6h01 (2,4 sur l'échelle de Richter) est entendue à 160 km ; les effets de surpression auraient atteint 700 à 1 000 mbar. Deux autres explosions suivront à 6h27 et 6h28. Un gigantesque nuage noirâtre contenant des substances irritantes atteint le sud de l'Angleterre, la Bretagne et la Normandie le 12/12, puis le Sud-Ouest de la France et l'Espagne. Les autorités conseillent aux riverains de se confiner ; 2 000 personnes évacuées regagneront leur domicile le soir même. L'autoroute M1 est fermée plusieurs jours. L'explosion détruit la station de pompage et les lagunes de réserve incendie, obligeant les secours à s'approvisionner à 3 km du site. L'incendie est maîtrisé après 60 h d'intervention, mais des vapeurs provenant d'une citerne épargnée par le feu s'enflamment le 14 au matin. Au plus fort de la crise, 180 pompiers seront mobilisés, ainsi que 20 véhicules et 26 pompes ; 786 m³ d'émulseur et 68 000 m³ d'eau ont été utilisés. A la suite du sinistre, 43 personnes légèrement blessées, par des éclats de verre essentiellement, sont dénombrées, les 10 employés présents sur le site sont indemnes et 20 bacs ont brûlé. Les murs de rétention ayant été endommagés, l'impact sur la qualité des eaux est surveillé, notamment du fait du PFOS, toxique et persistant, utilisé dans les émulseurs. 16 000 m³ d'eaux d'extinction ont pu être récupérés et stockés provisoirement : 800 m³ seront rejetés par erreur dans une station d'épuration, puis dans la River COLNE et 10 000 m³ seront traités par osmose inverse. Plusieurs jours sont nécessaires pour évaluer toutes les conséquences environnementales. Le coût de l'accident devrait dépasser 750 Meuros, dont 37 Meuros pour la reconstruction des cuves et 52 Meuros pour les produits perdus. Environ 20 établissements (500 personnes) ont été détruits et une soixantaine (3 500 employés) a subi d'importants dommages. L'accident est dû au débordement d'un réservoir à écran flottant en remplissage (11/12, 3 h : jauge de niveau statique alors que le débit est constant / 5h20 : le bac commence à déborder / 5h50 : l'approvisionnement d'un autre bac s'arrête et le débit vers le bac 912 atteint 890 m³/h / 6h01 : 1^{re} explosion). Plus de 300 t d'essence sans plomb, contenant 10 % de butane non stabilisé, se sont alors écoulées au sol formant un nuage de vapeur inflammable répandu sur 8 ha. Selon l'enquête, le point d'allumage de ce nuage, situé au nord ouest du dépôt, pourrait être au niveau de la station de pompage ou de la cabine du générateur d'urgence. Aucun des 2 systèmes d'alarme liés au niveau de remplissage du bac (jauge de niveau + alarme de niveau haut) n'a fonctionné. L'approvisionnement n'a donc pas été interrompu automatiquement et le dysfonctionnement n'a pas été reporté au système du fournisseur comme il aurait dû l'être par le biais de l'alarme de niveau haut.

N° 33574 - 05/06/2006 - ETATS-UNIS - 00 - RALEIGH

G46.71 - Commerce de gros de combustibles et de produits annexes

Une explosion se produit lors de l'installation d'un raccordement entre 2 réservoirs de stockage d'hydrocarbures dans un dépôt d'un champs de pétrole. Lors de travaux de soudure, des étincelles enflamment des vapeurs d'hydrocarbure s'échappant d'un tuyau ouvert à proximité. Des ouvriers d'une entreprise sous-traitante sont en charge des travaux sur 4 bacs interconnectés : le bac n°4 se déverse dans le n°3 dont le trop plein rejoint le n°2 puis le bac n°1. Ils retirent la trappe à la base du réservoir n°4 pour le vidanger des résidus de pétrole brut qu'il contient. Après l'avoir rincé à l'eau, ils laissent les vapeurs d'hydrocarbures s'évaporer pendant plusieurs jours. Le jour de l'accident, un des ouvriers insère le chalumeau pour la soudure oxyacétylénique dans la trappe puis dans l'évent du côté opposé du réservoir n°4 pour vérifier l'absence de vapeur inflammable. Les 4 ouvriers montent alors sur une échelle disposée sur les bacs 3 et 4 pour réaliser les travaux. Peu après le début de l'intervention, un feu se déclare à l'une des extrémités de la canalisation du bac n°3 puis se propage au 2ème par le tuyau de débordement, les réservoirs explosent générant des flammes de plus de 15 m de haut. Les couvercles des 2 réservoirs sont arrachés, l'un d'eux est retrouvé 180 m plus loin. Les 3 ouvriers montés sur le 3ème réservoir décèdent et le 4ème, attaché par un harnais, est gravement blessé. Un témoin appelle les secours locaux et la police qui se rendent sur place. L'analyse des risques fait état de graves manquements aux procédures de sécurité à respecter lors des travaux par point chaud malgré l'existence de guides techniques. Un détecteur de gaz aurait dû être employé, l'utilisation d'une torche de soudure étant extrêmement dangereuse. Le tuyau ouvert sur le réservoir adjacent aurait dû être couvert ou isolé avant les travaux ou, mieux, les vapeurs inflammables auraient dû être éliminées en nettoyant les bacs n° 2 et 3. De plus, les sous-traitants auraient dû monter un échafaudage plutôt qu'utiliser une échelle qu'il fallait maintenir en place en la bloquant sur le bac n°3. L'entreprise sous-traitante n'avait pas établi de procédures de sécurité pour ses employés et l'exploitant du dépôt ne le lui imposait pas. L'exploitant prévoit de développer et de mettre en place des procédures écrites pour assurer des méthodes de travail sûres pour le nettoyage des réservoirs et le travail en hauteur avec points chauds.

N° 32800 - 12/02/2007 - FRANCE - 69 - FEYZIN

C19.20 - Raffinage du pétrole

A 3h40, un opérateur constate une fuite ou un débordement au sommet du bac de récupération des eaux de dessalage du brut de l'unité de distillation atmosphérique (T14051) contenant des eaux huileuses (mélange eau et gazole). Un incendie se déclare aussitôt et l'opérateur donne l'alerte. Le POI est déclenché à 4h. Le personnel de la raffinerie intervient et maîtrise le sinistre à 4h54. La nappe de liquide qui s'est constituée s'est enflammée au contact d'un point chaud non déterminé conduisant, par effet domino, à un incendie sur l'unité attenante de traitement des kérosènes (MEROX) alimenté par les fuites sur les presse étoupes et brides soumises aux effets thermiques. L'exploitant procède à l'arrêt d'urgence de l'unité de distillation atmosphérique et isole l'unité MEROX. L'arrosage pour refroidissement est stoppé à 6h18 avec mise en place d'un tapis de mousse. Les différents effluents (3 000 m3) sont récupérés et dirigés vers la station de traitement des eaux résiduaires, le bassin d'orage et des bassins tampon. Les hydrocarbures impliqués dans l'incendie sont évalués par l'exploitant à 11t de gasoil et 13 t du kérosène. Les conséquences sont limitées à des dégâts matériels et à

un panache de fumée. L'inspection des installations classées se rend sur les lieux et demande à l'exploitant un rapport sur les causes de la fuite ou du déversement du bac et sur la chronologie des événements. Les premiers éléments d'enquête font état de la rupture de la soudure frangible du toit du bac.

N° 34410 - 22/01/2008 - FRANCE - 04 - PEYRUIS
C20.53 - Fabrication d'huiles essentielles

Dans une usine de fabrication d'huiles essentielles, de l'huile chaude estérifiée est rejetée dans une cuvette de rétention après débordement de la cuve de stockage. Au contact de la laine de verre du calorifuge de cette dernière, l'huile s'enflamme et provoque un début d'incendie éteint par le personnel de l'usine avant l'intervention des pompiers. La laine de verre imbibée est enlevée, la cuvette nettoyée et la cuve inertée à l'azote. Vers 14 h, la laine de verre restant sur la cuve s'enflamme à nouveau, en raison d'un vent violent. Les secours sont alertés une seconde fois. Aucune impact à l'extérieur du site n'est constaté. L'exploitant décide de décalorifuger complètement la cuve. Une mauvaise estimation des quantités d'huile à transférer est à l'origine du débordement de 500 l d'huile dans la rétention de la cuve. Au titre du retour d'expérience, une mesure de niveau est mise en place sur la cuve et reportée en salle de contrôle.

**ANNEXE 2 :
STOCKAGES DE SOLVANTS**

**Ministère de l'Aménagement du territoire et de
l'environnement**
Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques

Base de données ARIA
Accidents concernant des stockages
de solvants (44 cas)

N° 14 753 du 17/07/1979 - SAINT-BENOIT-LA-FORET (37)

29.7 - Fabrication d'appareils domestiques

Dans une fabrique d'articles ménagers, un incendie se déclare dans le magasin de nickel, se disperse aux solvants et atteint des bouteilles d'acétylène.

N° 56 du 21/06/1988 - POOLE (Royaume Uni))

51.5 - Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Un incendie se déclare dans un entrepôt à partir de la cellule des matières oxydantes (décomposition exothermique probable). La résistance au feu insuffisante des compartiments entraîne la propagation du feu aux cellules voisines (liquides inflammables, déchets). Les fumées toxiques obligent à évacuer 3 000 personnes pendant 1 journée. 14 personnes sont incommodées. La majorité des eaux incendie sont récupérées dans des réservoirs. Le reste est rejeté après dilution. 5 fûts de solvants sont projetés hors du site.

N° 476 du 21/07/1988 - ARVAULT (79)

26.5 - Fabrication de ciment, chaux et plâtre

Dans une cimenterie, une explosion suivie d'un incendie se produit sur un réservoir de 300 m³ (contenant 50 m³ de solvants à incinérer) lors de travaux de soudure sur une canalisation. Le toit du réservoir est soufflé et projeté à 25 mètres. Aucun blessé n'est à déplorer. Les dégâts sont évalués à 1 million de francs.

N° 640 du 26/07/1988 - ARBENT (01)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Un incendie détruit un entrepôt de peintures, vernis et solvants. Aucune conséquence n'est observée sur l'environnement. Les eaux d'extinction sont récupérées et traitées.

N° 765 du 21/05/1989 - MONTATAIRE (60)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Un incendie dans un parc de 100 à 200 fûts contenant des résines en phase solvant provoque des dommages sur des bâtiments voisins internes à l'usine.

N° 845 du 22/07/1989 - LONS-LE-SAUNIER (39)

63.1 - Manutention et entreposage

Un incendie se déclare dans un entrepôt de peintures et solvants. 7 maisons évacuées sont détruites et 2 pompiers blessés.

N°1 873 du 18/04/1990 - SAINTES (17)

26.1 - Fabrication de verre et d'articles en verre

Un incendie se déclare dans un atelier d'une société spécialisée dans la sérigraphie sur bouteilles, au moment où le film plastique recouvrant une palette est rétracté à la chaleur, au moyen d'un pistolet à gaz. Le sinistre se propage à des solvants. Une explosion se produit dans le stockage des solvants. 200 m² d'atelier et 180 000 bouteilles sont détruits par les flammes.

N° 1 912 du 03/05/1990 - LIMAY (78)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Un incendie se déclare dans un dépôt de peinture situé dans la zone portuaire de Limay. Il est combattu par 200 pompiers : 2 sont blessés au cours de l'intervention. Le bâtiment de 3 200 m² contenant 150 tonnes de produits est entièrement détruit. La SEINE est polluée par un léger film irisant de 100 mètres de longueur et de 1 mètre de largeur sur les deux berges.

N° 2 215 du 28/09/1990 - AMIENS (80)

60.2 - Transport urbains et routiers

Dans une entreprise spécialisée dans la collecte et le transport de déchets toxiques , des fûts vides ayant contenu des solvants explosent. Deux blessés sont à déplorer, dont un dans un état grave.

N° 2459 du 12/12/1990 - SEGONZAC (16)

28.1 - Fabrication d'éléments en métal pour la construction

Un incendie se déclare dans un étalier de construction métallique. Le stock de solvants explose. Des plaques de polystyrène brûlent et dégagent une forte fumée et des émanations toxiques.

N° 2979 du 04/01/1991 - CALAIS (62)

24.1 - Industrie chimique de base

Une explosion suivie d'un incendie se produisent sur une cuve de solvants de 20 m³. Trois lances à mousse sont utilisées pour éteindre le feu. Aucun risque de pollution n'est constaté.

N° 2659 du 18/03/1991 - TALENCE (33)

74.4 - Publicité

A la suite d'un acte de malveillance, un incendie se déclare dans une entreprise spécialisée dans l'affichage longue conservation. Le dépôt de matériels (peinture, produits inflammables) et les ateliers de fabrication sont détruits par les flammes.

N° 3200 du 04/04/1991 - VOLVIC (63)

36.6 - Autres industries diverses

Un incendie détruit une fabrique de fleurs artificielles. Des détonations dues à des peintures et solvants se produisent lors de l'incendie.

N° 3337 du 28/05/1991 - SAINT-ANDRE-DE-CUBZAC (33)

36.1 - Fabrication de meubles

Un bidon de solvant explose au moment de son ouverture. Le feu se propage aux vêtements de l'ébéniste, puis dans l'atelier. L'ébéniste est grièvement brûlé au visage et aux mains. L'atelier de vernissage, de réserve de meubles d'acajou sont détruits par les flammes. Une grande partie de la toiture du bâtiment est endommagée par les flammes.

N° 3361 du 01/06/1991 - SENS (89)

24.6 - Fabrication d'autres produits chimiques

Un incendie se déclare dans un hangar de stockage de fûts de produits chimiques (dégraissants chimiques). Un épais nuage de fumée toxique se dégage. Les pompiers interviennent rapidement avec des moyens importants permettant de maîtriser l'incendie en 1 heure. La population est confinée à domicile pendant 3 heures. La CMIC Auxerre intervient.

N° 7767 du 05/07/1992 - SELLES (51)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Dans un établissement produisant des peintures et vernis, un camion arrache lors d'une manoeuvre une vanne sur stockage de solvant.

N° 3809 du 25/08/1992 - GRAULHET (81)

51.5 - Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Un incendie se déclare dans un entrepôt contenant 200 000 litres de solvants utilisés pour le traitement des peaux. Il engendre une série d'explosions et produit des flammes de 50 mètres de haut. De la fumée est visible à plus de 10 km. Des émanations toxiques sont émises dans l'atmosphère et des effluents se déversent dans la rivière LE DADOU. 170 pompiers, dont une CMIC, sont mobilisés. Un périmètre de sécurité de 500 mètres est mis en place et 5 fermes voisines sont évacuées. Des barrages sont installés sur le ruisseau. 5 000 litres de mousse sont répandus sur les cuves. 6 pompiers sont blessés dont 3 grièvement. Les dommages matériels s'élèvent à 1,5 MF.

N° 4416 - 06/04/1993 - BELGIQUE - 00 – MACHELEN

C20.30 - Fabrication de peintures, vernis, encres et mastics

Un feu se déclare vers 16 h lors du dépotage d'un camion-citerne de Thinner dans une usine de traitement et recyclage de solvants. L'établissement comporte environ 80 réservoirs d'une capacité variant de 5 à 90 m³ et des stockages de fûts. Les employés tentent en vain d'éteindre le sinistre avec une dizaine d'extincteurs à poudre dont 3 appareils mobiles de 50 kg. L'incendie se propage provoquant l'explosion de cuves de solvants. Une épaisse fumée noire et irritante, visible à des kilomètres, se dégage ; quelques personnes souffrent de difficultés respiratoires dont 6 sont hospitalisées pour des examens. Une centaine de riverain est évacuée. La circulation ferroviaire et routière ainsi que le trafic aérien sur l'une des pistes de l'aéroport national de ZAVENTEM sont interrompus ; la production d'une usine voisine est arrêtée pendant une demi-heure. D'importants moyens humains et matériels sont déployés pour maîtriser le sinistre. Le plan d'urgence régional est déclenché à 17h30. Malgré un approvisionnement en eau insuffisant jusqu'à 18h30, l'incendie est sous contrôle à 19h30. L'origine de l'accident n'est pas clairement établie ; la presse évoque l'électricité statique ou un échauffement de la pompe de transfert. Les installations sont gravement endommagées ; les dégâts sont évalués à 100 millions de francs belges. Douze employés sont en chômage technique.

N° 5506 du 23/06/1994 - EVRY (91)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Un incendie détruit un entrepôt de 2 300 m² appartenant à une entreprise spécialisée dans la fabrication de peintures et solvants. 95 000 litres de liquides inflammables (vernis, peintures, pâtes à bois, etc...) conditionnés en fûts de 0,75 à 5 litres sont détruits. Un hôtel situé à proximité est évacué durant les trois heures d'intervention des pompiers. Les bâtiments administratifs de 600 m² sont préservés. Les dommages matériels et les pertes de production s'élèvent à 21 MF.

N° 5518 du 29/06/1994 - BAZAS (33)

20.3 - Fabrication de charpentes et de menuiseries

Un feu d'origine criminelle se déclare dans un local de 36 m² d'une fabrique de portes isoplanes, abritant 6 tonnes d'apprêt à 22% d'acétate de butyle et d'éthyle. 3,2 tonnes de diluant à 50% de benzène, 15 tonnes d'apprêt à l'alcool et 6 m³ de diluant à 40% de toluène. Les pompiers et une CMIC interviennent durant 2 heures. Un pompier est légèrement brûlé. Les 45 m³ d'eaux d'extinction déversés dans les fossés limitrophes sont contenus par des batardeaux avant de rejoindre la BEUVE. Une recherche de toluène et de benzène est effectuée dans les fossés sans succès. Un autre incendie malveillant avec effraction est combattu à quelques heures d'intervalle à Grignols dans la même zone industrielle. Les dommages et pertes d'exploitation sont évalués à 1,2 MF.

N°6108 du 01/08/1994 - Les HERBIERS (85)

36.1 - Fabrication de meubles

Un incendie se déclare dans une fabrique de meubles. Lors de l'installation d'une nouvelle machine dans un atelier de vernissage en fermeture annuelle, des étincelles provenant d'une ébarbeuse enflamment des bidons de solvants présents dans l'atelier. Les pompiers parviennent à circonscrire l'incendie à la zone touchée en s'aidant des murs de maçonnerie séparant les différents locaux. Toutefois, 2 000 des 6 000 m² de l'usine sont détruits. Le coût de l'accident s'élève à 21 MF.

N°2404 du 23/08/1994 - La CHAMBRE (73)

24.1 - Industrie chimique de base

Un feu se déclare dans un bâtiment de stockage de solvants dans une usine chimique. Le POI est déclenché et la voie SNCF voisine est interrompue durant 17 minutes. Les agents de sécurité internes maîtrisent rapidement l'incendie à l'aide de mousse. L'alerte dure 30 minutes ; les secours extérieurs déplacés n'auront pas à intervenir. Cent vingt mètres carrés de toiture et 250 m³ d'oxyde de méthyle sont détruits. Cet accident a pour origine une mauvaise appréciation de la durée de transvasement et le débordement de quelques dizaines de litres de solvant pour une part dans la cuvette de rétention du stockage et, une autre part, par ruissellement à proximité d'un point chaud (tuyauterie de vapeur). Aucun blessé n'est à déplorer.

N°5793 du 25/08/1994 - DOMBLANS (39)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Dans une société de fabrication de peinture et vernis, un incendie se déclare dans un local de 100 m² où sont entreposés des fûts de solvants à retraiter. L'accident se produit alors qu'un cariste convoyait une palette de produits dans l'unité de stockage. L'incendie aurait été initié par le chariot élévateur lui-même. L'employé s'est extrait seul du local et a parcouru environ 120 à 150 mètres avant qu'un de ses collègues ne parvienne à éteindre ses vêtements en feu à l'aide d'une couverture. Grièvement brûlé au dos et au bras, il est hospitalisé dans un service spécialisé. Les pompiers se rendent maîtres du sinistre en 15 minutes et parviennent à récupérer les eaux d'extinction.

N°5967 du 11/11/1994 - TOMBLAINE (54)

15.8 - Autres industries alimentaires

Un incendie détruit la rotative de l'atelier d'imprimerie des emballages d'une usine de potages déshydratés. Cinq employés essayent de maîtriser les flammes apparues vers 7 h 15, mais l'incendie se propage rapidement à l'ensemble du bâtiment. Sous l'effet de la chaleur des bidons de solvants explosent et alimentent l'incendie. Les pompiers parviennent à le maîtriser au terme d'une heure de lutte. Cette annexe de la société est détruite et l'ensemble de la production est temporairement interrompue. Les dégâts matériels s'élèvent à 10 MF.

N°4219 DU 22/11/1994 - LIMAY (78)

90.0 - Assainissement, voirie et gestion des déchets

Un incendie détruit un entrepôt de 1 000 m² dans une usine de traitement de déchets industriels. Le sinistre concerne en particulier un parc à fûts (capacité unitaire inférieur à 1 000 litres) contenant des solvants divers (dégraissant automobiles, durcisseurs, produits phytosanitaires, etc ...). Une CMIC et 80 pompiers interviennent. L'incendie dure 2 heures mais aucune victime n'est à déplorer et les émissions atmosphériques mesurées dans l'environnement en sont pas toxiques. Aucune pollution des eaux n'est constatée, les eaux d'extinction incendie restant confinées dans un bassin prévu à cet effet. La chute d'un bidon de 30 litres, lors d'une opération de manutention, est à l'origine du sinistre.

N°5123 du 04/12/1994 - SAINTE-MARIE-AUX-MINES (68)

37.2 - Récupération de matières non métalliques recyclables

Dans une usine de recyclage de solvants, un incendie se déclare sur une cuve de 600 litres de solvant. Les pompiers le maîtrisent en 30 minutes.

N°6985 du 01/02/1995 - CHASSORS (16)

YY.0 - Activité indéterminée

Une étincelle produite par une disquette actionnée près d'un fût est à l'origine de l'incendie et de l'explosion d'un stock de solvant. Les secours protègent un entrepôt de pneus et deux ateliers voisins.

N°5602 du 28/02/1995 - ERSTEIN (67)

20.3 - Fabrication de charpentes et de menuiseries

Un incendie se déclare en milieu de matinée dans une menuiserie de 500 m² située en plein centre ville. Les 40 pompiers engagés, se doivent d'une part de protéger les habitations environnantes, et d'autre part de neutraliser un dépôt de solvants et d'hydrocarbures qui alimente l'incendie. Le feu est maîtrisé en début d'après-midi mais l'entreprise est totalement détruite. Les 22 employés sont en chômage technique.

N° 7225 - 29/07/1995 - FRANCE - 62 - BRUAY-LA-BUISSIÈRE

C22.29 - Fabrication d'autres articles en matières plastiques

Un incendie détruit 4 000 pare-chocs de voitures en polypropylène stockés à l'air libre dans des casiers métalliques. 70 pompiers interviennent. Outre l'extinction de l'incendie, ils procèdent à la préservation des ateliers voisins ainsi que des stockages de gaz et de solvants. Au cours de l'intervention, 5 pompiers sont légèrement blessés et hospitalisés. Les dégâts matériels et les pertes de production s'élèvent à 10,6 MF.

N°7196 du 24/07/95 - BLOTZHEIM (68)

25.2 - Transformation des matières plastiques

Un incendie détruit 5 000 m² de locaux dans une usine spécialisée dans le moulage de pièces en matières plastiques. Un énorme panache de fumée noire est visible à des km à la ronde. Le sinistre est circonscrit en 2 heures par 80 pompiers. Un employé incommodé par les fumées est hospitalisé. Les dommages sont très importants, la toiture de l'établissement, la plus grande partie des stocks et l'essentiel des machines sont détruits. Les dommages matériels s'élèvent à 155 MF et 200 employés sont mis au chômage technique. Les eaux d'extinction évacuées dans des puits perdus sont analysées. L'origine de l'accident est un fût de solvant non étanche, un nuage de vapeur s'est enflammé au contact du matériel électrique.

N°7485 du 27/09/1995 - LES MUREAUX (78)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Dans une usine retraitant des solvants de peinture, un violent incendie se déclare dans la nuit, au niveau d'une fosse enterrée de 15 000 litres, située sous un hangar à claire-voie et utilisée pour recevoir des diluants usagés livrés en petit conditionnement (30 litres). Des réservoirs aériens proches sont menacés. Le POI est déclenché et 100 pompiers (9 casernes) interviennent durant 30 minutes. Les dommages sont limités (fosse détruite). La présence d'un système de sécurité de type déluge n'a pu stopper le début d'incendie. Un pompier est blessé (entorse). Il n'y aura pas de chômage technique. Les eaux d'extinction et les émulseurs sont confinés dans une cuvette de rétention et aucune pollution n'est constatée. Un acte de malveillance n'est pas exclu.

N°8881 du 10/01/1996 - WASQUEHAL (59)

YY.0 - Activité indéterminée

Un déversement accidentel d'hydrocarbures et de solvant se produit à cause d'une accumulation d'égoutture due au nettoyage et dépotage des véhicules de l'entreprise. La MARQUE est polluée. Aucun traitement n'est installé sur le réseau d'égout pour la station de lavage, les eaux de voirie et les eaux sanitaires.

N°9996 du 22/04/1996 - MANTES-la-JOLIE (78)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Un violent incendie initié par la foudre se déclare dans une usine spécialisée dans la fabrication de peinture pour l'industrie automobile. Un atelier d'une superficie de 300 m² contenant les stocks de peinture, solvants vernis et résines est détruit. Attisé par un vent violent, le feu se propage à une entreprise voisine.

N°8702 du 30/04/1996 - AUDINCOURT (25)

34.3 - Fabrication d'équipements automobiles

Un chariot élévateur perce un fût contenant un solvant non halogène utilisé pour nettoyer du matériel de peinture. Le solvant se déverse sur le sol puis dans le GLAND par l'intermédiaire d'un collecteur des eaux pluviales. Un regard du réseau des eaux pluviales est neutralisé. Un barrage est installé sur le cours d'eau et un produit absorbant est utilisé. Un procès-verbal est dressé à l'encontre de l'exploitant.

N°8908 du 18/05/1996 - VAULX-en-VELIN (69)

51.6 - Commerce de gros d'équipements industriels

Pour une raison inconnue, une explosion suivie d'un incendie se déclare sur des fûts de 200 litres de solvants stockés à l'extérieur d'un entrepôt. Il s'en suit un imposant panache de fumées et une odeur nauséabonde. L'incendie est attisé par un vent violent. Les flammes menacent 5 grosses cuves de solvant. Un poids lourd appartenant à une société voisine est touché par les flammes. Les pompiers mettent en place un périmètre de sécurité et maîtrisent le sinistre en une heure. Des prélèvements sont effectués dans le sol et les égouts.

N°8983 du 30/05/1996 - AY (51)

17.5 - Autres industries textiles

Un incendie d'origine criminelle localisé simultanément en deux foyers distincts détruit l'entrepôt d'une usine textile de 1 000 m² abritant du tissu et de la moquette. L'alerte est donnée par un employé. La bouteille de gaz d'un chariot élévateur explose et projette un morceau de bardage métallique à 30 mètres. Des solvants et encres d'imprimerie également présents alimentent le feu. Le POI est déclenché au bout d'une heure. Une CMIC intervient. Une deuxième explosion d'origine inconnue se produit quatre heures plus tard. Un pompier et un employé sont légèrement intoxiqués. Les eaux d'extinction sont retenues dans une cuvette de rétention. L'accès au site est interdit devant le risque d'éboulement des murs et de la charpente. Des analyses air-eau sont effectuées.

N°9040 du 05/06/1996 - SURVILLIERS (95)

63.1 - Manutention et entreposage

Un incendie détruit un entrepôt de 200 m² abritant des fûts d'huile et solvant. Le feu se serait déclenché à la suite de la chute d'un fût de solvant et d'une étincelle. L'opérateur n'est que légèrement choqué.

N°10513 du 01/02/1997 - SANARY-sur-MER (83)

35.1 - Construction navale

Un incendie détruit en une demi-heure l'entrepôt de solvant d'un chantier naval. L'absence de prise d'eau à proximité oblige les secours à pomper l'eau dans la mer. Un pompier blessé au cours de l'intervention est hospitalisé. 45 employés sont mis en chômage technique.

N°10985 du 03/03/1997 - SAINT-LO (50)

73.1 - Recherche - développement en sciences physiques et naturelles

Dans un laboratoire départemental, un feu se déclare dans un local abritant des solvants et divers produits chimiques. Lors du sinistre, 30 employés sont évacués et 2 d'entre eux gravement brûlés sont hospitalisés.

N°11304 du 13/05/1997 - SAILLENARD (71)

24.6 - Fabrication d'autres produits chimiques

Dans une usine d'additifs chimiques pour le béton d'une superficie de 4 800 m², un solvant (mélange white spirit / MEC de point éclair : 0°C) s'enflamme au cours du remplissage de bidons de 30 litres par gravité. La cuve de fabrication et les bidons s'enflamment. Une superficie de 1 500 m² est incendiée. Un employé légèrement intoxiqué est hospitalisé. Un périmètre de sécurité de 1,5 km est mis en place. Une dizaine d'habitations sont évacuées. Une CMIC procède à des mesures de toxicité. Une expertise attribue l'accident à une décharge d'électricité statique créée par les vêtements de l'opérateur ; ce dernier avait constaté des décharges sans conséquence avant l'accident. Des mesures correctives sont proposées. Les produits chimiques polluent le TEUIL.

N°11605 du 01/06/1997 - SAINT-GREGOIRE (Canada)

36.1 - Fabrication de meubles

Une explosion survient dans une fabrique de meubles, blessant 8 des 30 employés, dont 5 gravement et détruisant 2 maisons voisines. Les vernis et solvants pourraient être à l'origine du sinistre.

N°10168 du 12/06/1997 - LA ROCHE-DE-DE-GLUN (26)

51.5 - Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles

Dans un entrepôt abritant des solvants à incinérer dans centre extérieur, un feu se déclare en fin de pompage de fûts dans un camion-citerne. Les fûts étaient habituellement pompés hors du bâtiment mal ventilé. Le sinistre est dû à la chaleur, aux produits déversés sur le sol et aux vapeurs générées en quantités qui ont dû être allumées par un chariot ou l'électricité statique. D'importants moyens interviennent durant 4 heures. Trois personnes, l'une brûlée à 80 %, sont hospitalisées. Le voisinage est évacué et un captage d'eau potable est arrêté. Des prélèvements dans la nappe phréatique sont effectués par crainte d'une pollution due aux eaux d'extinction (250 m³). Le dépôt détruit (500 m² / 1 MF), dont l'activité est réduite, allait être abandonné.

N°13505 du 01/09/1998 - PIERRE BENITE (69)

24.3 - Fabrication de peintures et vernis

Un feu se déclare pour une raison inconnue dans un entrepôt de solvants. Sur 1 tonne de produits impliqués, 3 à 400 kg se déversent dans les égouts. Une cellule antipollution intervient pour limiter les écoulements et nettoyer les secteurs pollués. L'intervention dure 45 minutes. Une entreprise extérieure incinère les déchets liquides récupérés (5,5 tonnes d'un mélange eau et hydrocarbures) Aucune victime n'est à déplorer. Les dommages matériels sont évalués à 1 500 kF.

N°14555 du 20/10/1998 - La FARLEDE (83)

24.6 - Fabrication d'autres produits chimiques

Dans une entreprise de conditionnement de bombes aérosols, un fût de 200 litres de solvant s'enflamme spontanément et provoque un incendie qui détruit toute l'entreprise. Une importante fumée noire se dégage au-dessus de la zone industrielle. Les risques d'explosion, la toxicité des substances entreposées (solvants, bouteilles de gaz, cuve de fréon) et les fumées toxiques rendent l'intervention des pompiers difficile. Une cellule des risques technologiques et des risques radiologiques interviennent sur place. Les dommages matériels sont de 3,6 MF.

N°14421 du 21/11/1998 - BONS-EN-CHABLAIS (74)

31.2 - Fabrication de matériel de distribution et de commande électrique

Dans une usine de fabrication de composants électroniques, un incendie survient sur des fûts de déchets d'huile de coupe et de dégraissant stockés à l'extérieur. Plusieurs fûts explosent. La propagation du feu se produit à l'usine adjacente et se limite au stockage de quelques matériaux.

N° 28084 - 21/09/2004 - FRANCE - 47 - MIRAMONT-DE-GUYENNE

YYY.YY - Activité indéterminée

Un feu de plastique se déclare vers 19h30 dans un atelier de peinture de 400 m². Les pompiers maîtrisent l'incendie et évitent sa propagation à une cuve de fuel et à des stockages de solvants et peintures avec 7 lances dont 1 à mousse. Une ronde de surveillance est effectuée vers minuit. Les dégâts dus à la fumée sont importants.

N° 34349 - 15/03/2008 - FRANCE - 77 - MITRY-MORY

C20.30 - Fabrication de peintures, vernis, encres et mastics

Un feu se déclare vers 18h40 dans une usine de fabrication d'encre au centre du magasin de matières premières et produits semi-finis. Il se développe rapidement. L'une des caméras de surveillance filme les premières fumées vers 18h45, puis des flammes sortent de la toiture 7 min plus tard. A leur arrivée à 18h59, les pompiers observent l'importante colonne de fumées noires et des flammes. L'entrepôt de 10 000 m² abritant divers produits chimiques (solvants, cadmium et plomb, acétone, acétate de méthyle, glycol, polymères...) est atteint. L'incendie menace de se propager à un bâtiment abritant une autre société. L'intervention mobilise une centaine de pompiers et 9 lances. Le feu est circonscrit à 21h38 tout en restant très violent. Les secours obturent les égouts et surveillent le bassin de rétention. A 22h33, le foyer principal baisse d'intensité et permet aux pompiers d'éviter toute propagation vers les laboratoires et les stockages de solvants. L'Inspection des Installations Classées se rend sur les lieux et le maire est prévenu. Le feu est éteint le lendemain vers 2h30. Une société spécialisée effectue des prélèvements d'eau et analyses qui révèlent une concentration importante en polluants écotoxiques (cétones, éthers de glycol, pyrrolidinone-éthényle, phenoxyethyl acrylate).

Les eaux d'extinction ne peuvent en l'état être déversées dans les égouts. L'exploitant les fait pomper par une entreprise afin de les détruire dans un centre d'incinération (bordereaux de suivi d'élimination transmis à l'Inspection), mais ces dernières se sont cependant déjà en partie écoulées dans le milieu naturel. Une vanne motorisée guillotine devait être mise en place en avril 2008. Le jour du sinistre, un système d'extinction automatique de type sprinkleur était en cours d'installation pour être mis en service 2 semaines plus tard. Prévu pour couvrir l'ensemble du site, il aurait permis d'éviter l'incendie ou tout au moins d'en limiter les conséquences.

Aucun blessé n'est à déplorer, mais 5 000 m² de bâtiment sont détruits, dont une zone de production de 2 000 m² ; le maire doit prendre un arrêté de péril au vu de l'instabilité de certaines structures. Ce sont au total 80 t de matières premières et de produits semi-finis qui ont été détruits, des milliers de m² contaminés sont à nettoyer, l'outil de production est partiellement hors d'usage (14 mélangeurs à restaurer dont 3 détruits) et les pertes sont évaluées à 3 millions d'euros. La reconstruction est prévue sur 1 an. Des mesures de chômage technique sont évitées de justesse.

N° 34780 - 29/06/2008 - FRANCE - 74 - LA ROCHE-SUR-FORON
E38.12 - Collecte des déchets dangereux

Un feu se déclare vers 16 h dans un centre de transit de déchets dangereux. Il concerne des fûts de solvants non chlorés et d'huiles usagées en provenance de l'industrie du décolletage. 50 fûts de 200 litres sont détruits mais le reste de l'établissement est préservé. Les stockages en citernes aériennes contenant du perchloréthylène sont préservés par un arrosage important des pompiers. Un important dispositif est déployé : 30 engins et 90 pompiers. Un périmètre de sécurité de 400 m est mis en place et 180 personnes sont évacuées. Le feu est éteint vers 20h. Des mesures de toxicité montrent qu'aucune émanation toxique n'a eu lieu. Aucune victime n'est à déplorer. Une fuite de la rétention dans laquelle sont stockées les eaux d'extinction d'incendie provoque la pollution par des hydrocarbures du ruisseau LE SION sur 4 km. Une forte mortalité piscicole est constatée. Les pompiers mettent en place 3 barrages pour stopper et récupérer les polluants mais l'opération est rendue difficile par un orage violent. L'exploitant pompe les eaux polluées avec des camions citernes. L'Inspection des Installations Classées se rend sur les lieux. Une enquête est en cours pour déterminer les causes de l'accident.

RAPPORT D'ÉTUDE

17 / 03 / 2014

Réf. : DRA-14-141478-03176A

Feux industriels solides – Partie B

**Description de la méthode de calcul des
effets thermiques produits par un feu
d'entrepôt**

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	3
1.1 Contexte	3
1.2 Organisation du document	3
2. ACCIDENTOLOGIE : DESCRIPTIF D'ACCIDENTS CARACTERISTIQUES..	5
2.1 Démarche.....	5
2.2 Analyse des accidents survenus dans des entrepôts.....	5
2.2.1 Les accidents ayant impliqué des stockages de matière combustibles	5
2.2.2 Les accidents ayant impliqué des liquides inflammables.....	6
2.2.3 Les accidents ayant impliqué des aérosols	6
2.2.4 Les accidents ayant impliqué des comburants	7
2.2.5 Les accidents ayant impliqué des bases et des acides	8
2.2.6 Les accidents ayant impliqué des engrais	8
2.2.7 Les accidents ayant impliqué des stockages de charbon	9
2.2.8 Les accidents ayant impliqué des peroxydes organiques.....	9
2.2.9 Les accidents ayant impliqué des solides facilement inflammables et des allumettes de sûreté	9
2.2.10 Les accidents orientés sur les possibilités de propagation de l'incendie 10	
3. DESCRIPTION DE LA METHODE ANTERIEURE.....	11
4. PRESENTATION DE LA METHODE FLUMILOG.....	13
4.1 Domaine d'application	13
4.2 Les grandes étapes de la méthode	15
5. DESCRIPTION DE LA METHODE FLUMILOG	19
5.1 Calcul des caractéristiques du combustible	19
5.1.1 Cas 1 : Palette de composition connue	20
5.1.1.1 Prise en compte des combustibles.....	20
5.1.1.2 Prise en compte des incombustibles	26
5.1.1.3 Prise en compte de la compacité dans le calcul de la puissance de l'incendie d'une palette.....	28
5.1.1.4 Durée de combustion de la palette	31

5.1.2 Cas 2 : Caractéristiques de palette obtenues expérimentalement	33
5.1.3 Cas 3 : Définition de palettes rubriques	33
5.1.4 Détermination des vitesses de propagation horizontale et verticale dans les racks.....	35
5.2 calcul de la propagation dans la cellule	37
5.2.1 Principe de la propagation du front de flamme dans la cellule	37
5.2.2 Calcul de la puissance au cours du temps de l'incendie	39
5.2.3 Loi de propagation entre les différents racks	40
5.2.3.1 Propagation par rayonnement	40
5.2.3.2 Le cas du flash over	42
5.2.4 Propagation au sein d'un rack	44
5.2.4.1 Propagation au sein d'un rack allumé par rayonnement.....	44
5.2.5 Calcul de la surface de recouvrement du combustible par la toiture	49
5.2.6 Limitation de la propagation en fonction de la concentration en oxygène	51
5.3 Calcul des caractéristiques des flammes	55
5.3.1 Choix de la forme de flamme	55
5.3.2 Hauteur de flammes.....	58
5.3.3 Prise en compte de l'effet du vent et Position de la flamme.....	61
5.3.4 Fraction radiative et Emittance des flammes	63
5.4 Calcul des effets sur l'environnement et prise en compte d'écran thermique	65
5.4.1 Evolution des parois.....	65
5.4.1.1 Caractéristiques d'une paroi	65
5.4.1.2 échauffement de la façade et flux thermique induit	66
5.4.1.3 Hauteur de la façade	68
5.4.2 Cas des Ecrans thermiques déportés : Merlons et zone de préparation dont la largeur est supérieure à la hauteur de la paroi.....	73
5.5 Cas de la propagation à 3 cellules.....	74
5.6 Détermination des flux maximums.....	78
6. COMPARAISONS AVEC L'EXPERIMENTAL	81
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	85
8. GLOSSAIRE	87
9. BIBLIOGRAPHIE.....	89
10. LISTE DES ANNEXES	91

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Cette partie B du référentiel oméga 2 traite de la modélisation des effets radiatifs issus des feux industriels de combustibles solides et présente, plus particulièrement, la méthode mise en œuvre dans le cadre de FLUMILOG pour les feux d'entrepôts.

1.2 ORGANISATION DU DOCUMENT

Le présent document est articulé autour des 4 parties principales suivantes :

- Accidentologie
- Descriptif de la méthode antérieure pour la modélisation des feux de solides,
- Présentation et description de la méthode FLUMILOG
- Comparaison méthode FLUMILOG/expérimentation.

2. ACCIDENTOLOGIE : DESCRIPTIF D'ACCIDENTS CARACTERISTIQUES

2.1 DEMARCHE

D'une manière générale, l'analyse des accidents passés est souvent riche d'enseignements. Elle permet de mettre en évidence les éléments caractéristiques d'un phénomène accidentel et particulièrement :

- les conditions d'occurrence,
- le type de produits impliqués,
- l'installation en question et son environnement.

L'objet de ce chapitre est de présenter une synthèse de l'analyse d'accidents de type « feux d'entrepôts » effectuée à partir des données disponibles.

La base de données utilisée a été constituée au fur et à mesure des travaux réalisés par l'INERIS dans le domaine des feux d'entrepôts.

Elle provient essentiellement :

- d'articles et de photos parus dans les revues spécialisées tels que Fire Prevention, Face au risque, Le Sapeur-Pompier, etc...
- de listes d'accidents extraites de la base de données ARIA du BARPI (Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles du MEDDE). Les listes de la base ARIA sont disponibles dans les annexes 1 à 7. Les numéros figurant dans les synthèses à suivre font référence aux accidents répertoriés dans ces annexes.

Dans le cadre du présent rapport, seuls les documents les plus pertinents ont été exploités.

2.2 ANALYSE DES ACCIDENTS SURVENUS DANS DES ENTREPOTS

Ce paragraphe a pour objectif de décliner les éléments généraux de l'accidentologie relevés à partir de l'analyse des accidents passés. Cette analyse a été réalisée pour différents types de combustibles pouvant être stockés en entrepôt.

2.2.1 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES STOCKAGES DE MATIERE COMBUSTIBLES

Une étude des accidents ayant impliqué des entrepôts de stockage de matières combustibles est disponible sur la base ARIA du BARPI. Les principaux enseignements de cette étude pour l'analyse des risques des installations sont repris ci-dessous :

- La quasi-totalité des accidents affectant des entrepôts sont des incendies (97%) ;

- Des effets domino de type propagation de l'incendie sont observés trois fois plus souvent pour les entrepôts que pour l'ensemble des accidents industriels ;
- Les entrepôts exploités par l'industrie chimique ne sont impliqués que dans 4% des sinistres ;
- Les causes sont principalement des actes de malveillance (28%), qui figurent également, probablement de manière significative, dans les causes inconnues ;
- Les autres principales causes sont la défaillance humaine (22%), la défaillance matérielle (36%) ;
- Les dommages pour l'entreprise (dommages matériels, perte d'exploitation, chômage) et l'extérieur (évacuation, dommages matériels) sont plus fréquents que dans l'ensemble des accidents industriels ;
- Des pollutions sont notées : air (11%), eaux de surface (2,4%), eaux souterraines et sols (1,4%) ;
- La protection par un réseau d'extinction automatique et/ou des exutoires de fumées et de chaleur est efficace, ainsi que le compartimentage ;
- La présence de matières plastiques dans un entrepôt rend l'intervention difficile et occasionne des dégâts importants ;
- Généralement, le sinistre est difficile à maîtriser et les pompiers se contentent de protéger les stocks ou les installations voisines de l'incendie ;
- Les moyens en eau s'avèrent souvent insuffisants pour l'intervention.

2.2.2 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES LIQUIDES INFLAMMABLES

Le principal risque concernant ces produits est l'incendie. Il peut se produire suite à un épandage accidentel ou par propagation d'un départ de feu indépendant.

Les accidents de ce type se caractérisent par une propagation très rapide du sinistre et un incendie violent (voir ANNEXE 1). Les effets à redouter sont les effets thermiques et les fumées qui sont parfois visibles sur plusieurs kilomètres.

2.2.3 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES AEROSOLS

Depuis la fin des années 80, plusieurs incendies ont détruit des stockages de générateurs d'aérosols, tant en France qu'à l'étranger. L'ANNEXE 2 présente les comptes-rendus de plusieurs incendies de stockages contenant des générateurs d'aérosols, d'où il ressort que :

- La plupart des accidents se sont produits au cours de l'activité de stockage dans des entrepôts ou magasins de détail, où les produits et marchandises stockés n'étaient pas uniquement des générateurs d'aérosols ;
- Tous ces incendies ont provoqué des dégâts matériels très importants (généralement la destruction complète des entrepôts) et ont également, parfois, fait des victimes ;
- Les atteintes à l'environnement naturel semblent relativement limitées ;

- Les fumées sont noires et peuvent gêner la visibilité dans un environnement proche du site ; hormis pour les personnes qui interviennent, aucune intoxication n'est constatée ;
- La rapidité de la propagation des incendies dans les bâtiments incriminés, liée incontestablement à la nature des produits contenus dans les générateurs d'aérosols (gaz liquéfiés et alcools) est un élément caractéristique de ce type d'événement ;
- L'incendie se propage en partie par la projection des générateurs d'aérosols. Les distances de projection peuvent être significatives et atteindre quelques dizaines de mètres (une distance d'une trentaine de mètres semble être le maximum observé) ;
- Ces incendies se caractérisent par un flux thermique rayonné très intense et des conditions d'extinction particulièrement difficiles (provoquant des blessés parmi les pompiers) ;
- Il n'a pas été observé de dégâts externes liés à des surpressions (tels que ruptures de vitres ou problèmes auditifs pour les riverains) ;
- Dans plusieurs cas, le début de l'incendie a eu pour lieu la remorque d'un camion en cours de chargement ou déchargement. Le feu s'est ensuite propagé au local de stockage par projection de boîtiers ;
- Il semble également que plusieurs de ces incendies aient commencé par la perforation d'un ou plusieurs générateurs (par la fourche de l'engin utilisé pour la manutention des palettes) et par l'inflammation de la fuite de gaz résultant de cette perforation. Cette inflammation pourrait avoir comme origine, par exemple, soit le fonctionnement de l'engin de manutention soit le mécanisme même de la rupture du générateur (échauffement par frottement).

2.2.4 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES COMBURANTS

Le seul retour d'expérience vraiment conséquent dont dispose la base ARIA concerne les produits agricoles et en particulier le chlorate de soude. Mélangé à d'autres produits à risque (engrais, acides..), il peut provoquer de très violentes explosions comme l'attestent deux accidents présentés en ANNEXE 3.

Concernant le stockage palettisé de tels produits, aucun retour d'expérience représentatif n'est disponible à notre connaissance. De ce fait, la recherche ARIA a été élargie à toutes les activités en prenant compte tous les accidents impliquant un « comburant » (ANNEXE 3).

Cette recherche montre que le produit le plus souvent impliqué est le chlore utilisé comme détergent pour piscines. La fabrication de ces pastilles fait notamment intervenir de l'acide trichloroisocyanurique dont la réaction avec l'eau est dangereuse. En effet, cette hydrolyse peut provoquer un départ de feu et produit des gaz chlorés toxiques.

Les enseignements fournis par ces quelques accidents confirment que les comburants ne doivent pas être mélangés à d'autres substances. Les conséquences possibles d'association avec des produits incompatibles ou d'incendie sont l'émission de fumées toxiques, un encouragement de l'incendie, voire une explosion selon le comburant (chlorate de soude notamment). Il convient également de prévenir tout épandage de ces produits.

2.2.5 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES BASES ET DES ACIDES

Concernant les cibles humaines, ces produits se décomposent en fumées irritantes voire toxiques lorsqu'ils sont pris dans un incendie. En cas d'épandage, il faut éviter tout contact avec le corps et ce même en intervention comme en attestent les brûlures légères reçues par des pompiers (ANNEXE 3) et provoquées par les eaux acides.

Ces produits se caractérisent par un fort potentiel de danger de pollution environnementale. En particulier, les exemples d'accidents présentés en ANNEXE 3 montrent que lors d'un incendie les eaux d'extinction sont susceptibles de polluer des grandes rivières ou fleuve (Meurthe, Moselle, Seine). Bien évidemment, les acides et les bases sont susceptibles de modifier fortement le pH des eaux de surfaces potentiellement touchées par une telle pollution. Il est donc important de prévoir des capacités de rétention suffisante.

2.2.6 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES ENGRAIS

Les incendies d'engrais produisent généralement d'abondantes fumées toxiques. Les exemples présentés en ANNEXE 4 font état d'irritations - nécessitant parfois une hospitalisation - pour les personnes exposées, ce qui explique la mise en place de périmètres de sécurité. Ainsi, les deux premiers exemples de l'ANNEXE 4 font état d'un périmètre de sécurité de 800 m. Les routes voisines sont généralement coupées et parfois des évacuations de personne sont nécessaires.

Le premier accident (n°22083) est particulièrement pertinent dans le cadre de cette étude car il est bien documenté et a affecté une installation similaire : un entrepôt de 6 500 m². 15 à 18 tonnes de substances soufrées ont été impactées par les flammes et 20 tonnes en stockage sur palettes mises en contact avec l'eau. 4 tonnes de sulfate d'ammonium en palettes ont également été prises dans l'incendie. L'incendie a produit un épais panache de fumées noires qui a dérivé sur 3 km à 200 m du sol. Seules des irritations passagères sont à déplorer au niveau de la population. L'incendie a été maîtrisé en moins de 2 heures mais a continué à brûler sous contrôle 3 heures de plus.

Les principaux potentiels de danger sont les fumées toxiques, particulièrement nitrates et composés soufrés, puis les eaux d'extinction.

Les difficultés d'intervention soulignent la nécessité de connaître précisément la nature des produits stockés, mais également les réseaux pour confiner les eaux d'extinction.

2.2.7 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES STOCKAGES DE CHARBON

Les accidents répertoriés sur ce type d'activité sont peu nombreux, seuls 3 sont rapportés en ANNEXE 5. L'accident n°25350 ne se rapporte pas au stockage palettisé mais permet de relever que le charbon absorbe une partie des eaux d'extinction. L'accident le plus représentatif pour cette étude est le n°23267 car il s'agit d'un incendie ayant affecté un entrepôt de 6 600m² (3 cellules) contenant notamment un stock de charbon. L'incendie a nécessité le déploiement de 60 pompiers munis de 2 lances canon et 6 grosses lances (pompage dans la Seine) pendant 6 heures.

Cet accident est particulièrement intéressant car il montre que même avec des moyens d'intervention importants (vraisemblablement de 300 à 400 m³/h selon nos estimations), l'incendie a duré plusieurs heures et a notamment détruit une cellule entière. Ceci illustre qu'un incendie de charbon dure longtemps et est difficile à éteindre.

L'accident n°20567 confirme cette analyse : 3 heures de lutte ont été nécessaires à 20 pompiers pour circonscrire un incendie sur un stock de charbon. 600 palettes, soit 100 tonnes de charbon ont été brûlées.

2.2.8 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES PEROXYDES ORGANIQUES

Les exemples d'accidents décrits en ANNEXE 6 montrent que le principal risque lié au stockage de peroxydes organique est lié à leur instabilité, et à leur caractère explosible, certains de ces produits présentant un grand potentiel d'auto inflammation.

Certaines familles de peroxydes organiques contiennent par ailleurs du chlore, et peuvent dégager de l'acide chlorhydrique lors de la décomposition thermique du produit, rendant plus délicate l'intervention des équipes de secours.

2.2.9 LES ACCIDENTS AYANT IMPLIQUE DES SOLIDES FACILEMENT INFLAMMABLES ET DES ALLUMETTES DE SURETE

Le principal risque lié à ces produits est l'incendie. La plupart des accidents ayant impliqué des liquides inflammables ont également impliqué des solides inflammables. On ajoutera à ces accidents l'incendie du 2 Août 2000 à Niort, d'après la base ARIA du BARPI :

*« Un incendie se déclare dans un entrepôt de 200 m². Les flammes sont alimentées par des produits très inflammables. **La présence d'une porte REI 120 se révèle efficace, empêchant la propagation du feu à tout le magasin et à un garage mitoyen.** L'incident serait d'origine criminelle (vitre brisée). »*

Le risque lié à ces produits est la destruction des installations par l'incendie. Tout comme pour les liquides inflammables, un tel accident se caractérise par une propagation très rapide du sinistre et par un incendie violent. Les effets à redouter sont principalement les effets thermiques mais également les fumées, parfois visibles sur plusieurs kilomètres.

2.2.10 LES ACCIDENTS ORIENTES SUR LES POSSIBILITES DE PROPAGATION DE L'INCENDIE

D'autre part, l'accidentologie des incendies de stockage de produits combustibles met en valeur l'efficacité des parois coupe-feu pour ce type d'incendie. On se réfèrera, par exemple, aux incendies de Neuilly-en-Thelle ou de Plozevet où les parois coupe-feu ont permis de circonscrire l'incendie et de protéger certaines installations critiques, comme par exemple l'installation de réfrigération à l'ammoniac dans le cas de Plozevet.

Dans les différents sinistres reportés en ANNEXE 7, les murs coupe-feu, associés à l'action des secours extérieurs ont permis de contenir l'incendie dans la zone délimitée par les murs coupe-feu, et ceux au delà de deux heures.

3. DESCRIPTION DE LA METHODE ANTERIEURE

L'objet de ce chapitre n'est pas de décrire de manière précise la façon dont étaient modélisés les effets thermiques dans le cas d'un feu de solide avant le développement de la méthode FLUMILOG, mais de décrire les grandes lignes de cette ancienne méthode tout en soulignant les limites de celle-ci qui ont conduit à développer une nouvelle approche.

Comme décrit dans la version précédente du rapport Ω2, pour traiter les feux d'entrepôts, l'INERIS utilisait l'outil FNAP, outil développé en interne et dédié initialement aux feux de liquides comme décrit dans la partie A du présent rapport.

Pour mémoire, il est basé sur un modèle dit de la flamme solide qui repose notamment 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 (un parallélépipède). La base de ce volume correspond alors à la base du feu (la cellule de l'entrepôt) et sa hauteur la hauteur pour laquelle la flamme est visible 50% du temps.

Le modèle utilisé est un modèle à une zone, ce qui signifie que la flamme est supposée rayonner de manière uniforme sur toute sa hauteur. Cela revient à considérer une température de flamme et une composition homogènes sur toute la hauteur de la flamme.

Pour caractériser la géométrie de la flamme, il était indispensable de déterminer entre autres :

- la surface de la base de la flamme,
- sa hauteur.

Concernant la surface de la flamme, l'hypothèse était faite que la totalité de la cellule de l'entrepôt est en feu et donc que la surface de la base de la flamme est la surface de la cellule.

La hauteur de flamme était obtenue à l'aide de corrélations issues de la littérature présentées dans l'étude bibliographique sur les feux de liquides¹. Ces corrélations font intervenir une vitesse de combustion qui est généralement déterminée expérimentalement. Comme ces corrélations sont utilisées généralement en dehors de leur domaine de validité, les hauteurs ainsi calculées peuvent apparaître non réalistes. Dans ces cas, l'INERIS limitait de manière forfaitaire cette hauteur à trois fois la hauteur de l'entrepôt de manière conservative.

¹ Ces corrélations sont décrites dans la Partie A de ce présent rapport.

Comme pour la hauteur de flamme, le pouvoir émissif moyen était particulièrement délicat à déterminer. Il pouvait être obtenu :

- soit par bilan énergétique, ce qui nécessite alors de connaître la fraction radiative du feu,
- soit en utilisant des corrélations, mais elles sont établies pour des feux d'hydrocarbures,
- soit en s'appuyant sur des essais, qui ne pouvaient être qu'à petite échelle par rapport aux entrepôts.

L'INERIS était généralement amené à prendre des valeurs moyennes comprises entre 20 et 40 kW/m² suivant le type de produits stockés.

Cette démarche simplifiée présentait un certain nombre de limites :

- La propagation du feu n'était pas prise en compte ; l'incendie était supposé généralisé de manière prudente,
- Le volume de la flamme était assimilé à un parallélépipède,
- Le mode de stockage n'était que partiellement pris en compte et la compacité n'était pas considérée. La vitesse de combustion était prise plus ou moins forte suivant le stockage ce qui in fine n'avait que peu d'effet puisque la hauteur de flamme était limitée à trois fois la hauteur de l'entrepôt,
- Les corrélations utilisées étaient basées sur des feux surfaciques et non tridimensionnel. Ainsi, la hauteur de stockage ne pouvait pas être prise en compte,
- Les phénomènes de grande échelle n'étaient pas traduits dans les corrélations des hauteurs de flamme ni dans la détermination du pouvoir émissif de la flamme,
- Comme écran au rayonnement, seuls les murs coupe-feu ou les écrans déportés de type merlon étaient considérés. Il était impossible de prendre en compte la cinétique d'effondrement des murs coupe-feu.

4. PRESENTATION DE LA METHODE FLUMILOG

4.1 DOMAINE D'APPLICATION

Avant le projet FLUMILOG, les distances d'effets thermiques associées aux incendies d'entrepôt, étaient basées sur des méthodes de calcul « simples ». Comme décrit au chapitre précédent, certains fondements reposaient essentiellement sur des essais réalisés avec des feux de liquides type hydrocarbures. De fait, les différents experts et bureaux d'études avaient développé leurs propres modèles pour prendre en compte les différentes caractéristiques des entrepôts dans le calcul des flux rayonnés. Les hypothèses de modélisation différaient ainsi généralement d'un bureau d'études à l'autre. Ces différences étaient souvent à l'origine de discussions longues et parfois stériles qui constituaient un obstacle à l'avancement de l'instruction des dossiers et qui compliquaient la définition technique de l'entrepôt.

Par ailleurs, au regard des enjeux pour les riverains mais également pour l'exploitant, les distances d'effet doivent être déterminées aussi précisément que possible afin de ne pas conduire ni à les sous-estimer, ce qui pourrait être néfaste pour la pérennité de l'investissement, ni à les surestimer grandement ce qui conduirait à se priver de surfaces constructibles nécessaires à la poursuite des activités modernes.

Les trois centres techniques, parties prenantes du projet FLUMILOG, CNPP, CTICM et INERIS, auxquels se sont ensuite associés l'IRSN et EFECTIS France, avaient déjà une grande expérience de la modélisation pour la résolution de problèmes thermiques complexes et ont chacun effectué des études à différentes échelles dans le domaine concerné ou des domaines connexes de sécurité incendie. Ils ont mis en commun leurs ressources pour développer une méthode de calcul afin qu'elle serve de référence pour déterminer les distances associées aux effets thermiques d'un incendie d'entrepôt (telle que la détermination des distances dites SEI, SEL et SELS). Cette méthode prend en compte les paramètres prépondérants dans la construction des entrepôts afin de représenter au mieux la réalité. La méthode est étayée par des résultats expérimentaux de référence obtenus dans le cadre du projet Flumilog.

Ces résultats expérimentaux permettent de compenser le peu de travaux de recherche qui ont été effectués de par le monde sur les feux de solides à grande échelle. Au cours de ce projet, plusieurs essais à moyenne échelle (100 m²) ont été réalisés et ont servi de base pour la définition des hypothèses principales de la méthode. Cette méthode a ensuite été confrontée à la réalité d'un essai à grande échelle (850 m²), essai qui constitue une première mondiale.

Ce projet se veut avant tout fédérateur et, de fait, il réunit les principaux acteurs majeurs dans le domaine de la maîtrise des risques et de la sécurité incendie industrielle (CNPP, INERIS, CTICM, IRSN, EFECTIS-France) associé aux

professionnels de l'immobilier d'entreprise au travers l'association AFILOG et de GSE pour la partie construction des dispositifs expérimentaux.

Parmi les contributeurs au projet, il faut également citer pour les investissements pour la construction des expérimentations, Arcelor-Mittal et Platre Lafarge ou pour les apports financiers, S.C.M.F., Cibex, Michelin, Kuehne&Nagel, Gazeley, Gecina, Gefco, Gicram, Nexity, Panhard, Poudreed et PRD. Ces différents partenaires forment un consortium représentatif et spécialiste de la maîtrise des risques, dans le secteur des aménagements, bâtiments et capacités d'accueil logistiques.

Il convient par ailleurs de souligner qu'une suite à été donnée à ce projet au travers de la convention FLUMILOG 2. Cette convention a pour objectif de permettre de faire vivre et évoluer la méthode développée dans le cadre du projet FLUMILOG en la confrontant de manière permanente aux nouveaux besoins et enjeux du monde de la logistique.

La méthode développée concerne principalement les entrepôts entrant dans les rubriques 1510, 1511, 1530, 2662 et 2663 de la nomenclature ICPE et plus globalement contenant des produits des rubriques comportant des combustibles solides.

L'application de cette méthode, imposée par la réglementation pour les entrepôts soumis à enregistrement pour la rubrique 1510, s'inscrit également dans le cadre des études de dangers à réaliser pour les installations soumises à autorisation. Dans les entrepôts de matières combustibles, l'analyse des risques conduit, en général, à identifier l'incendie généralisé à une cellule comme scénario dimensionnant. Il est toutefois nécessaire de prendre en compte l'hypothèse d'une propagation du feu aux cellules voisines.

Les conséquences pour l'environnement relatives à un incendie généralisé concernent :

- le rayonnement thermique émis par les flammes et reçu à distance par des cibles potentielles : personnes, installations ou bâtiment tiers,
- la composition des fumées et leur dispersion dans l'atmosphère.

Ce second point, qui doit être étudié dans le cadre d'une étude de dangers, n'est pas traité dans le présent document car il fait l'objet d'un rapport spécifique (Rapport Ω16- INERIS – DRA – N° 46055-CL57149).

De fait, seules les distances d'effet associées aux effets du flux thermique reçu sont déterminées dans le cas d'un scénario d'incendie qui va se généraliser à la cellule. Il est considéré dans ce cas que :

- Les moyens d'extinction n'ont pas permis de circonscrire le feu dans sa phase d'éclosion ou de développement (hypothèse majorante) ;
- La puissance de l'incendie va évoluer au cours du temps ;

- La protection passive, constituée par les murs séparatifs coupe feu* qui isolent les cellules entre elle, est considérée suffisante pour éviter la propagation de l'incendie aux autres cellules et constituer une barrière sur laquelle les services de secours pourront s'appuyer pour maîtriser l'incendie de la cellule en feu et protéger les cellules voisines. Il appartient néanmoins à l'exploitant de démontrer que les dispositions prises permettent de se placer dans cette situation.

Dans le cas où la propagation à d'autres cellules ne pourrait être évitée et qu'il faudrait de fait en calculer les effets, la méthode décrite permet de traiter cette situation à partir du calcul réalisé pour chaque cellule prise individuellement. Ce point est détaillé au paragraphe 5.5.

Cette méthode de calcul est applicable aux cas des entrepôts à simple rez-de-chaussée ou au dernier niveau d'entrepôts multi-étagés.

4.2 LES GRANDES ETAPES DE LA METHODE

La méthode proposée pour déterminer les flux thermiques associés à un incendie d'entrepôt se démarque sensiblement de celles utilisées jusqu'à présent. En effet, les méthodes employées ne considéraient pas l'évolution temporelle de l'incendie. Les distances d'effet étaient déterminées en supposant l'incendie instantanément généralisé à une cellule avec un effacement total du toit et un effacement total ou partiel des parois selon les hypothèses de la méthode de l'organisme en charge de l'étude. De plus, les valeurs considérées pour calculer les effets avaient un caractère global pour tout l'entrepôt, vitesse de combustion par exemple, et ne prenait pas non plus en compte le mode de stockage utilisé dans la cellule, rack ou masse par exemple.

Compte tenu des évolutions réglementaires en cours avec notamment une prise en compte accrue de la cinétique du phénomène (Circulaire du 8 juillet 2009), il est apparu essentiel de développer une méthode qui puisse répondre au mieux à ces évolutions.

De fait, la méthode développée permet de modéliser l'évolution de l'incendie depuis l'inflammation jusqu'à l'extinction par épuisement du combustible. Elle prend en compte le rôle joué par la structure et les parois tout au long de l'incendie : d'une part lorsqu'elles peuvent limiter la puissance de l'incendie en raison d'un apport d'air réduit au niveau du foyer et d'autre part lorsqu'elles jouent le rôle d'écran thermique plus ou moins important avec une hauteur qui peut varier au cours du temps. Les flux thermiques sont donc calculés à chaque instant en fonction de la progression de l'incendie dans la cellule et de l'état de la toiture et des parois.

La méthode permet également de calculer les flux thermiques associés à l'incendie de plusieurs cellules dans le cas où le feu se propagerait au delà de la cellule où l'incendie a débuté. En effet, en fonction des caractéristiques des cellules, des produits stockés et des murs séparatifs, il est possible que l'incendie généralisé à une cellule se propage aux cellules voisines. Les différentes étapes de la méthode sont présentées sur le logigramme ci-après :

- Acquisition et initialisation des données d'entrée :
 - données géométriques de la cellule, nature des produits entreposés, le mode de stockage.
 - détermination des données d'entrées pour le calcul : débit de pyrolyse en fonction du temps, comportement au feu des toitures et parois...
- Détermination des caractéristiques des flammes en fonction du temps (hauteur moyenne et émittance). Ces valeurs sont déterminées à partir de la propagation de la combustion dans la cellule, de l'ouverture de la toiture.
- Calcul des distances d'effet en fonction du temps. Ce calcul est réalisé sur la base des caractéristiques des flammes déterminées précédemment et de celles des parois résiduelles susceptibles de jouer le rôle d'obstacle au rayonnement.

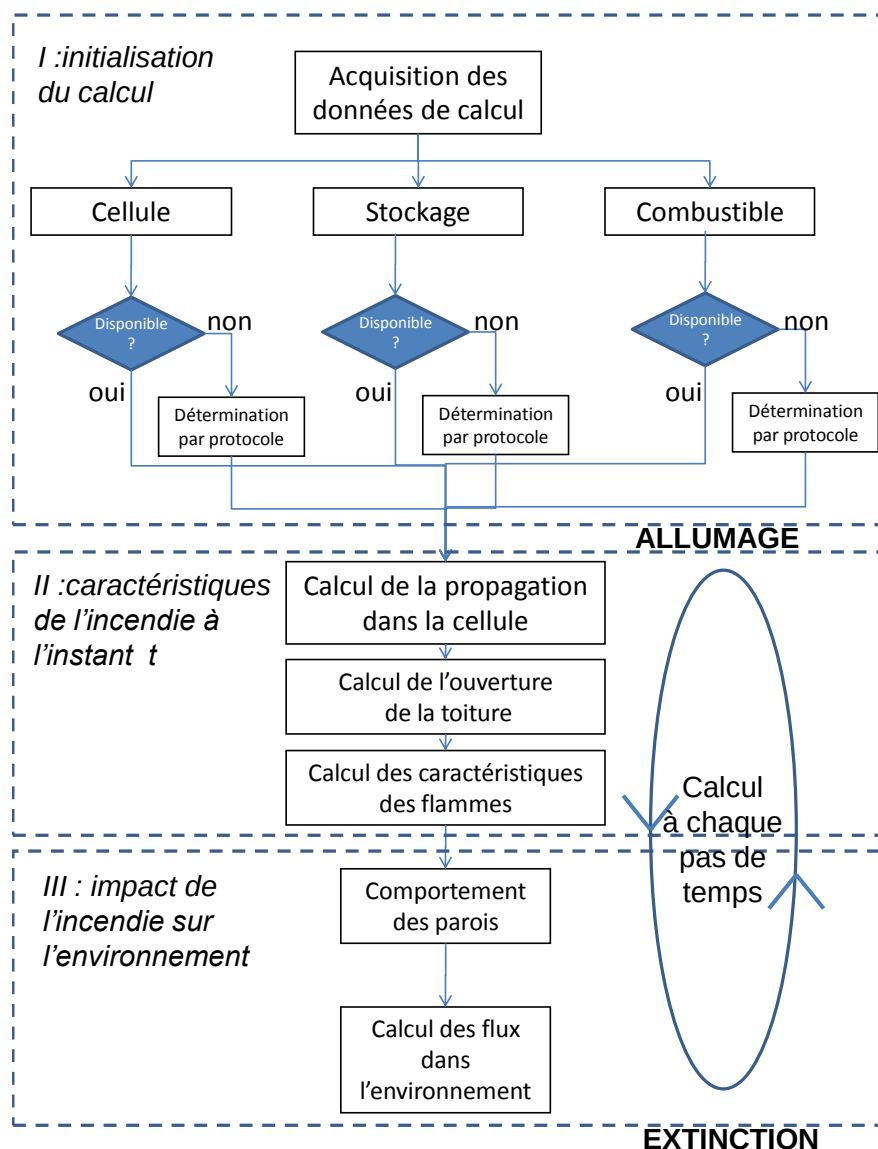


Figure 1 : principe de la méthode

Chacune de ces étapes est détaillée dans les paragraphes qui suivent.

En préalable, il est important de préciser que le nombre de données d'entrée nécessaires à tout calcul avec cette méthode est relativement important. Celles-ci sont présentées dans l' ANNEXE 8. La plupart de ces données sont relatives à des caractéristiques de l'entrepôt ou des produits qui y sont stockés (dimensions, nature des parois, nature des combustibles). En particulier, dans l'hypothèse où les caractéristiques des palettes ne seraient pas connues car se démarquant des cas « standards », un protocole de détermination de ces données est proposé.

5. DESCRIPTION DE LA METHODE FLUMILOG

5.1 CALCUL DES CARACTERISTIQUES DU COMBUSTIBLE

Le débit calorifique ou la puissance thermique surfacique émise lors d'un feu de cellule dépend d'une part de la composition du combustible stocké et d'autre part de la ventilation du foyer. L'influence de la ventilation sur la puissance sera détaillée au chapitre suivant qui traite plus particulièrement de la propagation du feu au sein de la cellule.

Les paramètres directement liés aux produits stockés et ayant une influence sur la puissance surfacique sont :

- leur composition en matériaux combustibles (bois, PE, carton,...),
- leur composition en matériaux incombustibles (acier, eau,...),
- leur compacité (état de division),
- leur conditionnement et emballage.

Par ailleurs, d'autres paramètres ont une influence sur la surface affectée, ils sont liés :

- au mode de stockage : masse, racks,
- à la hauteur de stockage.

La prise en compte de ces derniers paramètres sera également décrite au niveau du chapitre sur la modélisation de la propagation du feu au sein de la cellule.

Le point de départ de la modélisation par la méthode Flumilog est la puissance dégagée par la palette, $P_{palette}$ et le temps de combustion de cette palette t_{comb_pal} . Comme décrit plus loin dans ce document, la puissance dégagée est supposée constante pendant toute la durée de combustion de la palette.

Il existe, dans la méthode FLUMILOG, trois façons de procéder pour évaluer cette puissance palette :

1. La puissance de la palette est déterminée à partir de la composition de la palette en supposant toujours que la non-compacité favorise la combustion (CARRAU, 2003). Pour mémoire, la compacité est définie comme le ratio entre le volume de matière et le volume total de la palette. La compacité est de 1 dès lors qu'il n'y a pas ou peu d'air. La compacité à elle seule ne suffit pas à déterminer si la combustion va être accélérée ou pas par la présence d'air dans la palette. En effet, il faut connaître également l'état de division du combustible : une bûche en bois brûle beaucoup moins bien qu'un arrangement d'allumettes de même masse. L'état de division étant difficile à connaître a priori, le parti a donc été pris de considérer que cet état de division était favorable au développement de la combustion. Le coefficient multiplicateur retenu est celui obtenu expérimentalement avec du combustible fortement divisé (palette de bois lors de l'essai à échelle 1 FLUMILOG).

La présence d'incombustibles dans la palette, présence d'eau par exemple, est prise en compte via leur capacité à absorber une partie de la chaleur dégagée. Ce mode de calcul de la puissance palette est décrit au § 5.1.1.

2. Compte tenu des hypothèses formulées précédemment ou de l'absence de données relatives à certains produits, il peut être nécessaire de réaliser des essais de caractérisation de la combustion. Dans ce cas, un protocole d'essais permet de caractériser plus finement la puissance dégagée par l'incendie de la palette en la mesurant dans deux situations particulières : avec et sans agression externe. L'agression externe à considérer doit fournir une puissance du même ordre de grandeur que la puissance qui aura été mesurée lors de l'essai sans agression externe. La valeur la plus sévère doit être retenue. Ce protocole est évoqué au § 5.1.2. Le détail de ce protocole est présenté dans le document DRA-11-121125-05992A.
3. Pour les entrepôts en blanc, ouvert à tous types de produits d'une rubrique, des palettes enveloppes ont été définies. Pour ces palettes dites « rubriques », les valeurs retenues pour la puissance et la durée de combustion palette ont été déterminées en retenant une composition minimale en combustibles ou incombustibles de manière à être représentatif de la rubrique considérée. Cette composition minimale représente une centaine de kilogrammes et elle est complétée de façon aléatoire avec les produits restants dans certaines limites qui dépendent de la rubrique concernée. Pour chacune des rubriques, ce sont plusieurs milliers de compositions qui ont été testées afin de rechercher la courbe enveloppe de puissance. Les détails de ces calculs sont fournis dans le § 5.1.3.

Ces trois approches sont décrites successivement dans les paragraphes suivants.

5.1.1 CAS 1 : PALETTE DE COMPOSITION CONNUE

Les caractéristiques à prendre en compte pour tous les types de combustibles, sont :

- pour la puissance dégagée par une palette :
 - la vitesse de combustion moyenne surfacique,
 - la chaleur de combustion moyenne,
 - la durée de combustion de la palette.

5.1.1.1 PRISE EN COMPTE DES COMBUSTIBLES

Au final, la formule générale pour calculer la puissance d'un incendie de palette est la suivante :

$$P_{palette} = V_{comb_palette} S_{sol_palette} \Delta H_{comb_palette} \eta - Puissance_{absorbée}$$

Où η est le rendement de combustion, pris par défaut et de manière prudente égal à 1, et $S_{sol_palette}$ est la surface au sol de la palette. $Puissance_{absorbée}$ est l'énergie absorbée par les incombustibles divisée par la durée de combustion de la palette $t_{comb_palette}$. Cette dernière valeur est calculée par itération successive en fonction de la quantité de chaque composant (combustible et incombustible).

La puissance palette ainsi calculée doit toutefois être modulée en fonction des caractéristiques de la palette et notamment la compacité. Les paragraphes suivants décrivent les paramètres utilisés pour moduler cette puissance.

Cette valeur est ensuite utilisée pour déterminer la puissance surfacique enveloppe des racks instantanée à partir de la surface en feu.

La chaleur de combustion moyenne est déterminée pour chaque palette par la moyenne des chaleurs de combustion pondérée par la masse des différents composants.

$$\Delta H_{comb_palette} = \frac{\sum_{comb_i} M_{comb_i} \Delta H_{comb_i}}{\sum_{comb_i} M_{comb_i}}$$

Où ΔH_{comb_i} : Chaleur de combustion de chaque combustible (MJ/kg).

M_{comb_i} : Masse de chaque combustible (kg).

Le Tableau 1 présente les valeurs de chaleur de combustion de produits fréquemment rencontrés dans les entrepôts. Le bois se trouve sous forme de palettes ou encore de meubles. Quant aux cartons, ils font plutôt partie des emballages. Les matières plastiques peuvent se trouver dans différents biens de consommation comme par exemple :

- le polyéthylène dans les bouteilles, le film d'emballage ou les textiles,
- le polystyrène dans les jouets, produits audio-visuels ou l'emballage,
- le polyuréthane dans les jouets en peluche, le rembourrage des lits et canapés ou encore l'isolation des bâtiments (mousse).

Les textiles qui peuvent être composés de produits cellulosiques tels que la viscose et le coton possèdent une chaleur de combustion équivalente à celle du bois. En revanche, les tissus synthétiques composés de matières plastiques ont des chaleurs de combustion beaucoup plus élevées variant entre 30 et 40 MJ/kg. Leur comportement au feu est ainsi directement lié au comportement de leurs matières premières.

De la même façon, pour les denrées alimentaires, trois grandes catégories se distinguent:

- les produits à base de matières grasses, à chaleur de combustion élevée (30 à 40 MJ/kg) ;
- les produits à base de viande, à chaleur de combustion moyenne (25 MJ/kg) ;
- les produits secs à chaleur de combustion plutôt faible comprise entre 10 MJ/kg et 17 MJ/kg (identique aux produits cellulosiques).

Ces catégories ont bien évidemment des comportements au feu différents, les matières grasses se rapprochant par exemple des liquides inflammables.

Types de produits	Pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg)	Références
Bois et cartons	18	SFPE Handbook 1995 (TEWARSON, 1995)
Matières plastiques		
Polychlorure de vinyle (PVC)	15 à 21,7	Techniques de l'ingénieur (NAUDIN, 1995)
Polyuréthanes (PUR)	23,9 à 31	
Polyamides (PA)	19,3 à 31	
Polystyrène (PS)	31,7 à 41,2	
Polyéthylène (PE)	33,9 à 46	
Textiles		
Viscose coton	18	DRA03 (CARRAU, 2000)
Synthétique	30 à 40	
Denrées alimentaires		
<u>Produits gras</u>		Institut International du froid, 1987
Saindoux, huiles végétales et graisses	40	
Beurre	38	
Margarine	31	
Noix	29	
<u>Produits à base de viande</u>		
Bacon	27	
Viande	25	
<u>Produits secs</u>		
Céréales en grains, riz	17	
Plantes séchées et fruits secs	15	
Confiture, miel	14	
Fromage	13	
Pain	10	

Tableau 1 : Pouvoir calorifique supérieur de produits susceptibles d'être stockés en entrepôt

La vitesse de combustion moyenne surfacique, par rapport à la surface au sol, est déterminée à partir des valeurs déterminées pour les produits de base : bois, PVC, PE, carton,... Comme pour la chaleur de combustion de la palette, la vitesse de combustion est calculée à l'aide d'une moyenne pondérée par la masse de chaque composant élémentaire :

$$V_{comb_palette} = \frac{\sum_{comb_i} M_{comb_i} V_{comb_i}}{\sum_{comb_i} M_{comb_i}}$$

Où V_{comb_i} : Débit masse surfacique de chaque combustible (kg/(m² s)).

Les vitesses de combustion sont celles obtenues pour un faible état de division. Cette remarque est très importante car il est nécessaire de s'assurer que la compacité n'est pas prise en compte 2 fois. Par exemple, plusieurs valeurs sont disponibles pour le bois :

- sous forme compacte, il est généralement trouvé 17 g/m²/s,
- sous forme divisée, des valeurs de l'ordre de 60 g/m²/s pour une palette sont généralement rencontrées.

Pour tout nouveau combustible solide intégré dans la méthode, il sera nécessaire de connaître toutes les propriétés décrites dans le Tableau 2.

Nom	Chaleur de combustion (MJ/kg)	Débit masse surfacique à l'état non divisé (kg/m ² /s)	Masse volumique (kg/m ³)
bois	18	0,017	550
PE	40	0,015	925
carton	18	0,017	900
PVC	18	0,015	750
PS	40	0,015	20
PUR	26	0,021	30
Caoutchouc	30	0,007	900
Pneu	30	0,035	900
Coton	20	0,0155	95
Synthétique	38	0,0135	90

Tableau 2 : Propriétés des produits à l'état non divisé

Les propriétés présentées dans le Tableau 2 s'entendent pour des produits compacts.

Par ailleurs, des essais réalisés sur des bûchettes en bois lors du projet « Caractérisation des feux industriels » (Carrau, 2003) ont montré que la puissance maximale était fortement dépendante de la compacité du produit et plus particulièrement, de la surface de contact air/bûchettes, Figure 2. En effet, un très bon aérage des bûchettes, comme lors d'une organisation des bûchettes sous forme de bûchers de bois, permet de tripler la puissance maximale du feu par rapport à la configuration la plus compacte. Fort de ce résultat, il a été décidé dans le cas d'une palette bois de multiplier par trois la vitesse de combustion retenue pour le bois massif. Ainsi, la vitesse de combustion d'une palette en bois dans la méthode est de 0,051 kg/m² s.

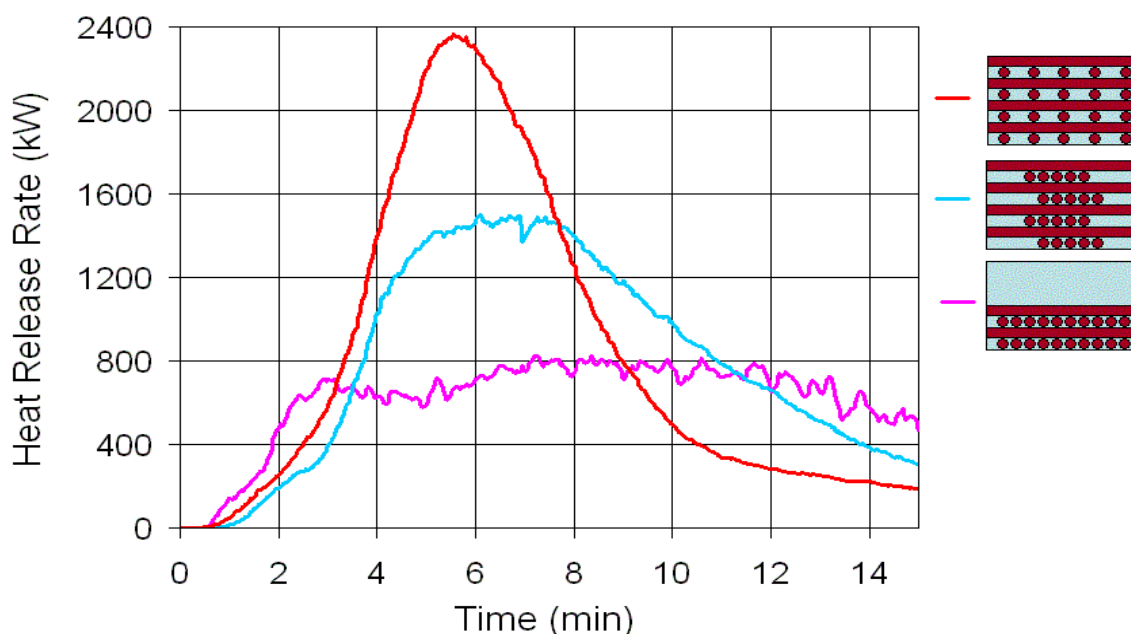


Figure 2 : Evolution de la puissance en fonction de l'arrangement des bûchettes

De plus, les essais à moyenne échelle ont permis de tirer quelques enseignements pour l'élaboration de la méthode. La Figure 3 présente ainsi l'évolution de la vitesse de combustion maximale en fonction de la charge combustible de la palette pour chaque essai.

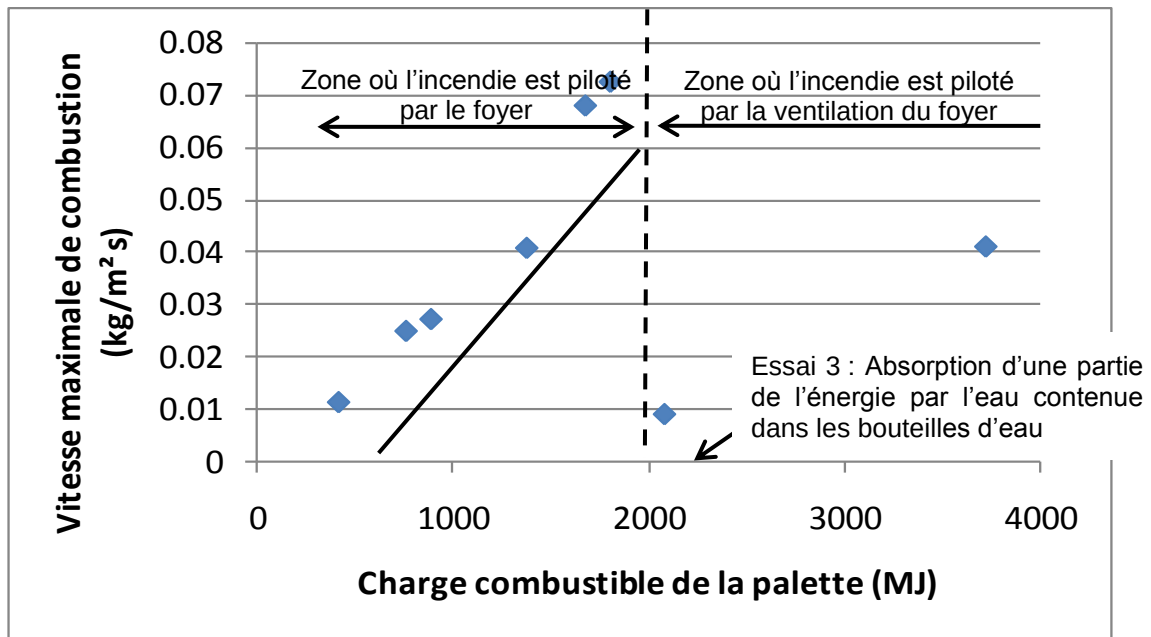


Figure 3 : Evolution de la vitesse de combustion suivant la charge combustible de la palette pour les essais à moyenne échelle

Ce graphique montre que l'augmentation de la charge combustible au delà d'une certaine valeur ne se traduit pas forcément par une augmentation de la vitesse de combustion. En effet, au delà d'une certaine charge, ce sont les conditions de ventilation du foyer qui conditionnent la combustion et l'augmentation de la charge se traduit alors seulement par un allongement de la durée de la combustion. Dans la méthode, ce phénomène est pris en compte en considérant qu'il existe une limitation de la propagation du feu dans la cellule due à un apport d'oxygène insuffisant pour alimenter correctement le feu (voir § 5.2.6). La ventilation n'est pas le seul paramètre à influencer. En effet, lors d'un essai réalisé avec des palettes de bouteilles d'eau, la vitesse de combustion s'est trouvée drastiquement réduite en raison de la grande quantité d'eau contenue sur les palettes, 32 % en volume, qui joue le rôle de puits de chaleur et qui absorbe ainsi une certaine partie de l'énergie produite par le feu (voir § 5.1.1.2).

Pour des charges calorifiques plus faibles, une variation quasi linéaire entre la vitesse de combustion maximale et la charge combustible de bois est observée. Toutefois, cette évolution n'est pas seulement dépendante de la charge calorifique de la palette mais également de la compacité de cette dernière (voir § 5.1.1.3). En effet, un combustible peu compact va avoir tendance à bien brûler en raison de la bonne ventilation du foyer si toutefois les produits incombustibles présents sur la palette ne viennent pas empêcher cette alimentation en air. Il est donc important dans le calcul de la puissance de considérer à la fois le volume de combustible et d'incombustible tel que :

$$Ratio_{comb_volume} = \frac{\sum_{comb_i} Volume_{comb_i}}{Volume_palette}$$

$$Ratio_{incomb_volume} = \frac{\sum_{comb_i} Volume_{incomb_i}}{Volume_palette}$$

Où $Volume_{comb_i}$: Volume de chaque combustible contenu sur la palette (m³),

$Volume_{incomb_i}$: Volume de chaque incombustible (m³),

$Volume_palette$: Volume de la palette (m³).

5.1.1.2 PRISE EN COMPTE DES INCOMBUSTIBLES

Les incombustibles contenus dans les palettes sont pris en compte dans le calcul de la puissance de la palette en considérant l'énergie absorbée par ces derniers telle que :

$$Energie_{absorbée} = \left(\sum_{incomb_i} M_{incomb_i} C_{incomb_i} \Delta T + \sum_{incomb_i} M_{incomb_i} \Delta H_{\varphi; incomb_i} \right) Coef_{absorption}$$

Où C_{incomb_i} : Capacité calorifique des incombustibles (kJ/kg K),

ΔT : Augmentation de température due à l'incendie (K). ΔT représente 1000°C s'il n'y a pas de changement de phase et $T_{ebullition} - T_{amb}$ s'il y a un changement de phase,

$\Delta H_{\varphi; incomb_i}$: Chaleur de changement de phase pour l'incombustible i sur la plage de température 20°C – 1000°C ; elle peut être nulle lorsqu'il n'y a pas de changement de phase sur cette plage de température (par exemple pour l'acier), cela peut être la chaleur latente de vaporisation (par exemple, pour l'eau) ou la chaleur de fusion (par exemple, pour l'aluminium).

$Coef_{absorption}$: Part d'énergie qui est réellement absorbée par les incombustibles.

L'essai 3 à moyenne échelle, réalisé avec des palettes de bouteilles d'eau, a montré que la quantité d'eau contenue dans les bouteilles était réellement capable d'absorber une partie importante de l'énergie dégagée par l'incendie, Figure 3. Toutefois, ce coefficient d'absorption est amené à évoluer suivant la composition de la palette, présence importante ou pas d'incombustibles. Un calcul du coefficient d'absorption, compris entre 0 et 1, a donc été mis en œuvre. Ce coefficient dépend directement de l'énergie disponible, dégagée par les combustibles, et de l'énergie absorbable par les incombustibles.

Le mode de calcul est basé sur le cheminement reproduit Figure 4.

- L'énergie absorbée correspond à une partie de l'énergie disponible telle que : $E_{absorbée} = \beta \cdot E_{dispo}$;
- L'énergie absorbée est égale à une partie de l'énergie absorbable, cette partie correspond au coef d'absorption telle que : $E_{absorbée} = \alpha \cdot E_{absorbable}$;

- Un 3^{ème} ratio « gamma » est introduit comme suit : $\gamma = E_{\text{dispo}}/E_{\text{absorbable}}$, d'où $\gamma = \alpha/\beta$;
- $E_{\text{finale}} = E_{\text{dispo}} - E_{\text{absorbée}}$.

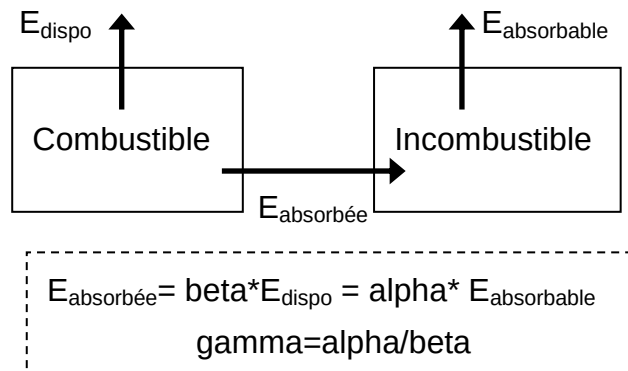


Figure 4 : Schéma explicatif du bilan énergétique sur la palette

Ensuite, les postulats sont les suivants :

- $E_{\text{dispo}} \ll E_{\text{absorbable}}$, $\gamma \ll 1$: $\alpha = 0$;
- $E_{\text{dispo}} = E_{\text{absorbable}}$, $\gamma = 1$: $\alpha = 0,5$;
- $E_{\text{dispo}} \gg E_{\text{absorbable}}$, $\gamma \gg 1$: $\alpha = 1$.

Entre ces différentes bornes, les valeurs de α , c'est-à-dire du coefficient d'absorption, sont interpolées.

Quatre produits incombustibles ont été retenus dans la méthode, les propriétés à connaître pour le calcul de l'énergie absorbée sont regroupées dans le Tableau 3.

Produit	Capacité calorifique (kJ/(kg.K))	Température de changement de phase (°C)	Chaleur latente de changement de phase (kJ/kg)
eau	4,2	100	2260
aluminium	0,9	660	390
verre	0,72	NP	NP
acier	0,5	NP	NP

Tableau 3 : Propriétés physiques des produits incombustibles

NP signifie Non Pertinent sur la plage de température qui nous intéresse, à savoir entre 10°C et 1000°C.

5.1.1.3 PRISE EN COMPTE DE LA COMPACTITE DANS LE CALCUL DE LA PUISSANCE DE L'INCENDIE D'UNE PALETTE

Lorsque la palette contient une proportion importante de matériaux incombustibles, sa vitesse de combustion est réduite d'une part en raison de l'absorption d'une partie de l'énergie par les matériaux incombustibles, comme décrit au paragraphe précédent, et d'autre part en raison de l'obstruction induite par la présence de ces matériaux incombustibles qui défavorise la ventilation du foyer.

En revanche, la présence importante d'air au sein de la palette va favoriser la combustion de la palette, surtout si le combustible est divisé. En effet, les essais réalisés ont montré que la compacité jouait un rôle très important.

En se basant sur les essais à moyenne échelle et à grande échelle du projet FLUMILOG, une méthode a été élaborée afin de tenir compte de la fraction volumique de combustible et d'incombustible de la palette. Le Tableau 4 montre qu'il existe un ratio, dénommé « *ratio_pyro* », entre la puissance théorique $P_{palette}$, obtenue pour des produits compacts, et la puissance de la palette trouvée expérimentalement, P_{exp} , qui est directement liée à la fraction volumique de combustible et d'incombustible. En effet, plus la fraction volumique de combustible augmente et plus le *ratio_pyro* augmente excepté pour l'essai 3 qui mettait en œuvre 32 % en volume d'incombustible.

	<i>ratio comb_volume</i>	<i>ratio incomb_volume</i>	P_{exp} (kW)	$P_{palette}$ (kW)	<i>Ratio_pyro</i> (-)
Essai_1	10.51%	0.72%	833	1073	0.8
Essai_2	13.79%	0.48%	1481	1087	1.4
Essai_3	12.58%	32.33%	231	472	0.5
Essai_4	6.76%	0.57%	556	1067	0.5
Essai_5	5.78%	0.57%	509	1061	0.5
Essai_6	3.13%	0.85%	231	989	0.2
Essai_7	12.82%	0.00%	1389	1102	1.3
Essai en grand	53.37%	0.00%	3198	1102	2.9

Tableau 4 : Ratio entre la puissance théorique et expérimentale de la palette

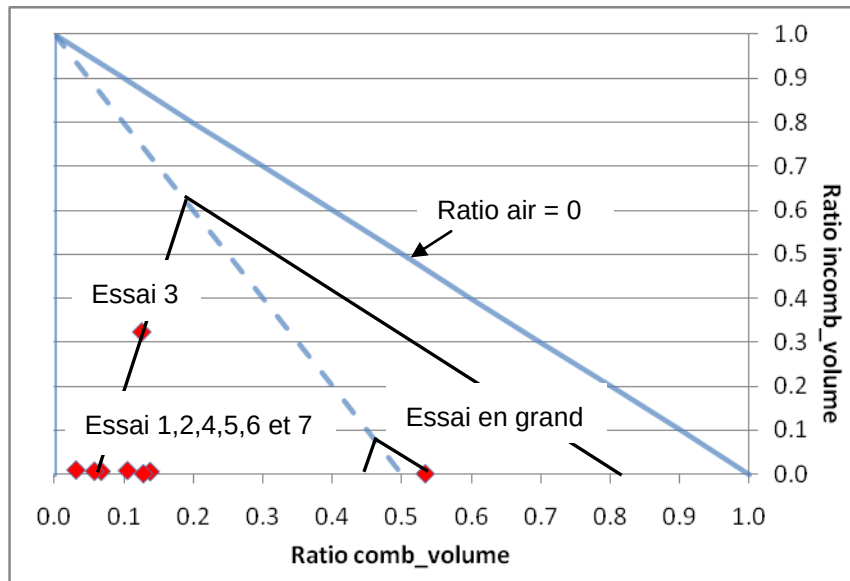


Figure 5 : Représentation des essais à moyenne et grande échelle en fonction de la fraction volumique de combustible et d'incombustible

Sur cette Figure 5, les caractéristiques des différents essais ont été reportées afin de déterminer une loi de calcul pour *ratio_pyro*.

Les différentes bases d'établissement de cette loi sont les suivantes :

- Considérant l'essai à grande échelle comme cas majorant avec un *ratio_comb_volume* maximum testé de 53 %, il a permis de définir le *ratio_pyro* maximal. En effet, pour des fractions combustibles supérieures à 50 %, le *ratio_pyro* est amené à diminuer (volume d'air réduit).
- Le champ du graphique est limité physiquement par une fraction combustible nulle (*ratio_pyro* = 0) et par une fraction d'air dans la palette également nulle.
- Les essais à moyenne échelle (excepté l'essai 3) ont permis de définir pour des fractions incombustibles nulles l'expression de *ratio_pyro* en fonction de la fraction combustible ; dans ce cas le *ratio_pyro* évolue suivant un polynôme du second degré.
- Quant aux deux points des essais 3 et 5 possédant le même *ratio_pyro*, ils ont servi à déterminer la pente que doit suivre chaque droite pour un *ratio_pyro* donné.

A noter que de façon prudente, *ratio_pyro* ne pourra jamais être inférieur à 1. Toutes ces considérations amènent à définir *ratio_pyro* suivant les expressions suivantes, où x est la fraction volumique de combustible (*ratio_comb_volume*) et y la fraction volumique d'incombustible (*ratio_incomb_volume*) :

Si $y \geq -2x+1$ et $x < 0.783$

$ratio_pyro = -28.7 (x+y)^2 + 29.796 (x+y) - 4.729$

si $y < -2x+1$ et $x > 0.115$

$$\text{ratio_pyro} = -15.533 (x-y/5.565)^2 + 14.727 (x-y/5.565) - 0.487$$

sinon $\text{ratio_pyro} = 1$

Ces relations sont représentées sur la Figure 6.

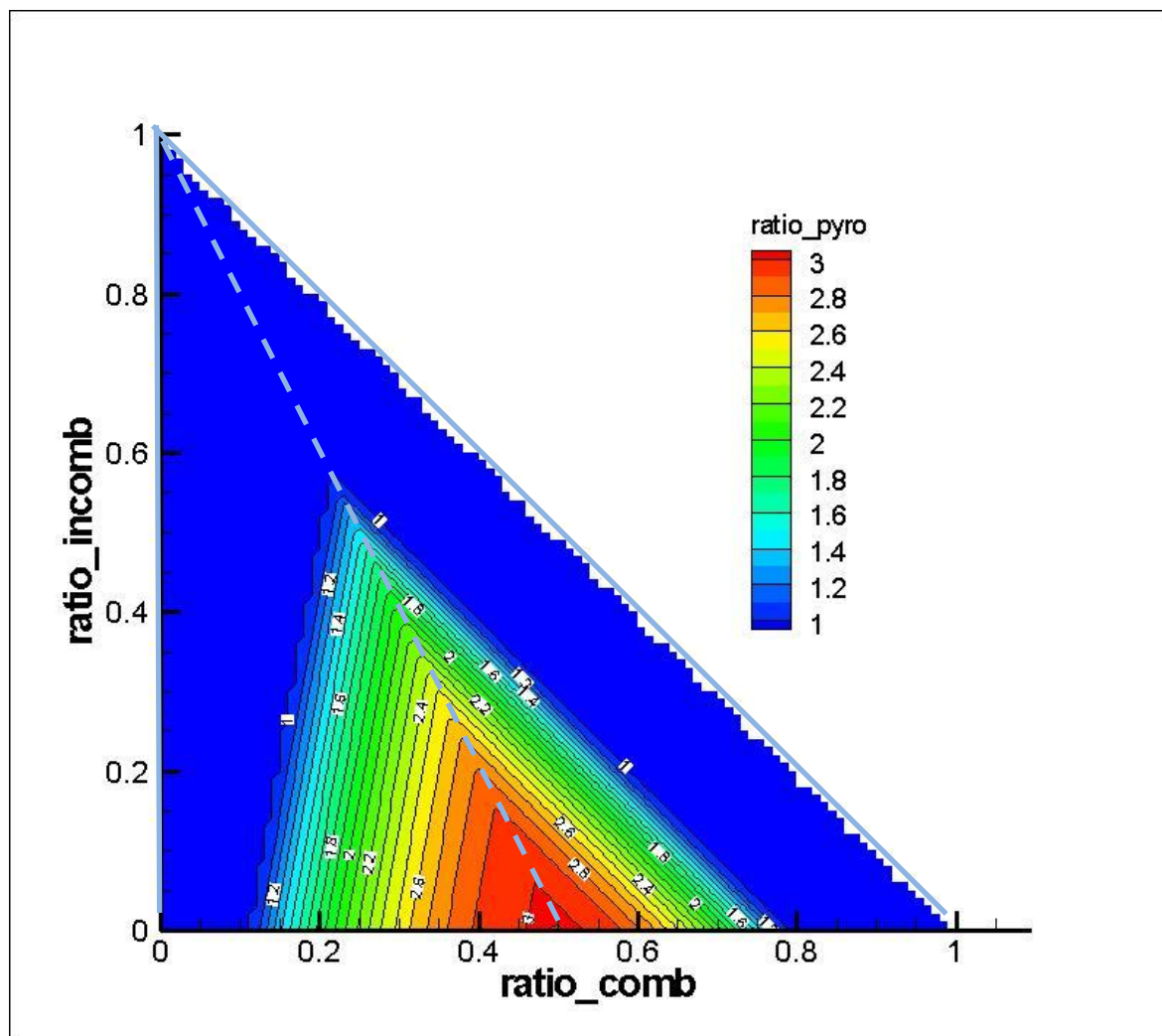


Figure 6 : Représentation du ratio_pyro

Au final, le calcul de la puissance dégagée par la palette est corrigé par la relation suivante :

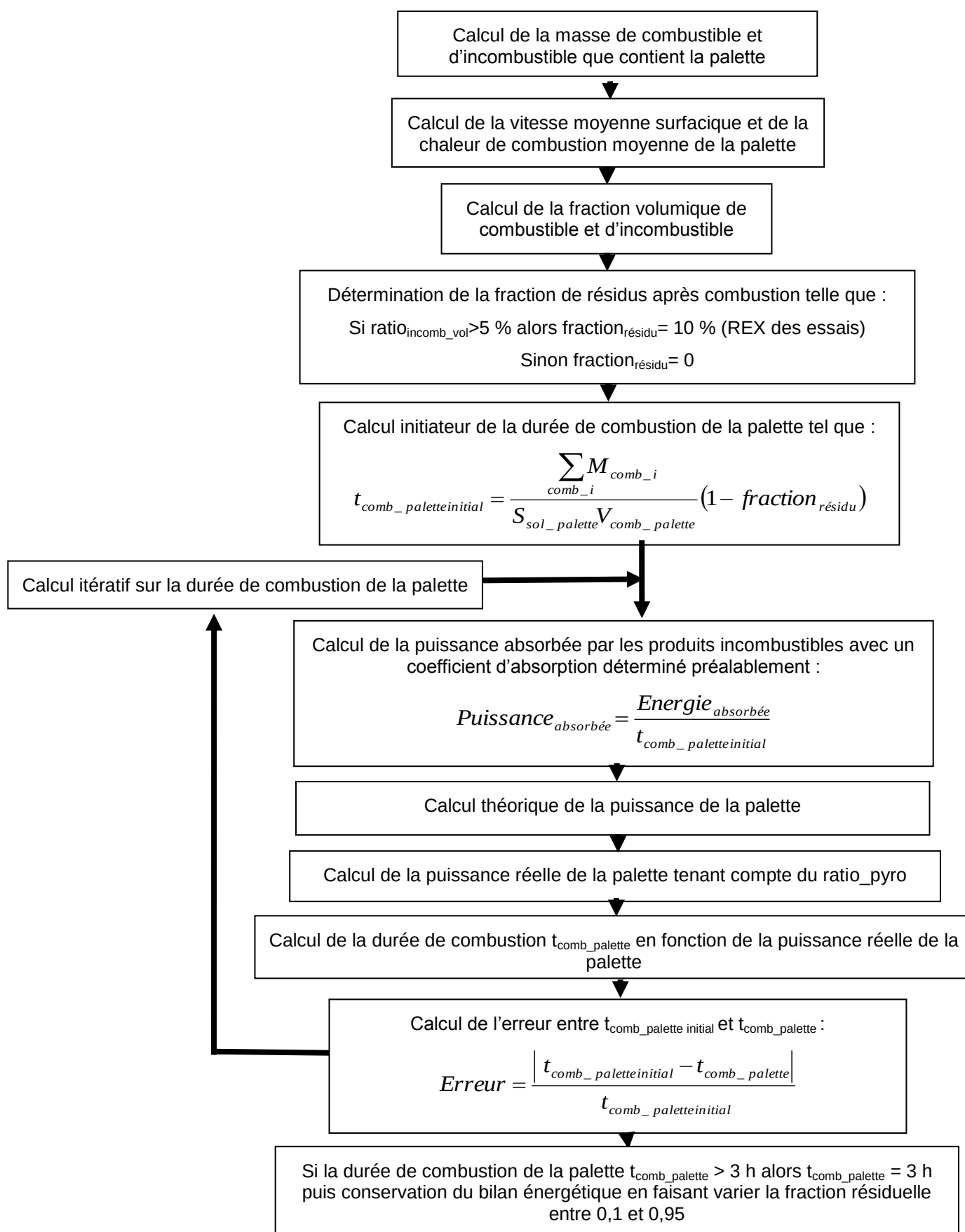
$$P_{\text{palette réelle}} = \text{ratio_pyro} * P_{\text{palette}}$$

Cette puissance est ensuite convertie en puissance surfacique par rapport à la surface développée des racks (5 faces) pour pouvoir être utilisée dans le cadre de la propagation de l'incendie.

5.1.1.4 DUREE DE COMBUSTION DE LA PALETTE

Le calcul de la durée de combustion $t_{comb_palette}$ est déterminé en fonction de la puissance de la palette et de la puissance absorbée par les produits incombustibles suivant un calcul itératif. Le logigramme ci-après présente le cheminement menant au calcul de cette durée de combustion de palette.

N.B. : Lors du calcul, si la durée de combustion de la palette est supérieure à 3 heures (valeur supposée maximum pour la durée de combustion d'une palette de dimensions classiques), la durée de combustion est prise égale à 3 heures. Afin de conserver le bilan énergétique du système palette, la fraction résiduelle de combustible $fraction_{résidu}$ est alors amenée à varier entre 0,1 et 0,95.



5.1.2 CAS 2 : CARACTERISTIQUES DE PALETTE OBTENUES EXPERIMENTALEMENT

Le fait de réaliser des essais à l'échelle de la palette peut avoir deux intérêts :

- Le premier concerne la possibilité d'analyser la combustion d'une palette contenant des produits spécifiques autres que les produits élémentaires intégrés dans la méthode ;
- Le second concerne l'obtention de caractéristiques plus précises de palettes afin de déterminer des distances d'effets plus réalistes, en comparaison par exemple, avec les données type « entrepôt blanc » définies à partir d'un combustible enveloppe (§ 5.1.3).

L'objectif de ces essais est de déterminer expérimentalement les caractéristiques de combustion d'une palette spécifique qui peuvent ensuite être intégrées dans la méthode « FLUMILOG ». Ces caractéristiques sont la puissance et la durée de combustion de la palette.

Le protocole expérimental « FLUMILOG » de caractérisation d'une palette est mis en ligne sur le site FLUMILOG sous la référence « DRA-11-121125-05992A ».

A l'issue de ces essais, le rapport d'essais standardisé précise les conditions opératoires et le protocole, et fournit l'évolution des différentes grandeurs en fonction du temps ainsi que le film. En conclusion du rapport, les valeurs à retenir pour une intégration dans la méthode sont la puissance dégagée par la palette et sa durée de combustion.

5.1.3 CAS 3 : DEFINITION DE PALETTES RUBRIQUES

Pour chaque rubrique pour lesquelles la méthode a été identifiée comme pertinente, un échantillon de 30 000 compositions de palette différentes a été généré aléatoirement tout en vérifiant certaines contraintes. Ainsi, la masse de chaque palette varie entre 100 kg et 1 200 kg. Les dimensions d'une palette sont de 1,2 m x 0,8 m x 1,5 m. Un échantillon peut occuper tout ou partie de ce volume mais ne peut en aucun cas l'excéder. Chaque rubrique possède ses propres contraintes en termes de composition.

Pour la rubrique 1510, un échantillon est composé de 25 kg de bois de palette. La masse des produits plastiques ne peut excéder la moitié de la masse des produits contenus sur la palette, le bois de palette étant exclu, et le reste varie aléatoirement entre bois, carton, eau, acier, verre, aluminium.

Pour la rubrique 1511, un échantillon est composé de 25 kg de bois de palette, 10 kg de carton, 50 kg d'eau, 10 kg de PE et 2 kg de PS. La masse restante varie aléatoirement entre de l'incombustible, du PE (supposé représenter les graisses par l'intermédiaire de sa chaleur de combustion et de sa vitesse de combustion) et du bois (supposé représenter les produits alimentaires secs).

Pour les rubriques 2662 et 2663, par défaut, une masse de 25 kg de bois de palette est incluse. A ceci s'ajoute la masse du PE, pour un minimum de 50% du poids total de l'échantillon, complétée aléatoirement par d'autres produits possibles (combustibles ou non).

Pour chaque composition de palettes, le calcul de la puissance et de la durée de combustion de la palette a été réalisé suivant la procédure énoncée au § 5.1.1.

L'étude de ces 30 000 compositions a permis de définir pour chacune des rubriques une courbe enveloppe de la puissance palette. Cette courbe présente, pour chaque valeur de la puissance, le pourcentage de palette de puissance inférieure. La Figure 7 donne une représentation de cette courbe entre 90 et 100 % des cas testés. Finalement, pour déterminer la puissance palette de chaque rubrique, il a été pris le parti de considérer 95 % des compositions envisagées, Figure 7, pour lesquels la puissance palette est inférieure à cette valeur soit :

- 1525 kW pour la rubrique 1510,
- 1300 kW pour la rubrique 1511,
- 1875 kW pour les rubriques 2662 et 2663.

Pour chaque rubrique, la durée de combustion de la palette est prise forfaitairement égale à 45 min, durée en moyenne observée pour le feu d'une palette.

Pour des palettes de dimensions non standard, la puissance de la palette est proratisée suivant son volume. De plus, pour éviter les biais liés à un mauvais renseignement de la hauteur de palette, celle-ci est recalculée sur la base de l'inter lisse (entre 2 niveaux) moins 10 %, espace nécessaire pour une manipulation aisée de la palette dans les racks.

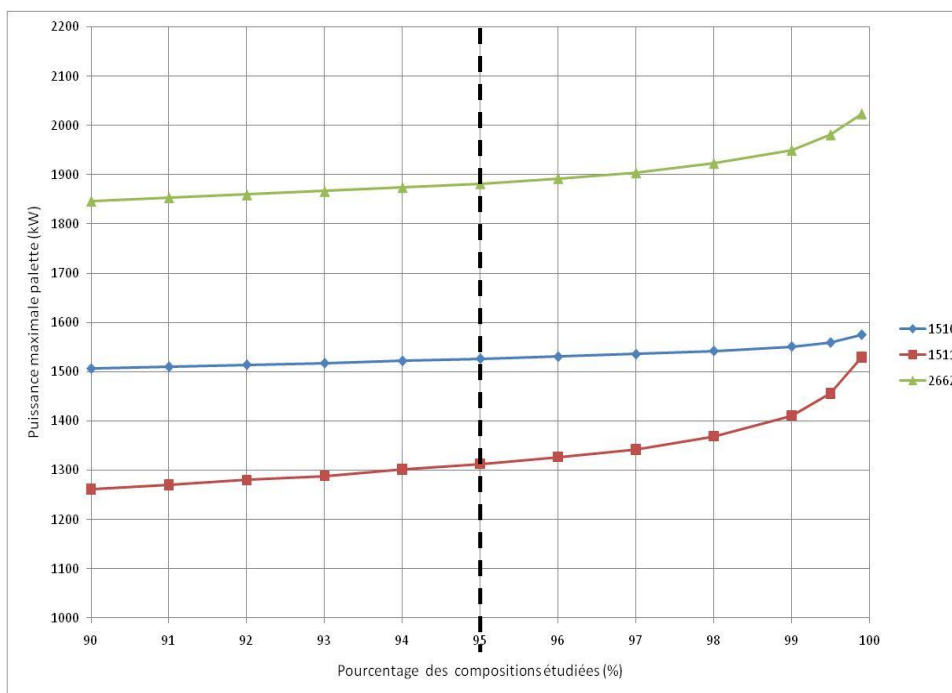


Figure 7 : Evolution de la puissance maximale de palette correspondant à un pourcentage élevé des 30000 compositions étudiées

La Figure 8 représente plus précisément les résultats obtenus pour les 30 000 compositions appartenant à la rubrique 1510. La courbe en noir correspond à la courbe d'énergie constante égale à 1525 kW*45 min de la rubrique 1510. De façon générale, dans le calcul, les palettes avec composition connue s'apparentant à la rubrique 1510 et qui auraient une énergie supérieure à celle-ci, seront ramenées sur cette courbe. Ceci permet d'éviter d'avoir des palettes dont le couple (puissance, durée de combustion) soit supérieur au couple (1525 kW, 45 min) de la palette rubrique 1510. Cette méthode est également appliquée pour les autres rubriques identifiées dans FLUMILOG.

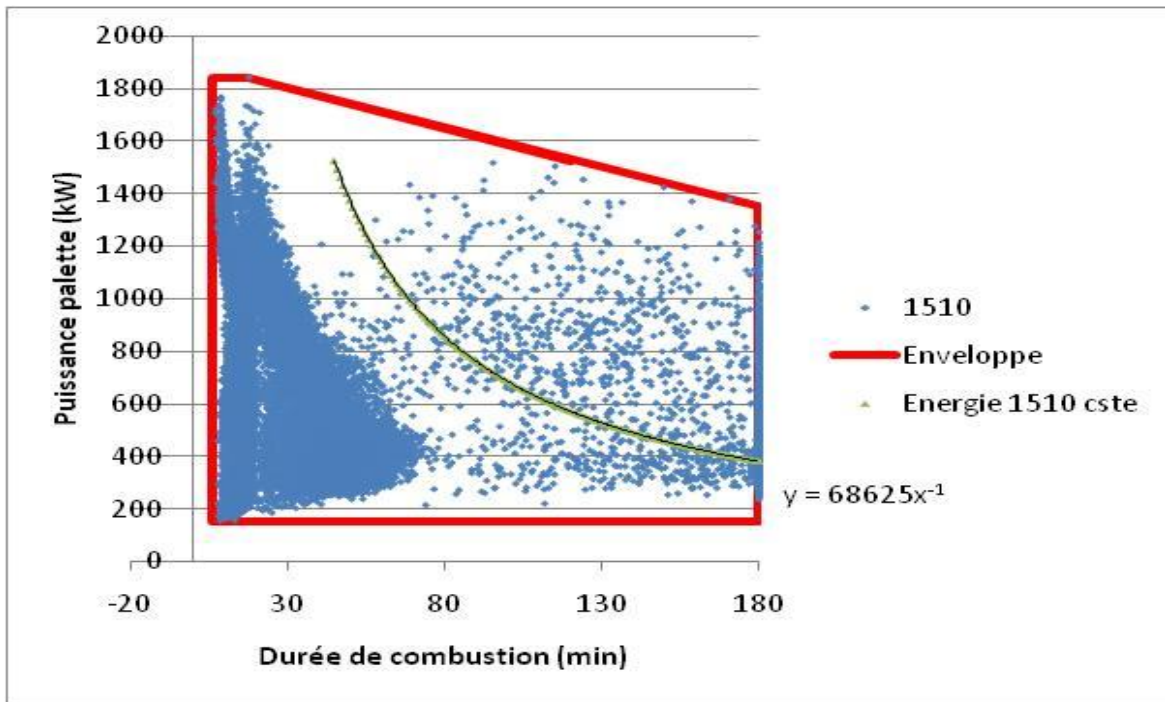


Figure 8 : Répartition de la puissance de la palette pour les 30000 compositions testées pour la rubrique 1510

5.1.4 DETERMINATION DES VITESSES DE PROPAGATION HORIZONTALE ET VERTICALE DANS LES RACKS

Il est difficile de trouver dans la littérature des vitesses de propagation sur les palettes. L'essai à grande échelle a permis de déterminer, pour les palettes bois, les valeurs des vitesses de propagation horizontale $V_{prop_horiz_pal}$ et verticale $V_{prop_vert_pal}$ telles que :

- $V_{prop_horiz_pal} = 3 \text{ m/min}$
- $V_{prop_vert_pal} = 0,7 \text{ m/min}$

Etant donné la rapidité de propagation et la violence de l'incendie lors de l'essai en grand, ces valeurs de vitesse sont considérées comme maximales et dites « de référence ». Rappelons que le stockage de palette bois était très aéré et donc de

faible compacité. Pour mémoire, la puissance unitaire des palettes est de 2000 kW.

Pour une puissance de palette inférieure à celle de l'essai à échelle 1 la vitesse de propagation verticale est amenée à diminuer suivant un polynôme du second degré :

- pour une puissance de palette équivalente à la palette rubrique 2662, 1875 kW, la vitesse est divisée par 2 pour que l'évolution en puissance de l'incendie soit assimilée à une évolution en 2*UFAST (EVANS, 1995),
- pour une puissance de palette équivalente à la palette rubrique 1510, 1525 kW, la vitesse est divisée par 4 pour que l'évolution en puissance de l'incendie soit assimilée à une évolution en UFAST.

Cette approche se veut majorante en respectant une certaine hiérarchie dans le degré de risque que représente chacune de ces rubriques. Lorsque la puissance palette est inférieure à la puissance de la rubrique 1510, la vitesse de propagation minimum est atteinte soit un quart de la vitesse de propagation de référence.

La figure ci-après présente le coefficient réducteur de la vitesse de propagation fonction de la puissance de la palette.

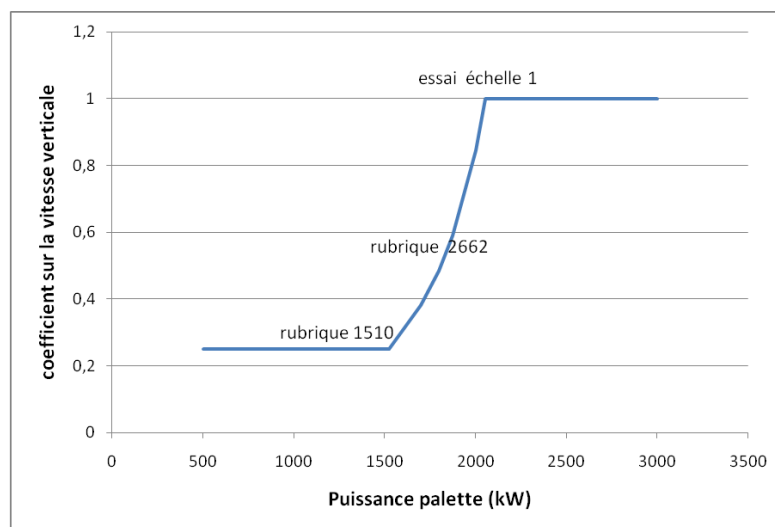


Figure 9 : Coefficient réducteur de la vitesse de propagation verticale fonction de la puissance de la palette

5.2 CALCUL DE LA PROPAGATION DANS LA CELLULE

5.2.1 PRINCIPE DE LA PROPAGATION DU FRONT DE FLAMME DANS LA CELLULE

L'inflammation initiale est supposée intervenir sur le double rack central du stockage en partie basse. Ce point d'inflammation correspond au départ de feu le plus pénalisant puisqu'il engendrera la surface en feu la plus conséquente. Tandis que le feu se propage dans le rack central, un calcul de flux est effectué pour estimer si les palettes des racks mitoyens sont capables de s'enflammer par rayonnement. Si le flux critique d'auto-inflammation est atteint, le feu passe d'un rack à l'autre. Simultanément, les flammes montent rapidement par effet cheminée vers le plafond pour ensuite s'étaler horizontalement. Au bout d'un certain temps, une couche thermique contenant les gaz chauds et les suies se développe sous le plafond pour atteindre les bords de la cellule. La présence de cette couche entraîne le début de la pyrolyse des produits stockés au niveau le plus élevé des racks voisins par convection naturelle et par rayonnement (Figure 10).

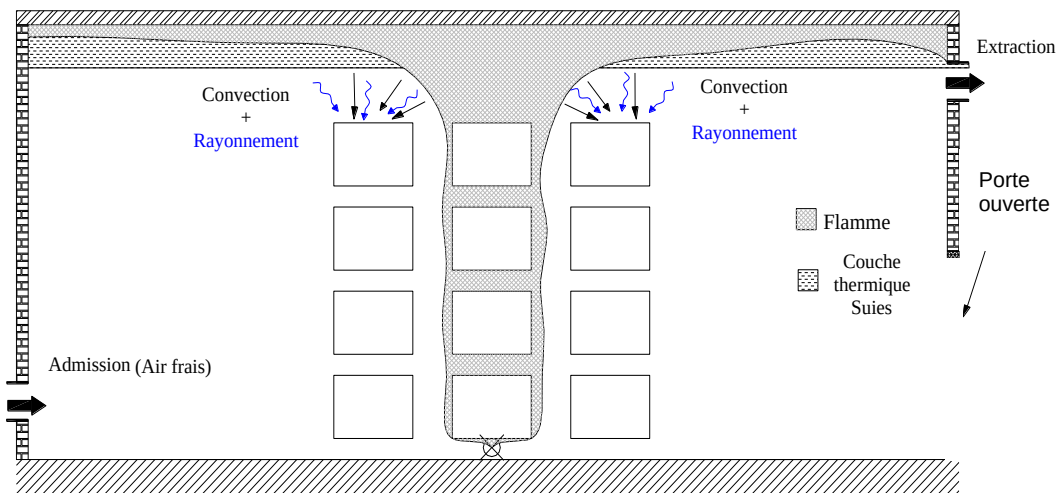


Figure 10 : Apparition de la couche chaude, influence du rayonnement et de la convection naturelle sur les racks voisins

En raison du confinement, les gaz de combustion et les suies s'accumulent en partie haute. De fait, la couche thermique n'atteint pas un équilibre et commence à descendre (Heskestad, 1986). A une température de 140 °C, les exutoires s'ouvrent laissant s'évacuer une partie des fumées. Toutefois, cette surface d'exutoires n'est pas suffisante pour évacuer la totalité des gaz de combustion, la couche thermique continue donc de s'accroître. La température et la hauteur de cette couche chaude sont déterminées à chaque pas de temps. Pour le calcul de la hauteur de couche chaude, l'ouverture des exutoires ainsi que l'effondrement progressif de la toiture sont pris en compte. Dès que la couche thermique atteint le haut des racks et possède une température supérieure ou égale à la température d'auto-inflammation retenue, une inflammation brutale, ou flashover, se produit sur les palettes stockées au dernier niveau des racks. Les flammes se propagent ensuite de façon exclusivement verticale jusqu'au sol. A noter qu'un test est réalisé sur chaque rack pour savoir s'il n'y avait pas eu contamination par

rayonnement avant flashover. Si tel n'est pas le cas, la propagation s'effectue par flashover. Une fois que la couche thermique descend vers le sol (Figure 11), la quantité de comburant peut devenir insuffisante, la pression à l'intérieur de l'espace confiné augmente avec l'augmentation de la concentration et de la température des gaz brûlés.

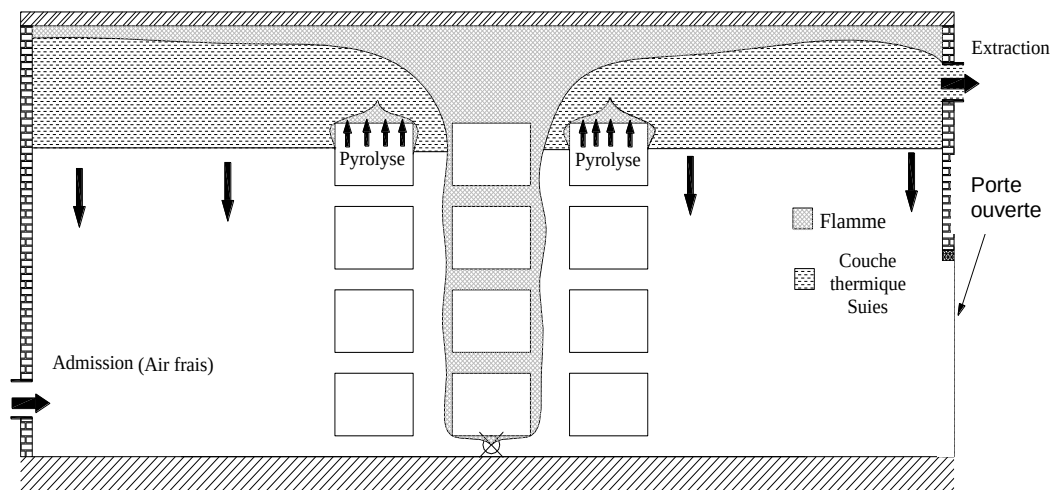


Figure 11 : Descente de la couche chaude, pyrolyse et inflammation des produits au-dessus des racks voisins

Ce manque d'oxygène peut aboutir à l'extinction du feu si le bâtiment reste intègre suffisamment longtemps (ex : cellule avec murs coupe feu et dalle béton en toiture). Toutefois, dans la plupart des cas, l'étanchéité n'est pas suffisante pour permettre l'auto-extinction de l'incendie. En effet, suite à la sollicitation thermique provoquée par l'incendie, le bâtiment se dégrade et la toiture commence à s'effondrer. Le feu devient alors un feu en milieu ouvert, bien ventilé, avec des flammes de dimensions importantes (Figure 12).

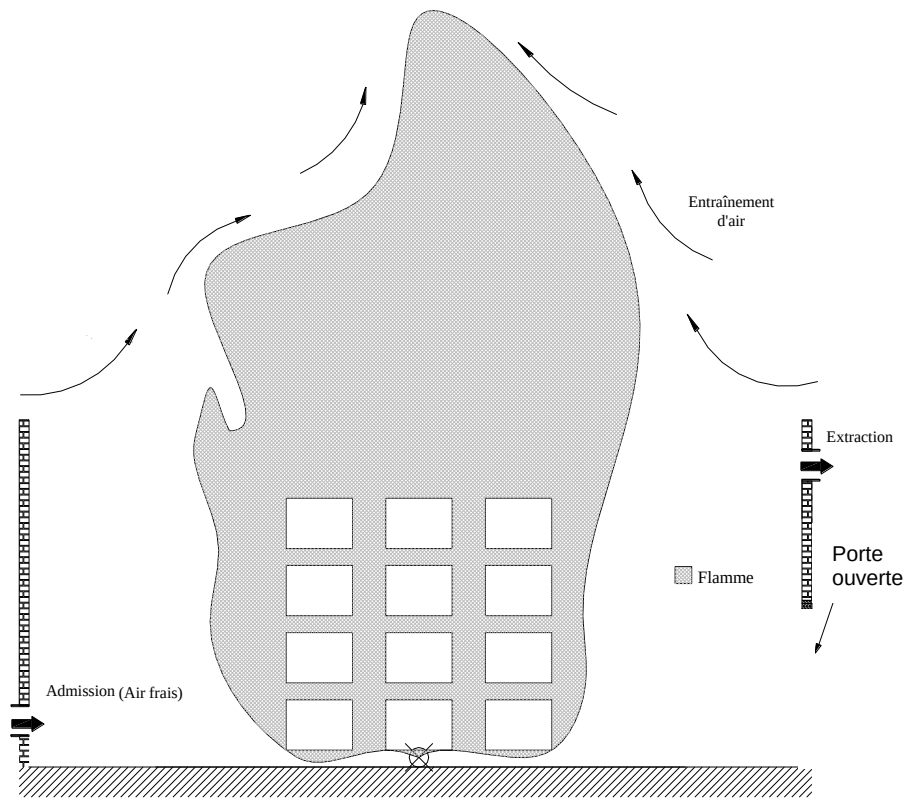


Figure 12 : Après effondrement de la toiture, feu bien ventilé

5.2.2 CALCUL DE LA PUISSANCE AU COURS DU TEMPS DE L'INCENDIE

Le calcul de la puissance instantanée produite par l'incendie se fait selon la relation suivante :

$$P(t) = \eta \times S_{\text{feu_dev}}(t) \times P_{\text{rack_surfacique}} \times \text{Coef}_{\text{ventil}} + P_{\text{ini}}$$

Où :

$P(t)$ est la puissance libérée à chaque instant,

$P_{\text{rack_surfacique}}$ est la puissance libérée par unité de surface enveloppante des racks,

$S_{\text{feu_dev}}(t)$ est la surface en feu à l'instant t donné. Cette valeur dépend de la vitesse de propagation du feu mais également de la quantité d'oxygène apporté à chaque instant. En cas d'apport insuffisant, la surface en feu peut augmenter moins que prévu voire stagner et puis reprendre sa croissance dès que des ouvertures au niveau de la toiture se sont formées. La surface en feu peut également diminuer à partir du moment où les premières palettes commencent à s'éteindre.

$\text{Coef}_{\text{ventil}}$ est un coefficient réducteur dépendant de la ventilation. De la même manière que l'alimentation en air joue sur la surface en feu, ce coefficient influe sur la puissance libérée par une palette et par extension sur la durée de combustion de celle-ci.

P_{ini} est la puissance dégagée lors des tous premiers instants de l'incendie depuis le départ de feu au sol jusqu'à ce que les flammes atteignent le haut du rack (INGASON, 2001).

La Figure 13 représente l'évolution calculée avec la méthode FLUMILOG de la puissance pour l'essai à grande échelle. Au cours du calcul, tant que la toiture ne s'est pas effondrée, la puissance reste limitée par le manque d'oxygène dans la cellule. Dès l'ouverture de la toiture, la propagation reprend, le feu se généralise en occupant une surface maximale de racks. Ceci se traduit soit par un pic de puissance soit par un plateau de puissance suivant la durée de combustion de la palette. En effet, plus celle-ci est élevée et plus le plateau de puissance s'allonge. Passée cette durée de combustion de la palette, les premières palettes commencent à s'éteindre, l'extinction de l'incendie s'amorce alors.

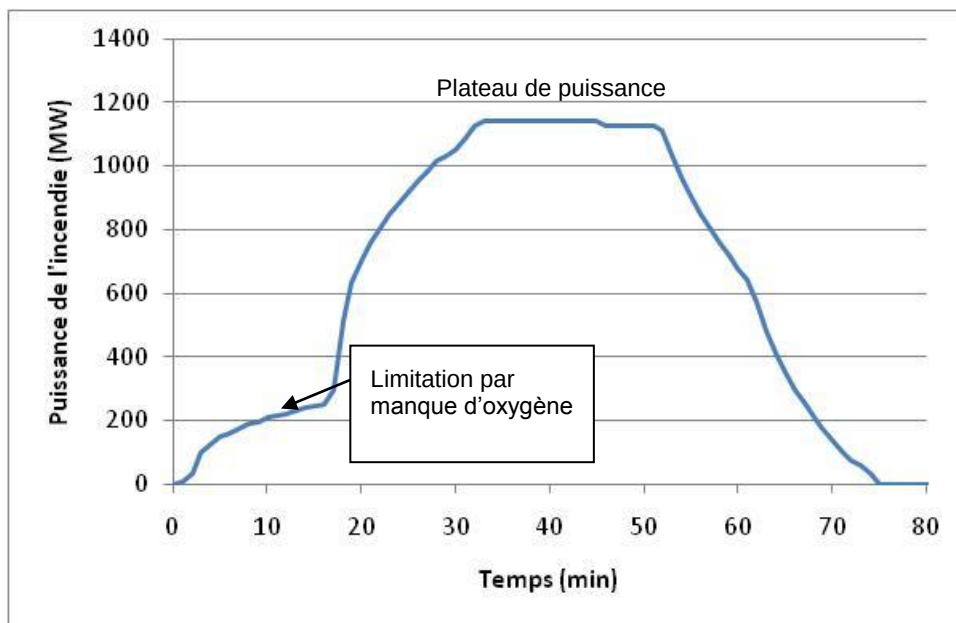


Figure 13 : Evolution calculée de la puissance pour l'essai en grand

5.2.3 LOI DE PROPAGATION ENTRE LES DIFFERENTS RACKS

Les essais réalisés ont montré explicitement qu'il y a 2 modes de propagation possible entre les racks :

- par rayonnement,
- par la couche chaude (flash-over).

5.2.3.1 PROPAGATION PAR RAYONNEMENT

Au début de l'incendie, le feu n'a pas beaucoup d'ampleur et les fumées chaudes qui sont produites se diluent dans le volume de la cellule. La propagation peut se faire alors uniquement par le rayonnement émis par les flammes. Lors de l'essai FLUMILOG à grande échelle, le feu du rack central s'est propagé aux racks voisins en l'espace de 8 minutes par rayonnement. En effet, les palettes des racks mitoyens, impactées par le flux radiatif issu des flammes du rack central, se sont mises à pyrolyser (Figure 14). Au bout de 8 minutes, lorsque les produits ont atteint une température d'auto-inflammation, ils se sont enflammés à leur tour propageant ainsi le feu (Figure 15).



Figure 14 : Pyrolyse des palettes appartenant au rack mitoyen au rack central



Figure 15 : Inflammation d'une palette appartenant au rack mitoyen et induisant une propagation par rayonnement du feu

Dans l'outil, ce mode de propagation est celui qui est considéré par défaut, le principe du calcul repose sur la détermination du flux reçu sur les racks voisins à chaque instant en fonction de la surface en feu dans le rack initial (Figure 16).

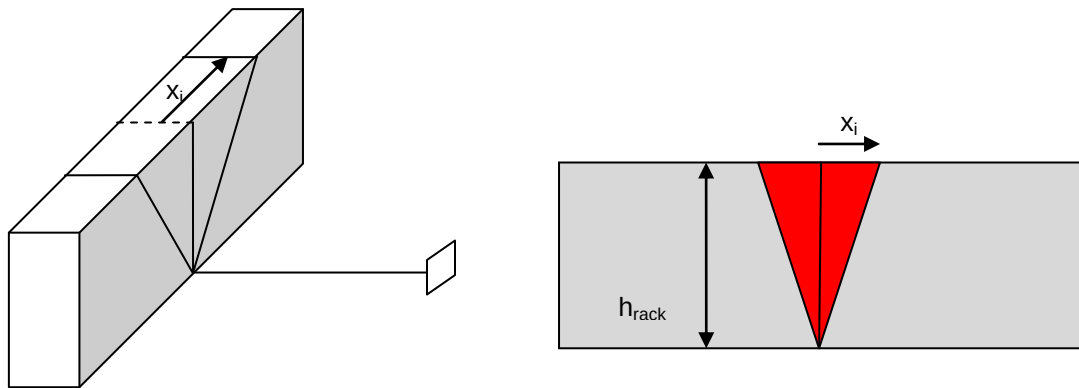


Figure 16 : Représentation schématique de la propagation par rayonnement entre rack

Ce flux est calculé en considérant une surface en feu de forme triangulaire d'une émittance de 100 kW/m². Cette surface en feu se situe à une distance à la cible égale à la largeur de l'allée. Il est supposé qu'il y a propagation au rack voisin dès que le flux incident atteint la valeur de 8 kW/m².

Le facteur de forme pour une surface en feu de forme triangulaire est donné par l'expression visible en Figure 17.

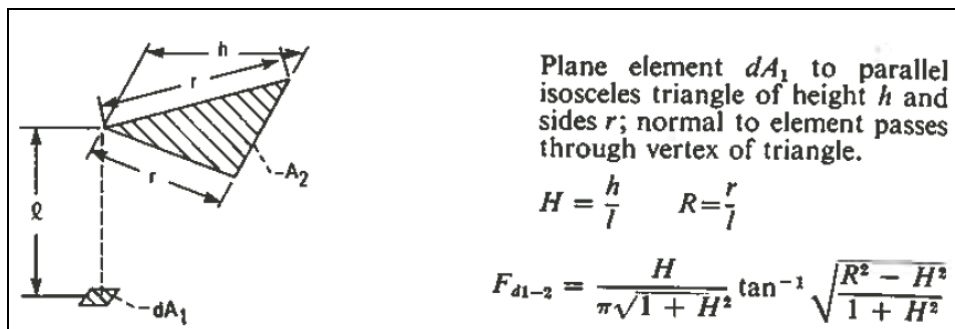


Figure 17 : Expression du facteur de vue pour une surface en feu de forme triangulaire (extrait du Thermal Radiation Heat Transfer (R. SIEGEL, J.R. HOWELL, 1992))

Le calcul est fait pour chaque allée dans la méthode et à chaque instant pour s'assurer s'il y a propagation ou non.

5.2.3.2 LE CAS DU FLASH OVER

Les essais réalisés avec des buchettes en bois pour la campagne expérimentale AFIOLOG ont montré qu'en renforçant la toiture, la propagation ne se faisait plus progressivement de rack en rack par rayonnement mais plus brutalement via un embrasement généralisé de tous les derniers niveaux de racks. Ce phénomène de flashover se rencontre fréquemment dans les milieux confinés. Le fait de renforcer la toiture a engendré un plus grand confinement de la cellule ce qui a permis aux fumées chaudes de s'accumuler en partie supérieure du stockage. Dès lors que

ces fumées chaudes ont atteint la température d'auto-inflammation des produits, l'embrasement brutal s'est produit.

Quand l'incendie commence à prendre de l'ampleur, la production de fumées chaudes augmente significativement. Dès lors que cette production devient trop importante pour qu'elle soit évacuée par les exutoires, une couche chaude se forme en partie supérieure de la cellule. Cette couche chaude est d'abord contenue dans les cantons puis, son épaisseur augmentant, elle peut s'étendre sous la totalité de la toiture de la cellule. Au final, cette couche chaude peut impacter le combustible, surtout les derniers niveaux, et conduire à un embrasement généralisé des ceux-ci, c'est le phénomène de flash-over. Il est à noter que cette évolution jusqu'au flash-over n'est pas obligatoire. En effet, deux situations au moins peuvent conduire à l'absence d'un flash-over :

- Si la puissance dégagée est insuffisante pour produire une couche chaude suffisamment épaisse et chaude (stockage de bouteilles d'eau par exemple) ;
- Si la toiture présente une surface d'ouverture suffisante pour évacuer la chaleur produite. Ceci pourrait survenir notamment avec une toiture relativement fragile, du type fibrociment (§ 5.2.5) ou dans le cas de grande surface d'exutoire ou de couverture thermo fusible.

Le critère de propagation par flash-over retenu dans la méthode est de 250°C. Cela constitue une des températures d'inflammation les plus basses identifiées parmi les produits susceptibles d'être stockés, Tableau 5.

Solides	Température d'inflammation en °C
Bois	De 280 à 340
Charbon	250
Charbon de bois	De 250 à 350
Coton	450
Polyéthylène	350
Polystyrène	490
Polyamide	425
Mousses polyuréthanes	330

Tableau 5 : Température d'inflammation de quelques solides courants

5.2.4 PROPAGATION AU SEIN D'UN RACK

5.2.4.1 PROPAGATION AU SEIN D'UN RACK ALLUME PAR RAYONNEMENT

La propagation a été établie à partir d'observations réalisées lors de différents essais, ceux réalisés lors du projet FLUMILOG mais également lors d'autres essais à plus petite échelle. L'exemple proposé pour illustrer ce choix est celui des doubles racks car il est le plus simple et le plus répandu.

Les images infrarouge extraites des essais du projet « Caractérisation des feux industriels » (Carrau, 2004) illustrent bien les différentes phases de propagation des flammes au sein de la largeur d'un rack. La Figure 18 présente les 5 grandes phases de cette propagation :

1. **L'apparition des premières flammes** se situe sur les arrêtes verticales des cartons au niveau de la zone centrale. La propagation du feu s'effectue via le carton et n'a pour le moment lieu que dans cette zone centrale. L'intensité de feu est déjà plus importante aux niveaux 2 et 3 qu'au niveau 1 (le niveau inférieur).
2. **La phase de croissance ascendante** se termine avec la présence de la flamme au sommet et au-dessus du rack. Les faces inférieures des cartons commencent à brûler au niveau de l'axe central. Ce dernier est, à ce stade, le principal vecteur de propagation en jouant le rôle d'une cheminée.
3. **La phase de propagation horizontale** commence par la partie supérieure du stockage. Cette étape dans la propagation du feu amène à la mise en place d'un feu formant un V.
4. **La phase de propagation descendante** est caractérisée par la progression vers les niveaux inférieurs du feu. Celui-ci conserve une forme de V.
5. **L'embrasement complet** est obtenu une fois que la phase descendante est terminée.

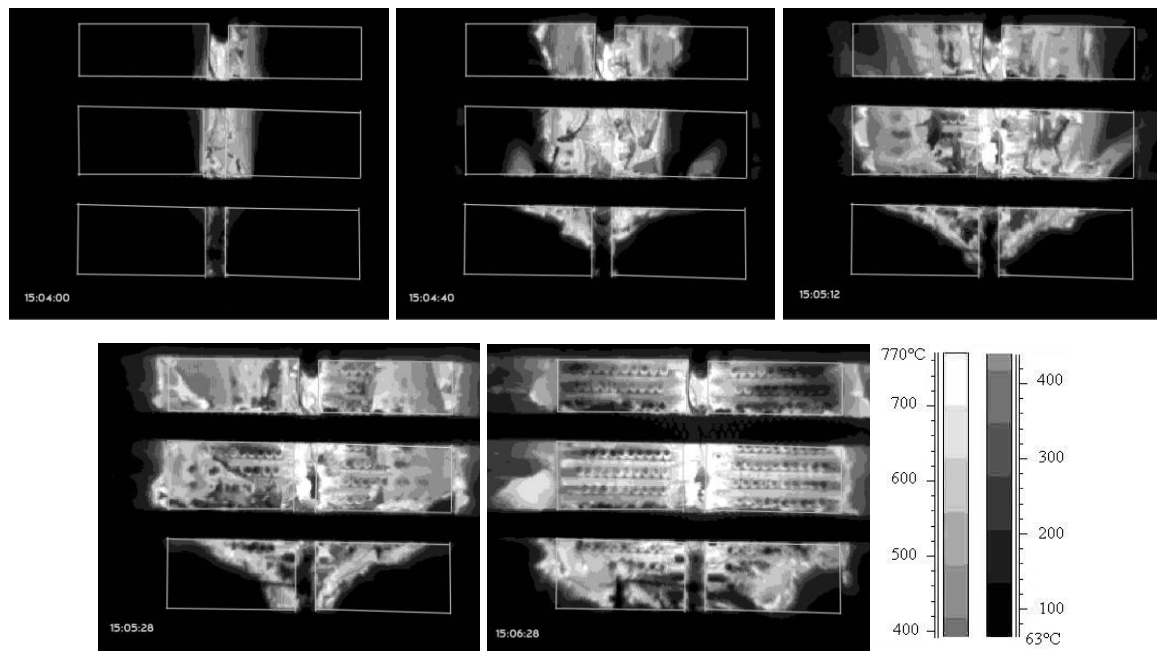


Figure 18 : Les 5 grandes phases de la propagation du feu au sein d'un rack illustrées par des images infrarouge

Ces différentes phases de propagation au sein d'un rack sont présentées sur les schémas visibles Figure 19 et Figure 20.

Une phase de propagation initiale de la flamme est considérée uniquement pour le rack de départ. C'est lors de cette phase qu'est calculée la puissance initiale P_{ini} .

Le mode de stockage en rack a la particularité de créer des cheminées verticales et horizontales qui provoquent une accentuation de l'entraînement d'air (Ingason, 1994). Le feu est supposé partir du centre du rack à sa base et sa propagation verticale est alors rapide grâce, principalement, à la convection naturelle qui favorise l'admission d'air frais entre les palettes dans le feu : phénomène de tirage ou effet cheminée. Le panache constitué de gaz chauds monte au plafond sous l'effet des forces d'Archimède (voir également la première image IR de la Figure 18).

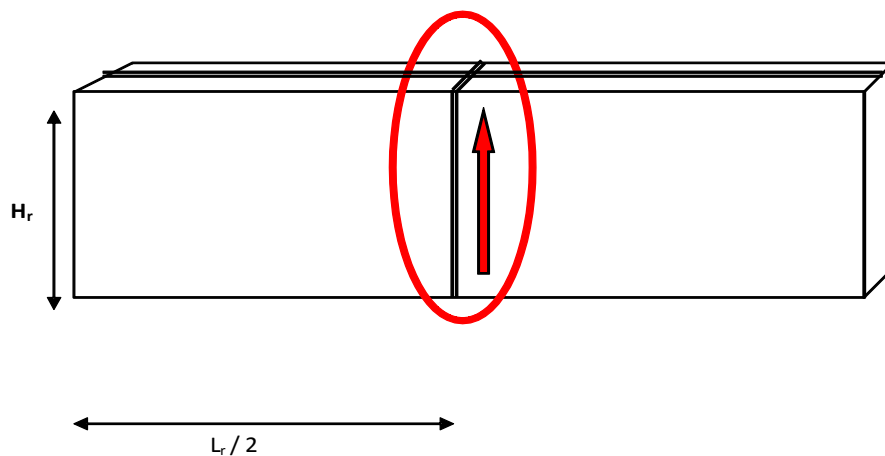


Figure 19 : Première phase de propagation dans un rack

Après s'être propagé verticalement au cœur du rack, le feu commence sa propagation horizontale jusqu'à atteindre toute la largeur du rack sur le dernier niveau en formant un V (Figure 20 et 3^{ème} image IR de la Figure 18).

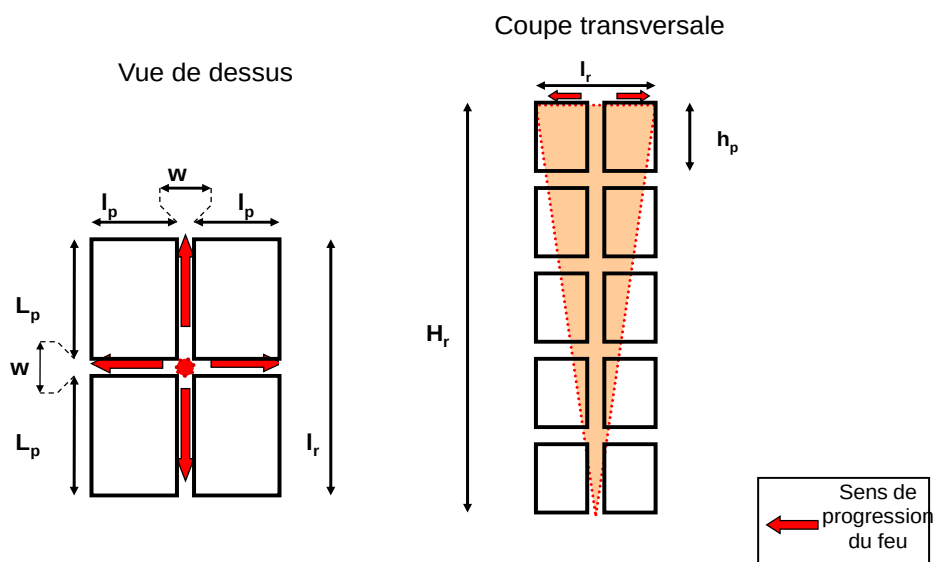


Figure 20 : Propagation en largeur dans le rack

La propagation s'effectue ensuite dans la longueur du rack. Des simulations réalisées avec le logiciel FDS (Fire Dynamics Simulator) présentent les mêmes phases de propagation dans la longueur de rack que celles observées lors des essais du projet « Caractérisation des feux industriels » (Carrau, 2004). Tout d'abord, une montée rapide de la flamme par effet cheminée (Figure 21) puis, la propagation s'effectue en formant un « V » jusqu'au bout de la rangée de rack (Figure 22) puis le feu descend vers le sol (Figure 23). Le schéma de la Figure 24 illustre également ces différentes phases.

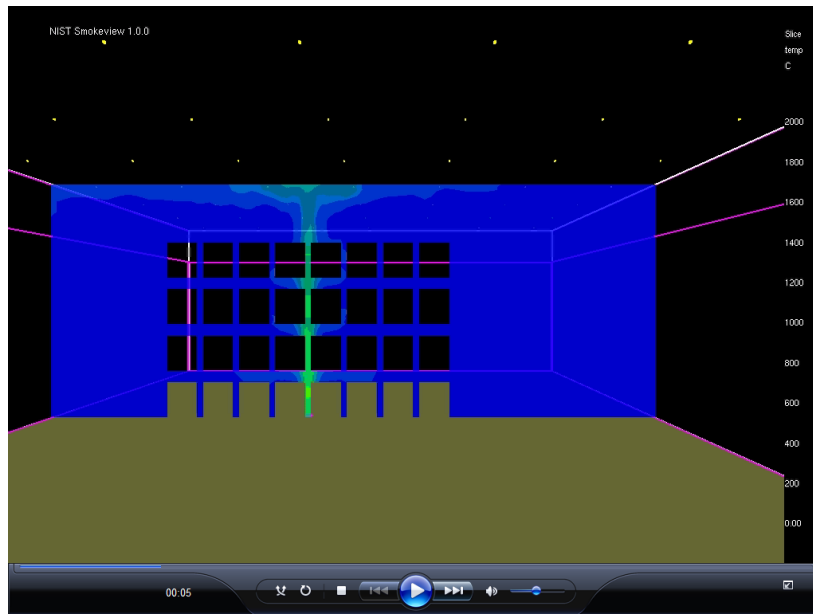


Figure 21 : Effet cheminée

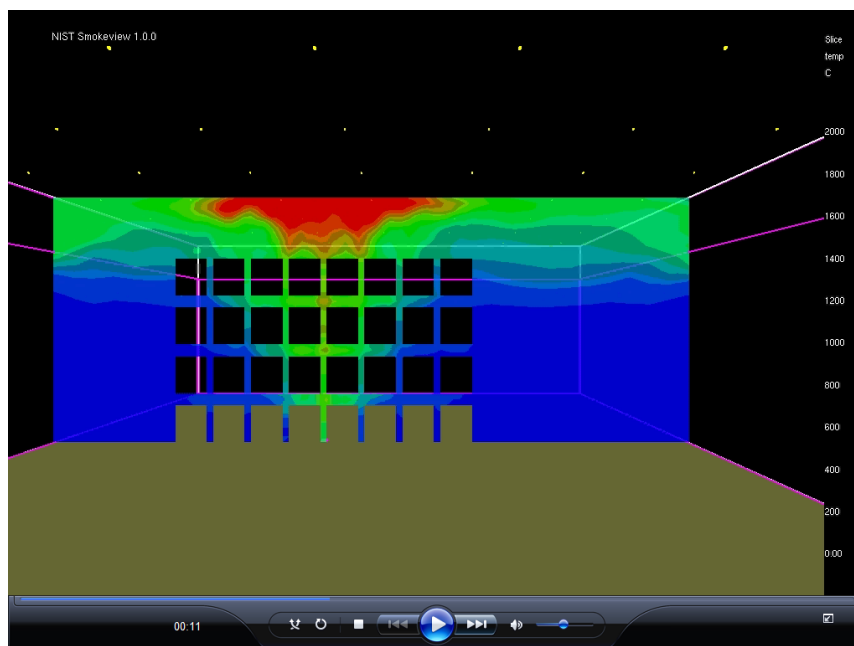


Figure 22 : Propagation en « V »

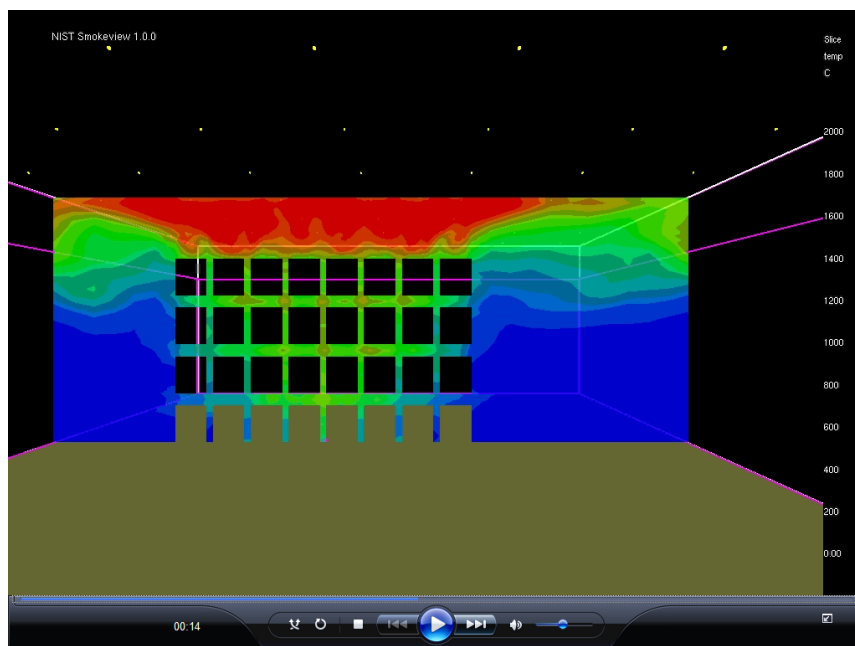


Figure 23 : Descente du feu vers le sol

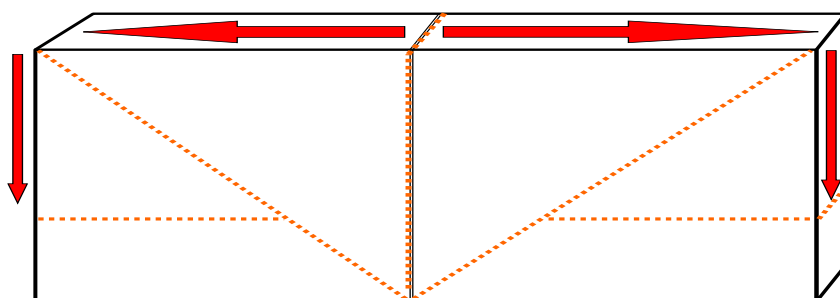


Figure 24 : Schéma de propagation dans un rack

Allumage en partie supérieure

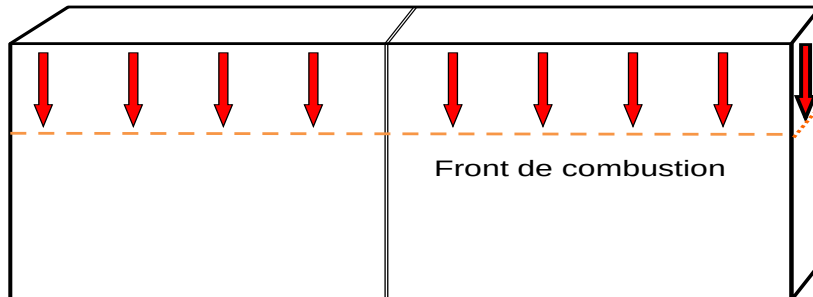


Figure 25 : Schéma de propagation dans le cas d'une propagation par flash-over

5.2.5 CALCUL DE LA SURFACE DE RECOUVREMENT DU COMBUSTIBLE PAR LA TOITURE

Lors d'un incendie d'entrepôt, la toiture influence la combustion à travers deux phénomènes : d'une part, sa capacité à rester en place et donc à limiter la ventilation du foyer et d'autre part, lors de son effondrement, des morceaux plus ou moins importants vont en effet recouvrir le combustible et ainsi limiter leur combustion.

L'influence de la toiture sur la cinétique d'effondrement est représentée par le terme $S_{chute_toit}(t)$ qui intervient dans l'équation d'évolution de la surface de pyrolyse.

$$S_{chute_toit}(t) = S_{feu_plafond}(t - t_{retard_toit}) \times Coef_toit$$

Où $S_{chute_toit}(t)$: Surface couverte par des éléments de toit au cours du temps (m^2),

t_{retard_toit} : Durée pendant laquelle le matériau de toiture soumis aux flammes est censé résister et ne pas s'effondrer (s),

$S_{feu_plafond}(t)$: Surface du plafond de la cellule atteinte par les flammes (m^2),

$Coef_toit$: Taux de recouvrement du combustible par les éléments effondrés de toiture (-).

En pratique, un élément de toiture soumis aux flammes va résister un certain temps, noté t_{retard_toit} , en fonction de sa nature et de la nature de la structure qui le supporte. La surface de toiture effondrée est donc proportionnelle à la surface en feu sous le plafond, t_{retard_toit} minutes avant. Le pourcentage de recouvrement du combustible $Coef_toit$ dépend également de la nature de la toiture.

Le fibrociment se désagrègeant lors d'un feu, la résistance d'une toiture en fibrociment est faible de l'ordre de 5 minutes. De la même manière, le recouvrement du combustible est très faible, environ 5%.

Pour des toitures métalliques ou composées de panneaux sandwich, leur résistance dépend principalement de la résistance des pannes les supportant avec une limite au-delà de 30 minutes. En effet, même si les pannes résistent plus de 30 minutes la dilatation des éléments de toiture ne sera plus négligeable et pourra conduire à leur chute. Plus une toiture comporte de couches, plus la surface de combustible susceptible d'être recouverte sera grande. Ainsi, le coefficient de recouvrement croît entre une toiture métallique simple peau et une toiture métallique multicouches puis entre une toiture multicouches et une toiture en panneaux sandwich avec de la laine de roche. La seule exception est la toiture en panneaux sandwichs avec polyuréthane à cause de son caractère combustible : surface de pyrolyse du polyuréthane et surface supplémentaire recouverte se compensent mutuellement. Pour cette dernière le coefficient est le même que pour une toiture métallique simple peau.

Dans le cas de panneaux en béton (sans pannes), l'intégrité de la toiture dépend majoritairement de la résistance des poutres supportant les panneaux et enfin pour une dalle béton autoportante c'est la résistance de la dalle qui détermine sa durée de résistance. La rigidité des panneaux en béton conduit à un pourcentage de recouvrement beaucoup plus élevé que pour les autres types de toiture. La dalle en béton autoportante constitue un cas limite extrêmement favorable au recouvrement du combustible.

Le retour d'expérience montre une forte disparité du pourcentage de recouvrement pour un même type de toiture. A titre d'exemple, le lecteur pourra se référer aux annexes A à E. Les valeurs retenues pour le pourcentage de recouvrement (Tableau 6) sont basées sur des cas défavorables et sont donc conservatives. Toutefois, l'influence de cette surface de recouvrement est faible par rapport à la totalité de la surface enveloppante des racks.

Désignation du toit	% de couverture effondrée recouvrant le combustible sur la surface supérieure des racks
Fibrociment	5
métallique simple peau	30
métallique multicouches	40
panneaux sandwich polyuréthane	30
panneaux sandwich laine roche	50
panneaux béton (sans pannes)	70
dalle béton autoportante	85

Tableau 6 : Influence de la nature de la toiture sur la cinétique d'effondrement

5.2.6 LIMITATION DE LA PROPAGATION EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN OXYGÈNE

L'objectif de ce calcul est de limiter la vitesse de propagation dès lors qu'il n'y a pas assez d'oxygène au niveau du foyer. Cette réduction peut également se traduire par un allongement localisé de la durée de combustion d'une palette.

Le principe du calcul est le suivant : la vitesse de propagation ne dépend que du combustible (température d'inflammation et chaleur de combustion) dès lors qu'il y a suffisamment d'oxygène. Si cette hypothèse est facilement vérifiée au début de l'incendie, elle peut ne plus l'être dès que la surface en feu a augmenté.

Dès lors que la propagation du feu dépendra de la quantité d'air susceptible d'être présente au niveau du foyer, le principe du calcul est le suivant à chaque pas de temps :

- détermination de l'accroissement maximal de la surface de flamme en faisant l'hypothèse d'une quantité d'oxygène suffisante ;
- calcul de la quantité d'oxygène disponible ;
- bilan des quantités entrantes et sortantes de la cellule en fonction de la quantité de fumées produites par cet accroissement de surface en feu (air entrant par les ouvertures des faces latérales, fumées sortant par les exutoires ou en raison de l'ouverture du toit),
- si la quantité d'oxygène est insuffisante, la propagation est réduite jusqu'à ce que la surface en feu soit compatible avec la quantité d'oxygène apportée. La nouvelle position du front de flamme est recalculée et le calcul peut être poursuivi pour ce pas de temps.

Les différentes étapes sont schématisées sur la Figure 26.

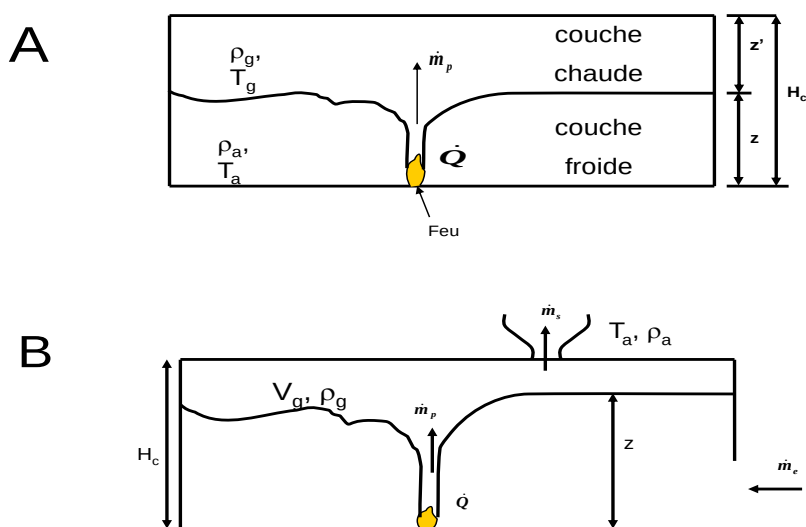


Figure 26 : Principe de combustion suivant l'intégrité de l'enveloppe

A : Enveloppe intègre ; B : présence d'ouvertures.

Pour que l'accroissement du feu soit en adéquation avec l'air disponible dans la cellule, il faut réaliser un calcul itératif de la position réelle du feu en réduisant le cas échéant les vitesses de propagation avec un coefficient de ventilation (voir Figure 27 et logigramme en Figure 28).

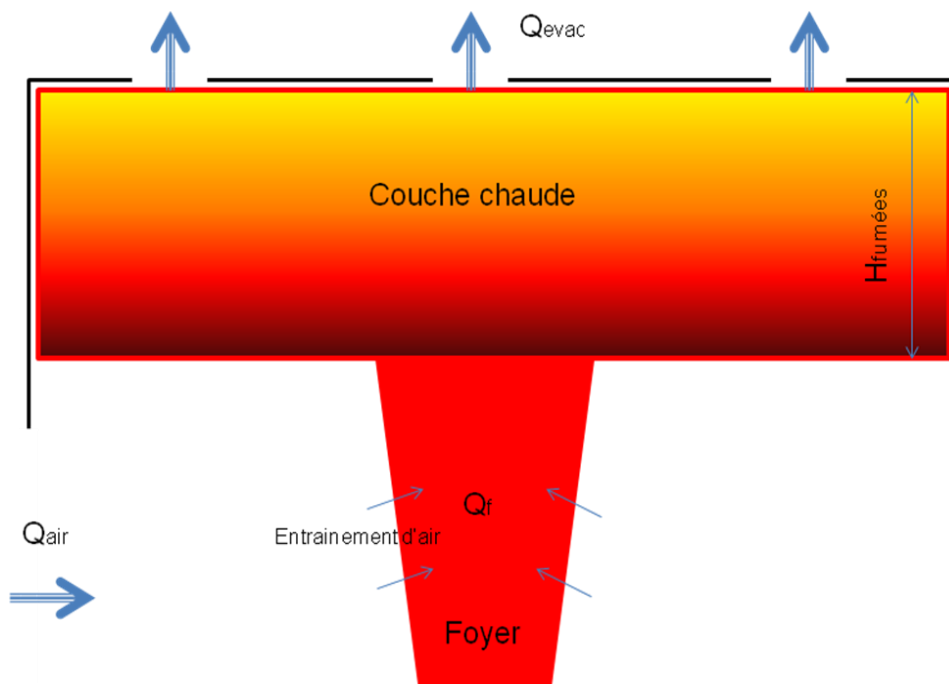


Figure 27 : Schéma du bilan sur la couche chaude

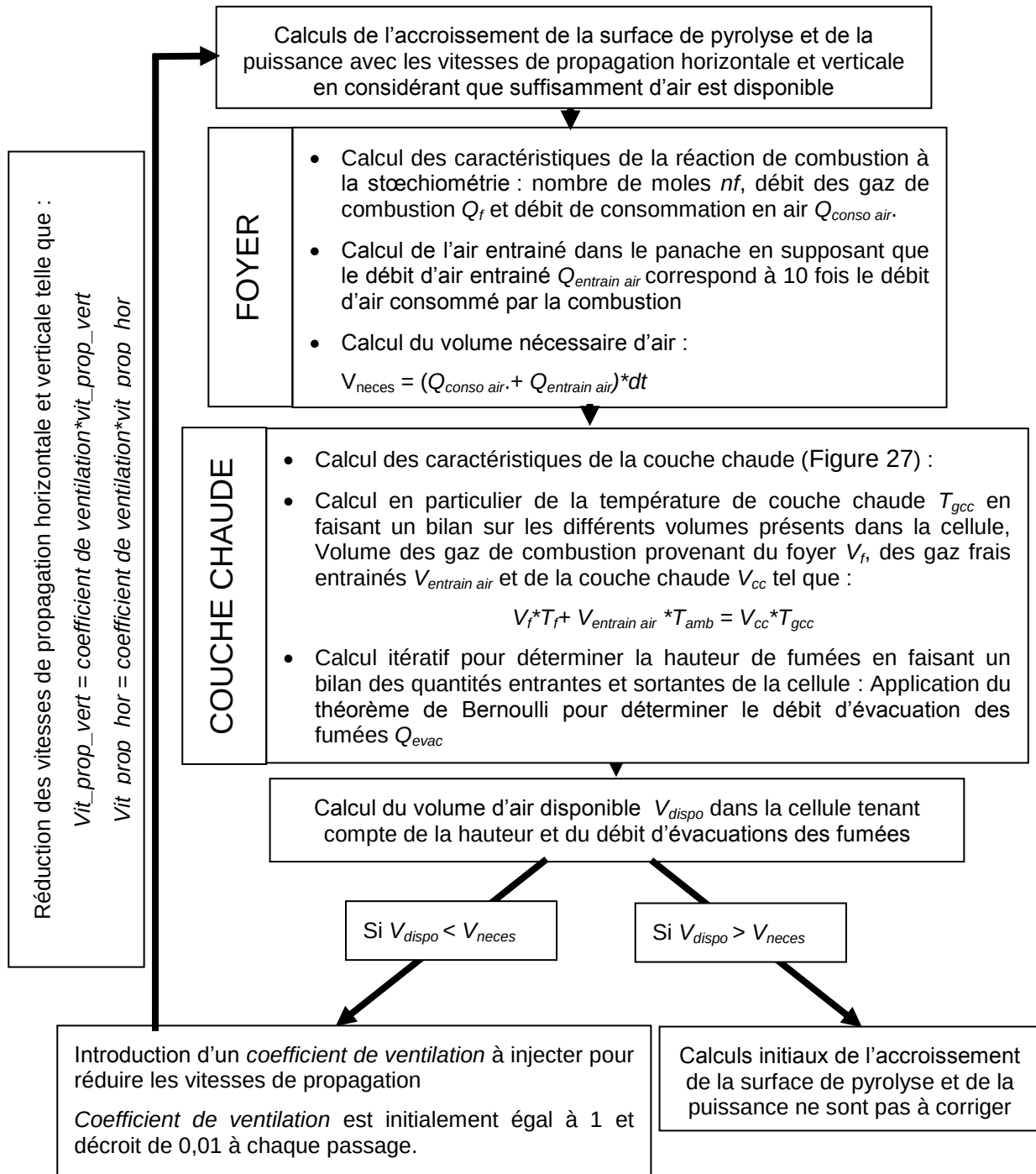


Figure 28 : Logigramme du calcul de limitation de la propagation de l'incendie en raison du manque d'oxygène

Le coefficient de ventilation, outre son influence sur la vitesse de propagation à travers l'accroissement de la surface en feu, joue également sur la puissance libérée par les palettes et sur leur durée de combustion. Dans une situation bien ventilée (coefficient de ventilation égal à 1), la durée de combustion et la

puissance libérée correspondent aux valeurs calculées au paragraphe 5.1.1.4 ($P_{\text{réf}}$, $T_{\text{comb_pal_réf}}$). Dans une situation sous-ventilée avec comme cas limite un coefficient de ventilation égal à 0, la puissance libérée par une palette est divisée par 3. Par conséquent, il faut trois fois plus de temps pour brûler complètement une palette dans ce cas là.

Entre ces deux états limites, la durée de combustion d'une palette et la puissance libérée varie suivant un polynôme d'ordre deux (Figure 30). Dans le calcul, la puissance est modulée à chaque instant en intervenant sur la puissance surfacique et sur la durée de combustion via le coefficient $Coef_{\text{ventil}}$ qui vaut :

$$Coef_{\text{ventil}} = -0,5 \text{coefficient } t_de_ventilation^2 + \frac{7}{6} \text{coefficient } t_de_ventilation + \frac{1}{3}$$

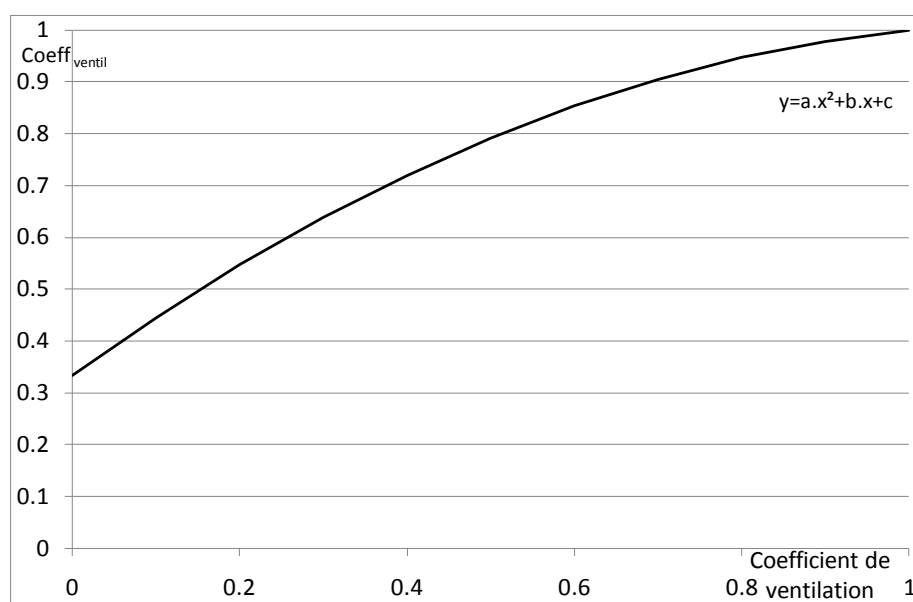


Figure 29 : Evolution du coefficient de pondération en fonction du coefficient de ventilation

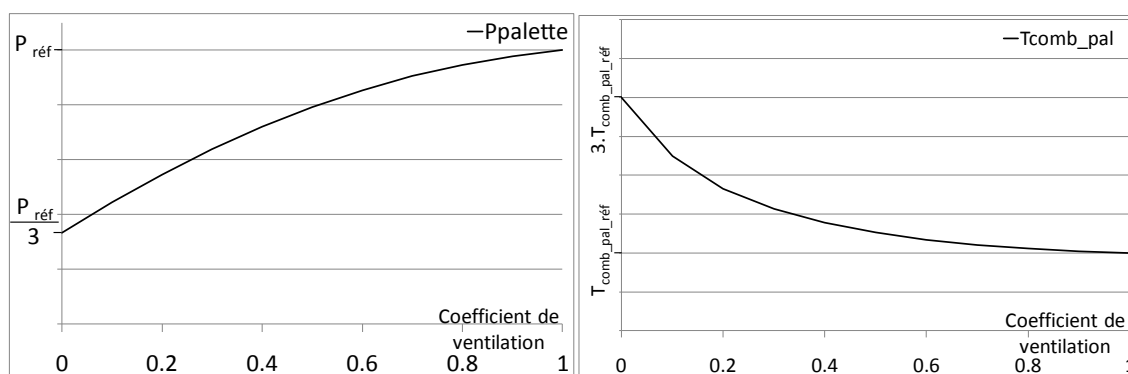


Figure 30 : Puissance libérée et temps de combustion d'une palette

A ce stade de la méthode, la position du front de flamme est connue. Il est alors possible de déterminer la puissance de l'incendie ainsi que la surface de toiture ouverte susceptible de laisser passer les flammes.

L'objet du paragraphe suivant est de calculer les caractéristiques des flammes à partir de ces données et ensuite d'en évaluer les flux thermiques sur les cibles.

5.3 CALCUL DES CARACTERISTIQUES DES FLAMMES

Comme présenté dans la partie A pour les feux de liquide, il est nécessaire de définir certaines propriétés des flammes, pour pouvoir calculer les effets sur l'environnement dus aux flammes. Le parti a été pris de retenir le modèle de flamme solide. Pour utiliser ce modèle, il faut connaître, pour chacune des flammes :

- leur forme,
- leur hauteur,
- leur position,
- leur émittance.

Les paragraphes suivants précisent les hypothèses retenues pour la détermination de toutes ces grandeurs.

5.3.1 CHOIX DE LA FORME DE FLAMME

La flamme de diffusion qui résulte d'un feu de solide à l'air libre est soumise aux conditions extérieures telles que le vent. Sous de telles conditions, il est très difficile de définir une forme géométrique de flamme qui soit constante dans le temps comme le montre la Figure 31 reproduisant les images de l'un des essais à moyenne échelle.





Figure 31 : Formes et surfaces des flammes lors de l'un des essais à moyenne échelle

Pour juger de l'influence de la géométrie de la flamme sur le flux radiatif, les essais à moyenne échelle ont été analysés en faisant une estimation tout au long de ces essais de la surface de flamme apparente sur chaque face de la cellule. La Figure 32 présente pour l'évolution de la surface de flamme S_f côté Est ainsi que le flux radiatif à différentes distances de la cellule pour l'essai présenté précédemment. Un rapport flux/surface de flamme a ensuite été calculé pour chaque distance de mesures de flux (Figure 33).

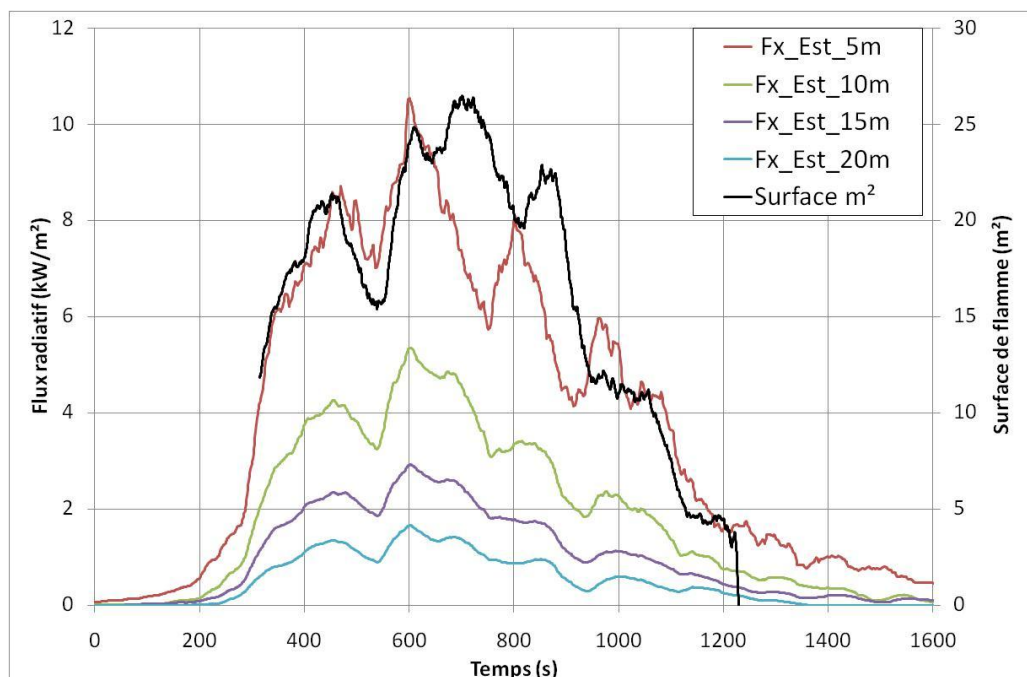


Figure 32 : Evolution du flux radiatif et de la surface de flamme au cours du temps

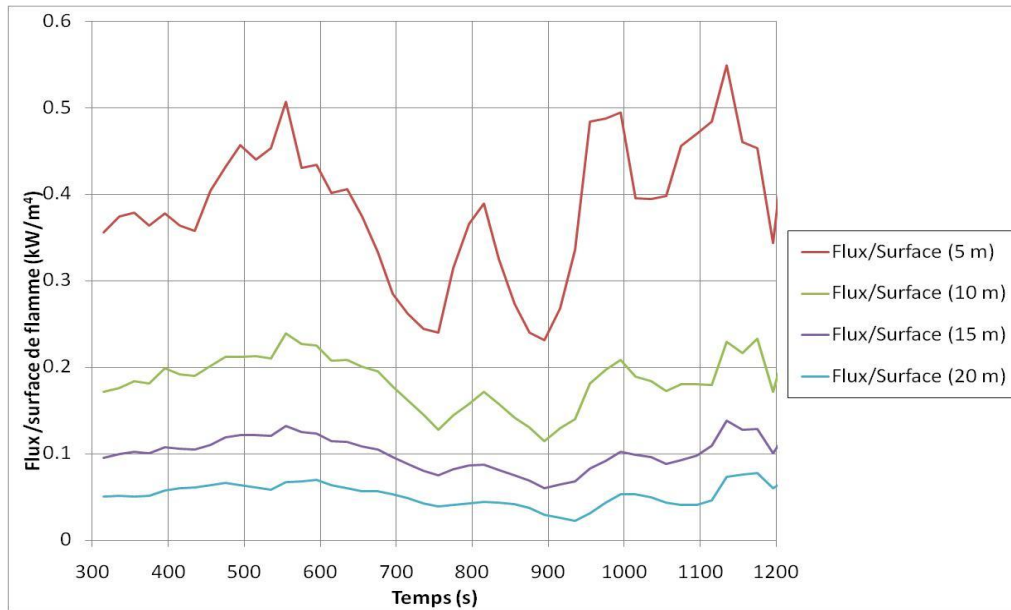


Figure 33 : Rapport Flux/surface de flamme à différentes distances

Après analyse des résultats, il s'avère que ce rapport flux/surface de flamme est quasi-constant à une distance donnée dans le champ moyen et lointain.

Pour mémoire, le flux radiatif ϕ s'écrit : $\phi = \phi_0 \tau F$

Où τ le facteur d'atténuation atmosphérique est constant à une distance donnée,

F le facteur de vue dépend de la surface de flamme,

ϕ_0 l'émittance dépend du combustible (puissance dégagée).

Si le rapport flux/surface de flamme est constant, alors il en est de même du ratio $\frac{\phi_0 F}{S_f}$. Il est donc important que les valeurs des deux paramètres, émittance et

surface de flamme soient en concordance. Côté Est, la surface de flamme estimée est de 24 m², valeur qui correspondrait au vu des flux mesurés à une émittance moyenne de 110 kW/m². L'émittance étant déterminée, différentes formes de flamme ont ensuite été testées afin de déterminer si ce paramètre possédait une influence ou non.

A surface de flamme identique, la flamme a été considérée de 3 façons :

- Cas 1 : flamme de forme carrée,
- Cas 2 : flamme de forme rectangulaire couvrant toute la largeur de la face,
- Cas 3 : flamme de forme rectangulaire dont la hauteur apparente est fixe et égale à la hauteur de la cellule.

La Figure 34 présente les résultats obtenus pour la face Est de l'essai 2. De façon générale, ceux-ci montrent que la forme de flamme n'a que peu d'importance surtout dans le champ lointain.

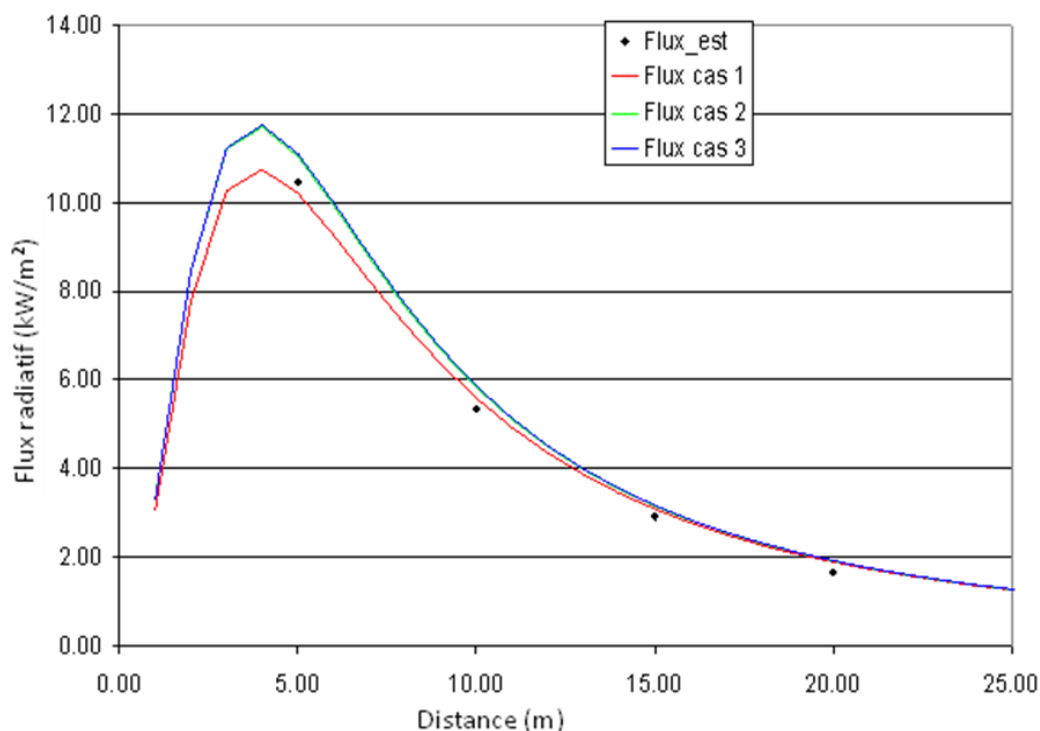


Figure 34 : Evolution des flux radiatifs modélisés pour les 3 configurations de forme de flamme

Dans la méthode, si le combustible est présent sur la totalité de la face considérée, la flamme est supposée s'étendre sur toute la largeur de cette face. Quant à la hauteur de flamme, elle est calculée via la corrélation présentée dans le paragraphe suivant.

5.3.2 HAUTEUR DE FLAMMES

Il existe dans la littérature de nombreuses corrélations permettant d'estimer la hauteur des flammes issues d'un feu de nappe à partir de la puissance et de l'étendue de l'incendie. Il est possible d'écrire ces corrélations sous la forme

$$\frac{H}{D} = f(Q^*)$$

où H est la hauteur des flammes, D le diamètre de la nappe et Q^* la puissance adimensionnée de l'incendie. A chaque corrélation est associé un domaine de validité particulier.

Globalement, on peut noter qu'il existe deux comportements distincts : le rapport H/D varie comme Q^* élevé à la puissance 2 pour $Q^* < 0.1$, et comme Q^* élevé à la puissance $2/5$ lorsque $Q^* > 1$.

Dans le cadre de FLUMILOG, cinq corrélations ont été étudiées parmi les plus employées dans la littérature. Celles-ci sont résumées dans le Tableau 7.

Corrélation	Domaine de validité	Valeur de H/D
Thomas	$0.75 < Q^* < 8.8$	$3.4 Q^{*0.61}$
Steward	$1 < Q^* < 1 \cdot 10^4$	$4.16 Q^{*2/5}$
Zukoski	$Q^* < 0.15$	$40 Q^{*2}$
	$0.15 < Q^* < 1$	$3.3 Q^{*2/3}$
	$1 < Q^* < 40$	$3.3 Q^{*2/5}$
Heskestad	$0.12 < Q^* < 1.2 \cdot 10^4$	$3.7 Q^{*2/5} - 1.02$
Cox et Chitty	$0.13 < Q^* < 0.28$	$15.1 Q^{*2}$
	$0.28 < Q^* < 0.55$	$3.2 Q^*$

Tableau 7 : Corrélations étudiées, classées par ordre chronologique

Elles sont exploitées en utilisant l'hypothèse d'un débit calorifique surfacique indépendant de la taille de la nappe. La puissance adimensionnée Q^* peut se mettre sous la forme :

$$Q^* = P_s \cdot \frac{\pi}{4 \times 1110 \sqrt{D}} \simeq \frac{P_s}{1413 \sqrt{D}}$$

Où P_s : Puissance surfacique (kW/m²) est égale à la puissance de l'incendie à l'instant t divisée par la surface en feu au sol à cet instant.

Cette expression est alors introduite dans les corrélations étudiées afin d'exprimer la hauteur H des flammes en fonction du diamètre D de la nappe telle que :

$$\frac{H}{D} = f(Q^*) \Leftrightarrow H = D \times f\left(\frac{P_s}{1413 \sqrt{D}}\right)$$

Pour les corrélations en Q^{*2} , ceci implique que la hauteur de flamme ne dépend pas du diamètre de la nappe. Ainsi, pour la corrélation de Zukoski par exemple, la hauteur des flammes devient indépendante de la taille de la nappe lorsque celle-ci atteint une certaine valeur. La Figure 35 montre un exemple d'application de la méthode pour une puissance surfacique de 750 kW/m². La hauteur des flammes y est représentée en fonction de la taille de la nappe.

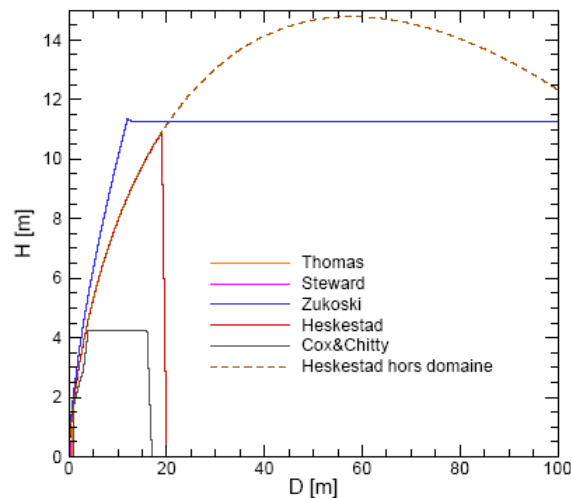


Figure 35 : Hauteurs de flamme fonction du diamètre pour les 5 corrélations étudiées

La corrélation de Zukoski couvre l'ensemble du domaine de valeur de Q^* typiquement rencontré lors d'un feu d'entrepôt, ce qui n'est pas le cas, par exemple, de la corrélation d'Heskestad.

En se basant sur cette corrélation, il est donc possible de donner une formule très simple pour estimer la hauteur des flammes issues d'un feu d'entrepôt. Lorsque la puissance Q^* est inférieure à 0.15, la hauteur de flamme est indépendante de la taille de la nappe. Lorsque Q^* est supérieure à 0.15, le rapport H/D varie comme $Q^{*2/3}$. Il est considéré que cette approche est valide même pour $Q^* > 1$, afin d'obtenir une valeur proche de la corrélation de Thomas pour les valeurs de Q^* jusqu'à environ 10. Une valeur supérieure à 10 est jugée non représentative d'un feu d'entrepôt.

$$H = \min \left[\left(\frac{P_S}{223} \right)^2 ; 0.026(P_S D)^{2/3} \right] \quad \text{avec} \quad P_S < 14130\sqrt{D}$$

Dans cette expression, P_S désigne la puissance surfacique en kW/m^2 et H et D s'expriment en mètres. A noter que la hauteur de flamme s'entend à partir du haut du stockage. La Figure 36 donne une représentation de cette formule.

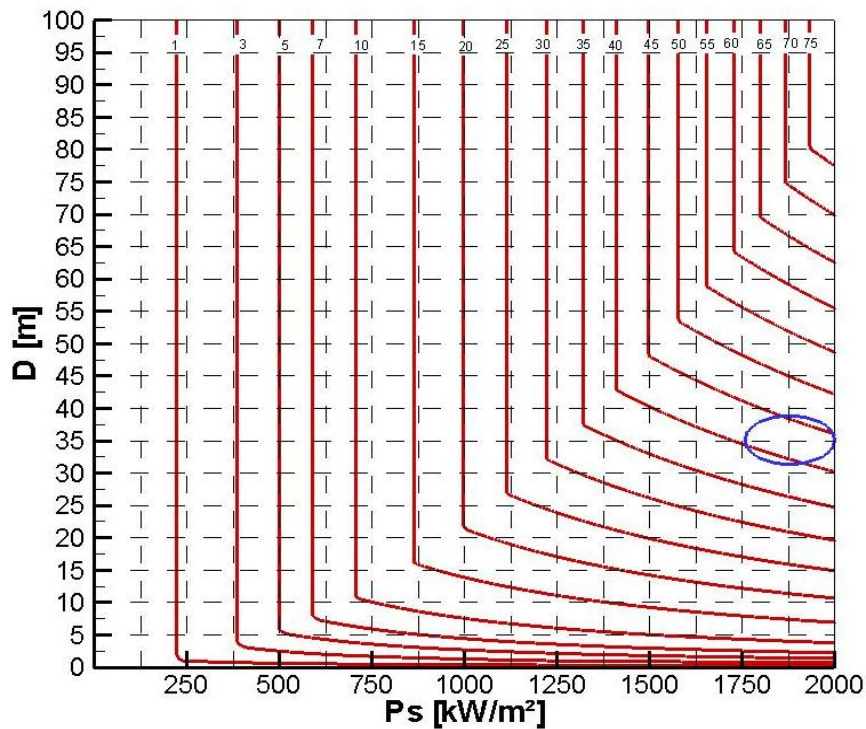


Figure 36 : Hauteur (en mètres) des flammes en fonction du diamètre de la nappe et de la puissance surfacique

Cette formule a ensuite été bornée par l'essai à échelle 1 pour lequel les flammes ne s'élevaient pas au-dessus du stockage à plus de 1,5 fois la hauteur de stockage. Au final, la hauteur globale de la flamme se définit de la façon suivante :

$$H = \text{Hauteur} + \min(1.5 \times \text{Hauteur}; \min\left[\left(\frac{P_s}{223}\right)^2; 0.026(P_s \cdot D)^{2/3}\right])$$

Où *Hauteur* : Hauteur de stockage (m).

5.3.3 PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DU VENT ET POSITION DE LA FLAMME

La corrélation permettant de déterminer l'angle d'inclinaison, ξ , d'une flamme en cas de vent est la corrélation de Welker et Sliepcevich (1966):

$$\frac{\tan \xi}{\cos \xi} = 3,3 \times (Fr)^{0,8} \times (Re)^{0,07} \times (2,2)^{-0,6}$$

Avec *Fr*: Nombre de Froude

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

Re: Nombre de Reynolds

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

μ_{air} : viscosité dynamique de l'air ambiant (1.9×10^{-5} (kg.m⁻¹.s⁻¹))

u_w : Vitesse du vent (m/s).

Le choix a été fait de ne pas raccourcir artificiellement la hauteur de flamme en cas de vent comme ceci est fait pour la corrélation de Thomas avec vent. C'est-à-dire qu'avec ou sans vent, la valeur de la hauteur de flamme sera toujours la même. La Figure 37 représente le schéma de la flamme inclinée.

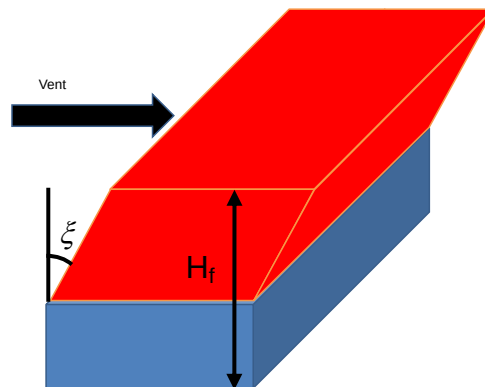


Figure 37 : Schéma de la flamme inclinée par le vent

La vitesse du vent est forfaitairement égale à 5 m/s ce qui correspond à une valeur moyenne observée. En effet, sur les 9 essais réalisés à moyenne échelle, le vent variait entre 1 et 10 m/s. Enfin, il est à noter que les calculs sont systématiquement faits avec et sans vent afin de capter les flux maximums suivant la position de la cible.

La Figure 38 présente le plan en coupe de la flamme dans les configurations sans vent, avec vent, après affaissement ou recul de la paroi. Ces schémas montrent que la hauteur de flamme obtenue sans vent se conserve quelle que soit la configuration. En effet, c'est la longueur de flamme qui se trouve modifiée et qui reste accolée à la paroi quelle que soit la situation. A noter qu'il est également prévu un recul de la flamme dans le cas d'une zone de préparation si la largeur de celle-ci est supérieure à la hauteur initiale de la paroi ainsi que pour certains types de parois (cf. paragraphe 5.4.1).

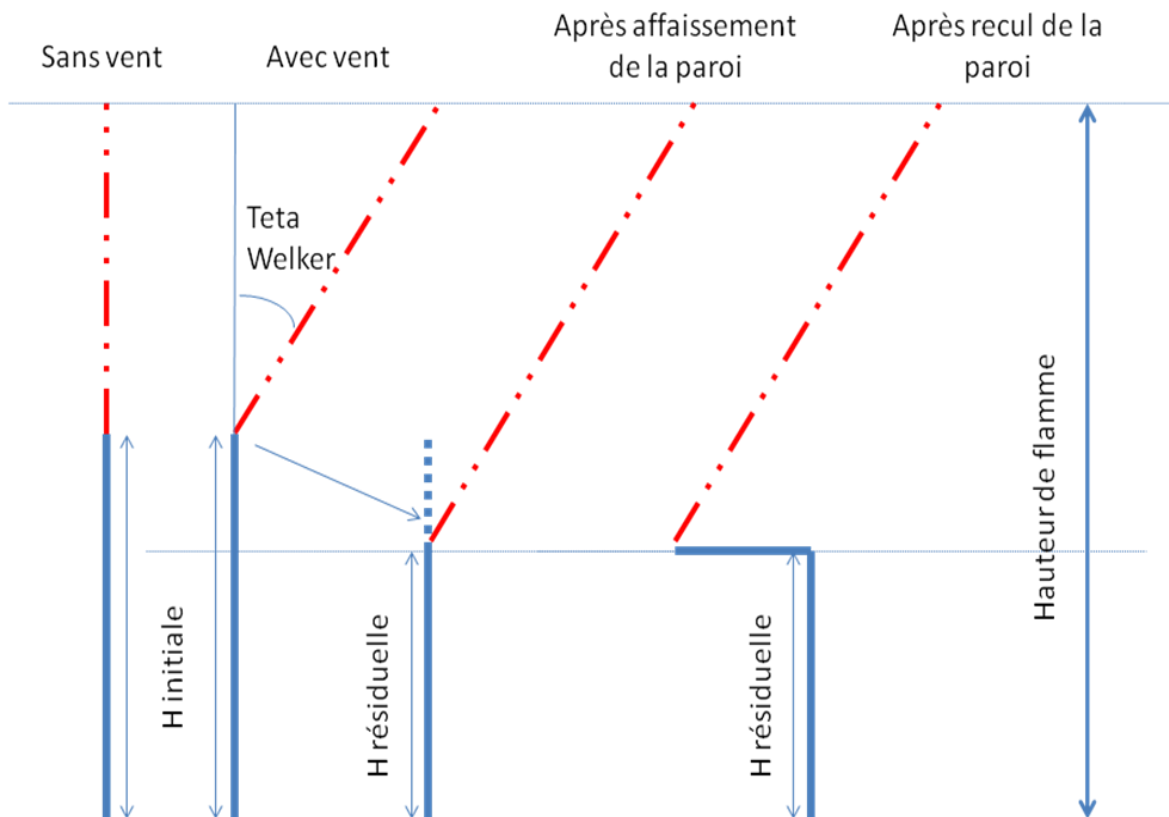


Figure 38 : Flamme soumise à différentes configurations

5.3.4 FRACTION RADIATIVE ET ÉMISSION DES FLAMMES

La fraction radiative et l'émission des flammes dépendent de la taille des feux et plus particulièrement de la qualité de la combustion qui s'y produit. Ces valeurs sont accessibles à l'échelle du laboratoire et à moyenne échelle en considérant les éléments suivants :

La loi de Mudan&Croce, établie pour des hydrocarbures, permet de déterminer le pouvoir émissif :

$$E_{moy} = 140.e^{-0.12D} + 20.(1 - e^{-0.12D})$$

La hauteur de flamme est injectée ensuite pour calculer la fraction radiative du feu. La fraction radiative s'écrit alors :

$$\sigma_R = \frac{E_{moy} S_{flamme}}{\dot{m}'' \Delta H_C}$$

Où la surface enveloppe de flamme $S_{flamme} = \pi D H$ avec $H = 42 D \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0.61}$.

Le calcul intermédiaire donne :

$$\sigma_R = \frac{168 (140.e^{-0.12D} + 20.(1 - e^{-0.12D}))}{\dot{m}^{0.39} \Delta H_C D^{0.305} (\rho_{air} \sqrt{g})^{0.61}}$$

Le calage de la fraction radiative a été fait à l'aide des résultats de l'essai FLUMILOG à grande échelle et, en recherchant le coefficient à appliquer dans la relation précédente. On obtient la relation suivante qui est utilisée pour les feux de solides :

$$\sigma_R = \frac{0.01251732 (140.e^{-0.12D} + 20.(1 - e^{-0.12D}))}{D^{0.305}}$$

La Figure 39 présente la courbe d'évolution de la fraction radiative en fonction du diamètre équivalent intégrant le point de raccordement de l'essai en grand.

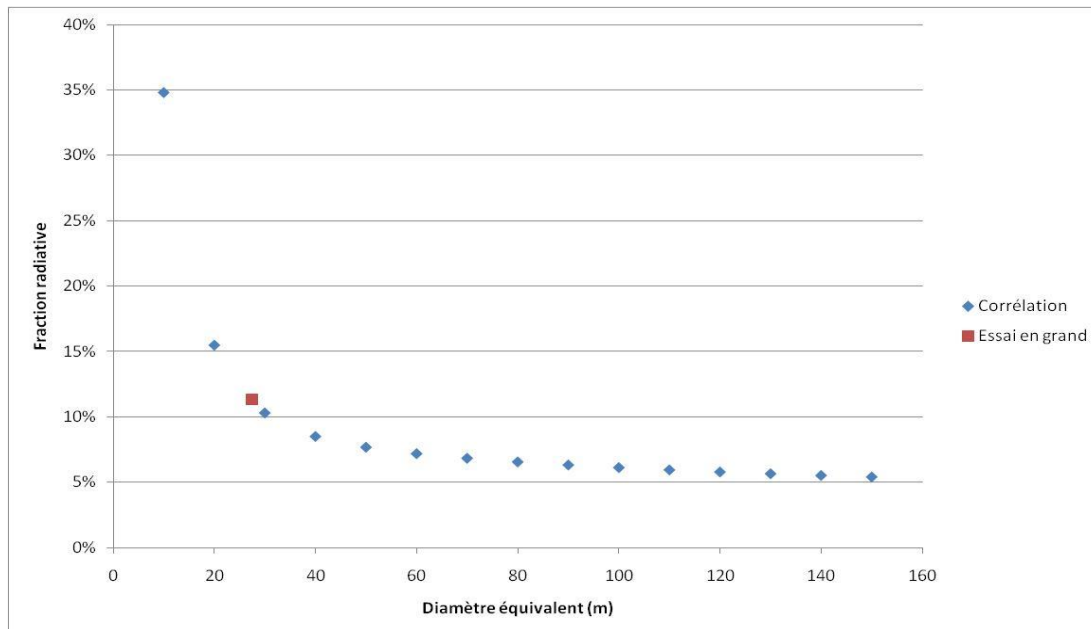


Figure 39 : Evolution de la fraction radiative en fonction du diamètre équivalent

La puissance moyenne rayonnée est alors estimée en multipliant la puissance dégagée par l'incendie à chaque instant par la fraction radiative déterminée selon la formule précédente. L'émittance moyenne est alors calculée en divisant la fraction rayonnée par la surface des flammes.

L'émittance moyenne de la flamme est alors :

$$E_{moy} = \frac{\sigma_R \cdot P(t)}{S_{flammes}}$$

Il est à noter que l'émittance moyenne E_{moy} sur la totalité de la hauteur de flamme est moins forte que les puissances émissives pouvant être atteintes localement, notamment en raison de l'obscurcissement de la flamme par les suies en partie haute.

Sur cette base, la fraction rayonnée varie entre 35% pour les plus petits diamètres équivalents de l'ordre de 10 m et 5% pour les plus grands diamètres équivalents.

5.4 CALCUL DES EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT ET PRISE EN COMPTE D'ECRAN THERMIQUE

Pour mémoire, le calcul du flux reçu en un point donné peut être calculé de plusieurs façons (modèle de source ponctuelle, de flamme solide,...). Le modèle de flamme solide classiquement utilisé jusqu'à présent n'a pas été remis en cause et il est utilisé dans la méthode. La relation suivante permet de calculer le flux radiatif :

$$F = \tau \cdot f \cdot E$$

avec : τ : atténuation atmosphérique

f : facteur de forme

E : émittance

Le facteur de forme f dépendant de la distance, le flux thermique F dépend donc également de la distance entre la cible et la flamme.

Les grandeurs qui n'ont pas été calculées jusqu'à présent sont le facteur de forme et la transmittivité de l'atmosphère. Les paragraphes **4.3.1** et **4.3.2** du descriptif général des feux industriels détaillent le mode de calcul de ces paramètres.

5.4.1 EVOLUTION DES PAROIS

Les dispositions constructives des bâtiments interviennent en constituant des écrans en partie basse des flammes. Suivant leur résistance au feu, les parois sont susceptibles de masquer la partie basse de la flamme sur tout ou partie de la hauteur initiale de la paroi.

5.4.1.1 CARACTERISTIQUES D'UNE PAROI

Toute façade se compose de deux éléments, d'une part la structure support et d'autre part, la paroi proprement dite. Dans certains cas, la structure support est intégrée dans la paroi.

Les structures utilisées pour la construction d'entrepôts sont actuellement de type : poteau acier, portique acier, poteau béton ou portique béton, poteau et portique bois. Une telle structure est caractérisée par sa durée de stabilité au feu sous incendie normalisé, notée R dans la suite et exprimée en minutes. Cette durée de stabilité au feu est estimée en ayant recours à l'arrêté du 22 mars 2004 du Ministère de l'Intérieur, principalement par référence aux méthodes de calcul DTU ou Eurocodes, parfois à partir d'un résultat expérimental.

Les parois utilisées pour la construction d'entrepôts sont actuellement de type : bardage métallique simple ou double peau, panneaux sandwich avec un isolant interne incombustible ou non, béton armé ou cellulaire, maçonnerie (parpaings, briques).

Afin d'être stabilisée par la structure support, des fixations sont utilisées. La durée d'efficacité de ces fixations (dans l'hypothèse d'une sollicitation selon l'incendie normalisé) est notée Y dans la suite et exprimée en minutes.

Toute paroi possède une inertie thermique qui va ralentir la propagation de la chaleur vers sa face non exposée au feu et une étanchéité aux flammes et gaz chauds qui va occulter le rayonnement thermique du feu. Ainsi, la température de la paroi lors d'un incendie restera pendant un certain temps suffisamment basse pour considérer son rayonnement négligeable. Cette durée d'isolation thermique est celle définie par l'arrêté du 22 mars 2004 (dans l'hypothèse d'une sollicitation selon l'incendie normalisé) et est notée I, exprimée en minutes.

Au-delà de cette durée, la paroi va continuer à s'échauffer jusqu'au moment où son étanchéité ne sera plus assurée. Des flammes sont alors susceptibles d'être visibles au travers de la paroi ou de passer par les interstices créés. Cette durée d'étanchéité, telle que définie par l'arrêté du 22 mars 2004, dans l'hypothèse d'une sollicitation selon l'incendie normalisé, est notée E et est exprimée en minutes. En règle générale, la paroi doit faire l'objet d'un essai de résistance au feu sous incendie normalisée (ISO), pour évaluer les grandeurs I et E correspondant à la durée d'isolation thermique et à la durée d'étanchéité aux flammes indiquées dans le rapport d'essai. De la même manière, lorsque le mode de fixation est indiqué, la durée Y est alors égale au degré de stabilité au feu mesuré.

Cas particulier :

Les parois auto-stables sont un cas particulier dans le sens où elles forment un tout sans distinction possible entre la structure et la paroi. Ses caractéristiques se limitent alors à I, E et R.

5.4.1.2 ECHAUFFEMENT DE LA FAÇADE ET FLUX THERMIQUE INDUIT

Lorsqu'un incendie se développe dans une cellule sollicitant thermiquement une façade, tant que la durée I n'est pas atteinte, la façade n'émet pas un rayonnement significatif et elle fait office de barrière radiative.

Le décompte de la durée d'efficacité d'une façade, en ce qui concerne ses critères R, E, I et Y ne débute que lorsque la paroi est sollicitée thermiquement soit à partir du moment où le flash-over a lieu dans la cellule, soit à partir du moment où l'effondrement de la toiture atteint les bords de l'entrepôt.

A partir de l'instant où le critère I est atteint, l'échauffement se fait progressivement du haut de la façade vers le bas. Ce comportement reflète l'augmentation de l'épaisseur de la couche chaude liée au développement de l'incendie à l'intérieur de la cellule.

Il a été retenu que la zone échauffée s'étend jusqu'au bas de la façade à la vitesse de 0.5 m.min^{-1} sur toute sa largeur et ce quel que soit le type de paroi (Figure 40). En termes de température en face non exposée, il est fait l'hypothèse qu'elle croît linéairement de 160°C (soit une émittance de 2.0 kW.m^{-2}) à 500°C (soit une émittance de 20 kW.m^{-2}) entre I et E minutes. La température de 155°C correspond au critère d'élévation de température de 140°C avec une température initiale de 15°C , conformément à la définition du critère d'isolation thermique lors d'un essai normalisé. La température de 500°C fait elle référence à la température moyenne maximale observée lors de l'essai à grande échelle Flumilog via les caméras thermiques. Pour calculer le flux induit par cet échauffement, l'émissivité des parois est prise égale à 0.7, telle que définie dans les parties feu des Eurocodes.

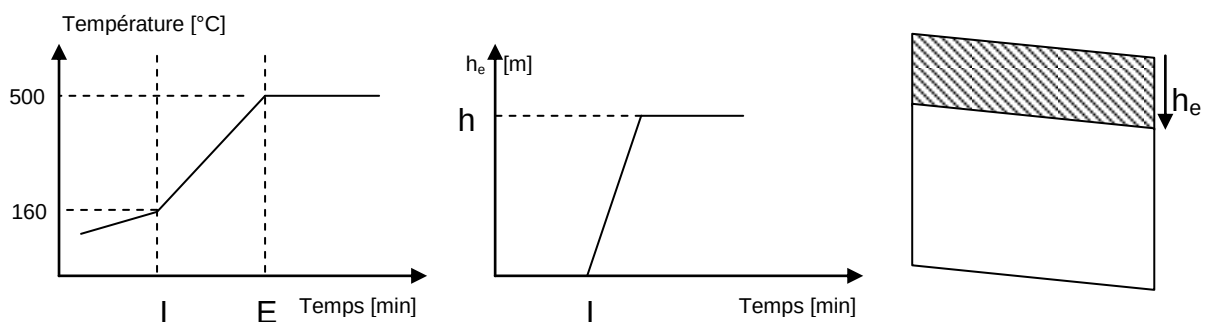


Figure 40 : Schéma descriptif de l'échauffement d'une façade

Les deux situations suivantes sont possibles :

- Soit $R > \min [E, Y]$:

Le flux induit est ajouté au rayonnement des flammes tant que $\min [E, Y]$ n'est pas atteint, ensuite on considère que la paroi n'est plus à même de faire écran au rayonnement du feu (soit parce qu'elle n'est plus étanche, soit parce qu'elle s'est décrochée de la structure support).

- Soit $R \leq \min [E, Y]$:

Le flux induit est ajouté au rayonnement tant que la paroi n'a pas atteint la hauteur résiduelle (hauteur de la paroi lorsque le support de la paroi s'est affaissé, cf. paragraphe suivant). Ensuite, on considère que la paroi qui s'est repliée sur elle même a aménagé un espace où la combustion est fortement réduite, dans ce cas elle est alors opaque au rayonnement des flammes et sans flux induit.

5.4.1.3 HAUTEUR DE LA FAÇADE

Lorsqu'un incendie se développe dans une cellule sollicitant thermiquement une façade, la hauteur de cette façade ne commencera à décroître que lorsque la stabilité de l'ossature support n'est plus assurée, c'est-à-dire après la durée R .

Il est rappelé que la structure est considérée comme sollicitée soit à partir du moment où le flashover a lieu dans la cellule, soit à partir du moment où l'effondrement de la toiture atteint les bords de l'entrepôt.

La vitesse d'affaissement de la paroi est fonction de la ductilité de la structure support et du système statique de la structure. Pour un poteau acier (sans liaison forte avec des poutres ou traverses), elle est estimée à $0,05 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$ sauf dans le cas d'une paroi comportant un isolant combustible où elle est alors de $0,1 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$. Pour un poteau étant partie intégrante d'un portique acier, elle est estimée à $0,1 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$ sauf dans le cas d'une paroi comportant un isolant combustible où elle est alors de $0,2 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$. Dans le cas d'un portique, le poteau sera en effet entraîné par l'effondrement des poutres ou traverses. Pour une structure béton, du type poutre, portique ou mur auto-stable, en l'absence de données, il est estimé que l'effondrement est quasi instantané.

L'affaissement de la façade se poursuit jusqu'à ce que la hauteur résiduelle $h_{\text{rés}}$ soit atteinte. Celle-ci dépend également de la ductilité et du mode de ruine de la structure support : $0,3 h$ pour un poteau acier, $0,4 h$ pour un portique acier, $0,1 h$ pour un poteau béton ou un portique béton.

Pour les éléments suffisamment ductiles, tels que les poteaux métalliques support de parois métalliques ou d'éléments préfabriqués en béton normal ou béton cellulaire, il y a également lieu de tenir compte qu'une fois affaissée, la paroi va partiellement recouvrir les matériaux combustibles adjacents à la façade et ainsi provoquer un recul de la flamme. Ce recul est estimé à $0,15 h$ pour une façade stabilisée par un poteau acier sans liaison notable avec des poutres ou traverses et à $0,4 h$ pour une façade stabilisée par des portiques acier, où h est la hauteur initiale de la paroi en mètre.

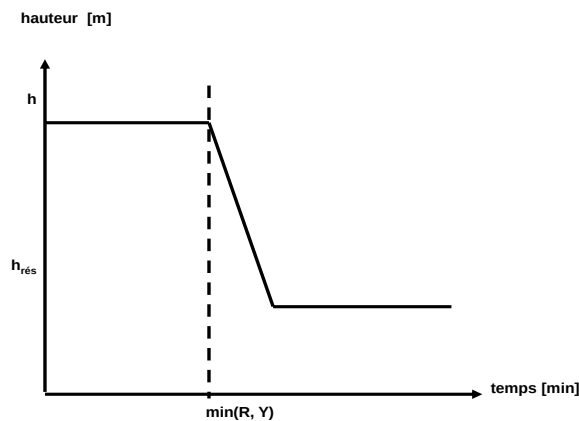


Figure 41 : Hauteur de la paroi au cours du temps

Si un déport latéral ou une zone de préparation est présente, c'est le maximum entre cette valeur et le recul induit par l'effondrement de la paroi qui est utilisé pour positionner la flamme.

D'autre part, si l'extension du déport latéral ou de la zone de préparation est supérieure à la hauteur initiale de la paroi alors cette dernière reste en place pendant toute la durée du feu quelques soient les valeurs de R, E et Y mais le flux induit par la paroi est quand même ajouté.

Le tableau suivant récapitule les hypothèses retenues pour les différents matériaux constituant les parois.

Tableau de synthèse des parois

Durées d'efficacité :

- Paroi : E min et I min
- Fixation : Y min
- Structure support : R min
- t^* : instant où la paroi atteint la hauteur résiduelle

Structure support	Paroi						
	Rayonnement de la paroi		Effacement de la paroi si $R > \text{MIN} [E, Y]$	Déformation de la paroi à partir de R			
	Paroi stable	Paroi effondrée avec hauteur résiduelle		Hauteur résiduelle	Vitesse affaissement (m/min)	Largeur de recouvrement (m)	
						Paroi ductile (acier)	Paroi peu ductile (béton ou maçonnerie)
Poteau acier	Entre I et MIN [E, Y] si $R > \text{min} [E, Y]$	Pas de rayonnement	A partir de MIN [E, Y]	0.3 h	$0,05 h^1$	0.15 h	0
Portique acier				0.4 h	$0,1 h^1$	0.4h	0
Poteau béton/bois				0.1 h	0.9 h	0	0
Portique béton/bois	0.1 h			0.9 h	0	0	
Auto-stable béton	Entre I et t^* si $R < \text{min} [E, Y]$			A partir de E	0.1 h	0.9 h	-

¹ : valeur à multiplier par deux pour une paroi comportant un isolant combustible

Tableau descriptif du comportement des parois

Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des données disponibles sur un certain nombre de sinistres. Pour chaque sinistre, une fiche descriptive avec photos est fournie en annexe. Lorsqu'aucune information n'est disponible, la case est laissée vide.

Référence	Structure + paroi	Paroi					Annexe
		Stabilité du support	Support stable	support effondré			
			% effacé des parois	Hauteur résiduelle h _{min} h _{max}		Largeur de recouvrement	
F1	béton + bardage double peau	NON	-	30%	50%	0.3 h	A
F2	béton	OUI	0% - 100%	-	-	-	B
F3	métallique + briques	OUI	0% - 20%	-	-	-	C
F4	métallique + parpaings	OUI	0% - 10%	-	-	-	C
F5	métallique + bardage simple peau	NON	-	30%	90%	0.4 h	D
F6	métallique + bardage simple peau	NON	-	20%	70%	-	D
F7	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	75%	0.3 h	D
Face Au Risque - 372	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	50%	-	D
Face Au Risque - 387	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	50%	0.25 h	D
Face Au Risque - 359	métallique + bardage double peau	NON	-	40%	70%	0.2 h	E

Référence	Structure + paroi	Paroi					Annexe
		Stabilité du support	Support stable	support effondré			
			% effacé des parois	Hauteur résiduelle h _{min} h _{max}		Largeur de recouvrement	
F8	métallique + bardage double peau	NON	-	50%	50%	0.3 h	E
F9	métallique + bardage double peau	NON	-	25%	80%	0.25 h	D

5.4.2 CAS DES ECRANS THERMIQUES DEPORTES : MERLONS ET ZONE DE PREPARATION DONT LA LARGEUR EST SUPERIEURE A LA HAUTEUR DE LA PAROI

Un écran thermique a la propriété d'arrêter le rayonnement et par conséquent de diminuer le flux reçu par une cible située dans sa zone d'ombre. La zone d'ombre correspond à la projection sur la surface émettrice de la surface du merlon (Figure 42). A cette zone d'ombre, on associe un facteur de forme que l'on retranche au facteur de forme calculé pour la surface émettrice seule.

Soit f_e le facteur de forme entre la surface émettrice et la cible et f_o le facteur de forme de la surface projetée S_o du merlon sur S_e . Le facteur de forme global est alors $f = f_e - f_o$.

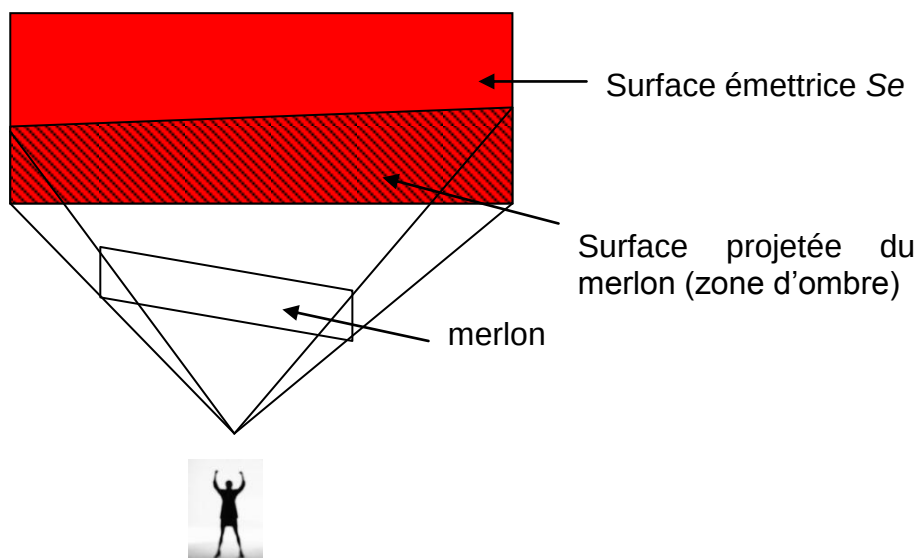


Figure 42 : schéma descriptif de l'influence d'un écran thermique

Cas particuliers des murs accolés à une zone de préparation :

Dans le cas où la zone de préparation a une largeur supérieure à la hauteur du mur où elle y est accolée, alors on considère que celui-ci reste en place pendant toute la durée de l'incendie. En effet, ce mur est suffisamment éloigné pour que les sollicitations thermiques soient atténuées et ne compromettent pas sa stabilité. De ce fait, une cible située au-delà de ce mur le perçoit ainsi comme un écran thermique.

5.5 CAS DE LA PROPAGATION A 3 CELLULES

Selon la nature des produits entreposés dans les cellules, 2 types de situation peuvent se produire :

1^{er} cas : la durée de l'incendie dans la cellule initiale est inférieure à la résistance des parois séparatrices. Dans ce cas, il n'y a pas à considérer de propagation aux cellules voisines, ceci est illustré sur la Figure 43.

1^{er} cas : la durée de l'incendie est inférieure à la résistance des murs séparatifs

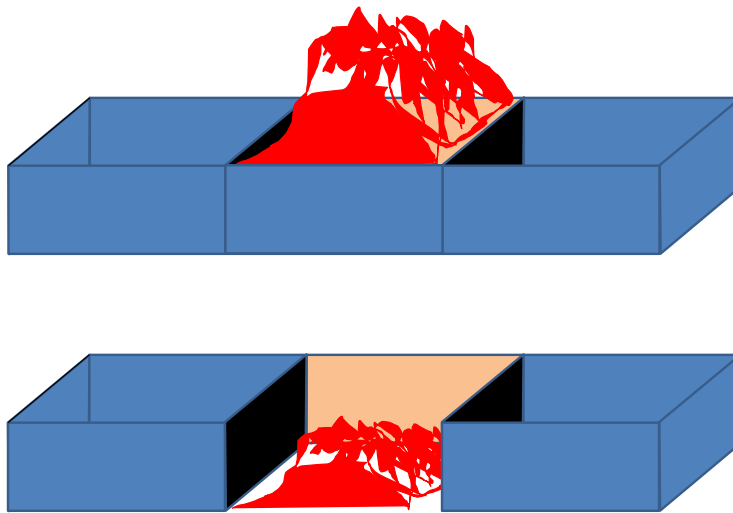


Figure 43 : schéma de propagation du feu dans le cas où l'incendie est plus court que la durée de résistance des parois – pas de propagation

2^{ème} cas : la durée de l'incendie est supérieure à la capacité de résistance des parois séparatrices. Dans ce cas, la propagation est à considérer dès que cette durée est atteinte. Ceci est illustré sur la Figure 44 et la Figure 45.

2^{ème} cas : la durée de l'incendie est supérieure à la résistance des murs séparatifs

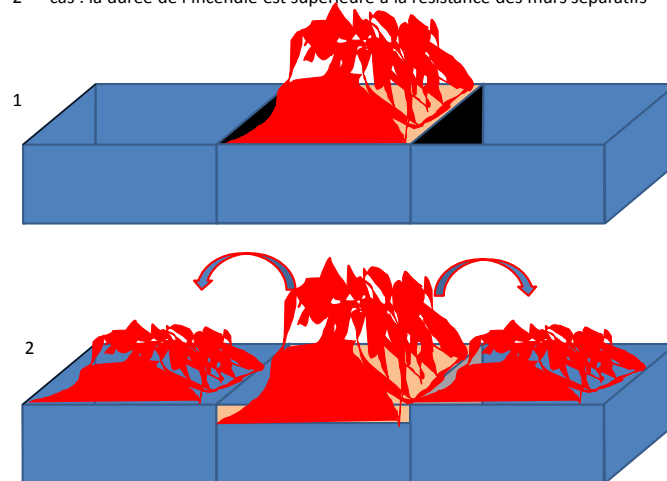


Figure 44 : Le feu se propage aux deux cellules voisines dès lors que les murs séparatifs ne sont plus en mesure de jouer leur rôle (temps au-delà de leur degré REI)

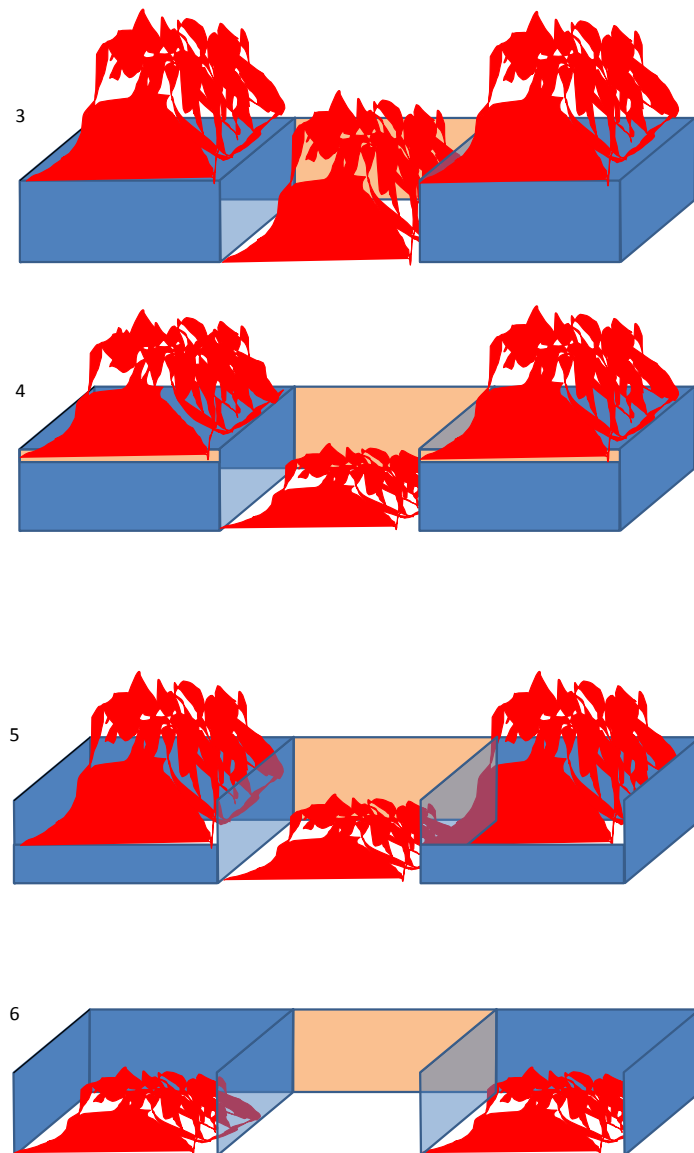


Figure 45 : schéma de propagation d'un incendie d'une cellule à ses voisines

Le principe du calcul consiste alors à calculer les flux pour chaque cellule dans un environnement élargi à l'espace présent en vis-à-vis de chaque façade.

Compte tenu de la présence des parois séparatrices qui vont empêcher la propagation pendant la durée REI, il faut sommer les flux après les avoir déphasés sur cet espace. Ceci est représenté schématiquement sur la Figure 46.

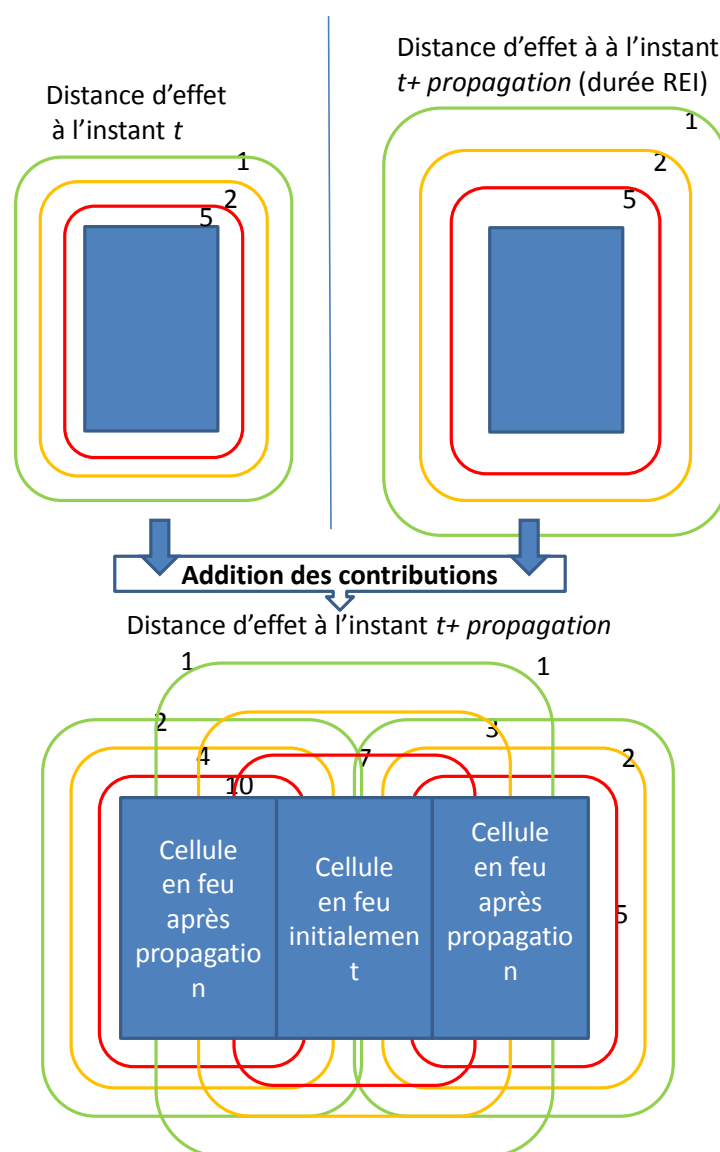


Figure 46 : Calcul pratique des conséquences d'une propagation d'un incendie – étape 1

5.6 DETERMINATION DES FLUX MAXIMUMS

A partir des éléments décrits dans les paragraphes précédents, il est possible de calculer à chaque instant le flux reçu en tout point de l'environnement et de les comparer aux seuils réglementaires. Un exemple de calcul réalisé avec la méthode est présenté ci-après.

Le calcul des flux se fait en deux temps, on considère d'abord la situation sans vent puis la situation avec vent.

Procédure de calcul des flux sans vent :

Comme indiqué au paragraphe 5.3.3 de la partie commune, la cible est un cube élémentaire. Il faut donc considérer les flux élémentaires reçus sur chacune des faces latérales ainsi que sur la face supérieure. La première étape passe alors par le calcul de ces 5 flux élémentaires en tout point du domaine et ce à chaque instant. Dans le cas d'un entrepôt multi-cellules, cette étape est effectuée pour chaque cellule et les flux élémentaires sont additionnés en tenant compte des éventuels décalages temporels induits par la propagation entre cellule. L'application de la formule du 5.4 donne alors le flux en tout point du domaine et à chaque instant. Il ne reste plus qu'à prendre le maximum observé sur toute la durée de l'incendie toujours en chaque point du domaine.

Procédure de calcul des flux avec vent :

La même procédure est appliquée mais cette fois-ci avec une flamme inclinée pour toutes les cellules. Le résultat est donc un champ de flux maximum pour la situation avec vent.

La dernière partie du calcul consiste à prendre le maximum de ces deux valeurs en tout point du domaine. Un exemple de résultats est fourni sur la Figure 47.

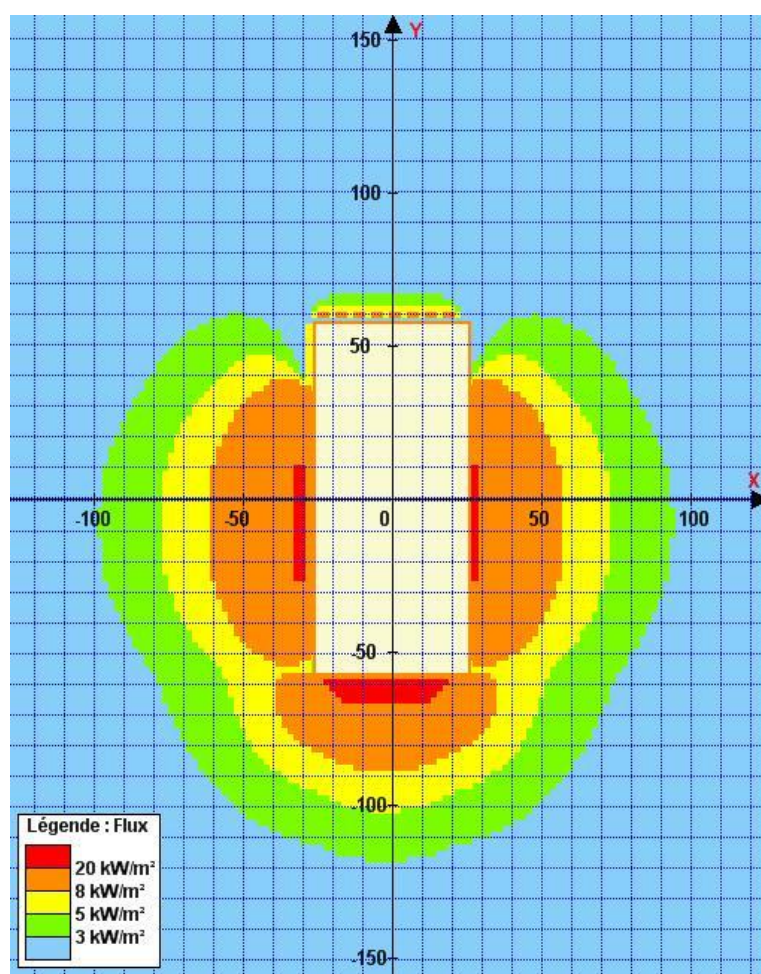


Figure 47 : Exemple de cartographie de flux obtenue avec l'outil FLUMILOG

6. COMPARAISONS AVEC L'EXPERIMENTAL

La méthode décrite précédemment a été élaborée en assemblant plusieurs modèles spécifiques à certaines phases ou phénomènes observables lors d'un incendie. Il convient de vérifier que cet assemblage fournit bien des résultats comparables à ceux obtenus lors des essais réalisés dans le cadre de ce projet.

Ce chapitre est consacré à la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de calculs. Le chapitre suivant sera quant à lui consacré à une étude de sensibilité des principaux paramètres (combustible, surface de la cellule et caractéristiques des parois).

Dans le cadre du projet FLUMILOG, 9 essais à moyenne échelle ont été réalisés, la cellule d'essais avait une surface de 8x12 m² pour une hauteur de 3 m. Le principal objectif de cette campagne était d'étudier l'influence du combustible sur les caractéristiques des flammes. De fait, des mesures de flux ont été effectuées au cours de ces essais et il est donc possible de comparer les résultats fournis par la méthode avec ceux mesurés lors de ces essais.

8 essais sur 9 ont fait l'objet de comparaison : l'essai n°8 n'a pas fait l'objet de comparaison car la configuration testée n'a pas conduit à la formation de flammes au dessus de la cellule du fait du surdimensionnement de la structure pour les essais à moyenne échelle, la toiture et les parois sont restées en place.

Pour la présentation des résultats, aucune différence n'a été faite entre les faces sous le vent et les autres faces même si la prise en compte du vent dans la méthode conduit à considérer que les flammes sont poussées par le vent sur toutes les faces, ce qui n'est pas physique bien entendu. Ce choix a été fait car le sens du vent ne peut pas être connu à l'avance et donc le calcul est fait pour chaque face avec l'hypothèse d'absence de vent et celle d'un vent qui couche les flammes. Par conséquent, pour établir les comparaisons entre les essais et les calculs, pour chaque essai, 2 calculs ont été réalisés : un avec le vent mesuré lors de l'essai et un avec un vent nul. La comparaison a été faite systématiquement entre la valeur expérimentale et la valeur maximale calculée.

Les courbes de la Figure 48 présentent les distances aux effets irréversibles mesurées en fonction de celles calculées. Elle fait apparaître que, globalement, les distances calculées sont toujours supérieures à celles mesurées, même en intégrant une incertitude de 10% sur les mesures effectuées.

Remarque : le résultat pour l'essai à grande échelle a également été intégré sur ces courbes.

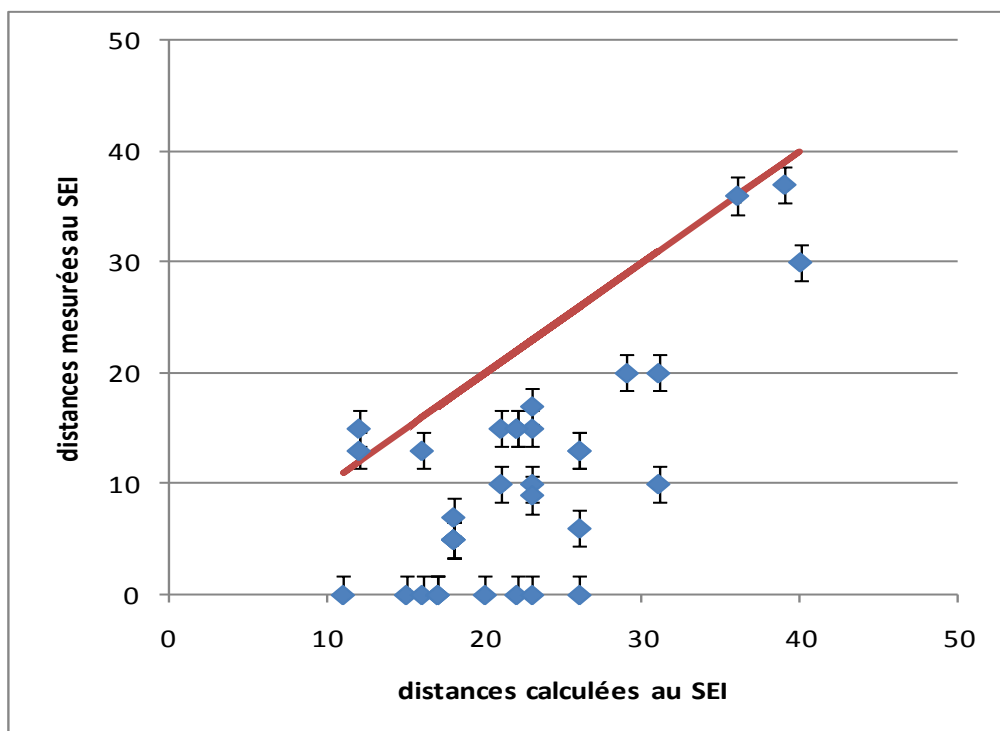


Figure 48 : Courbes dans le cas des effets irréversibles

Les courbes de la Figure 49 sont relatives aux effets létaux.

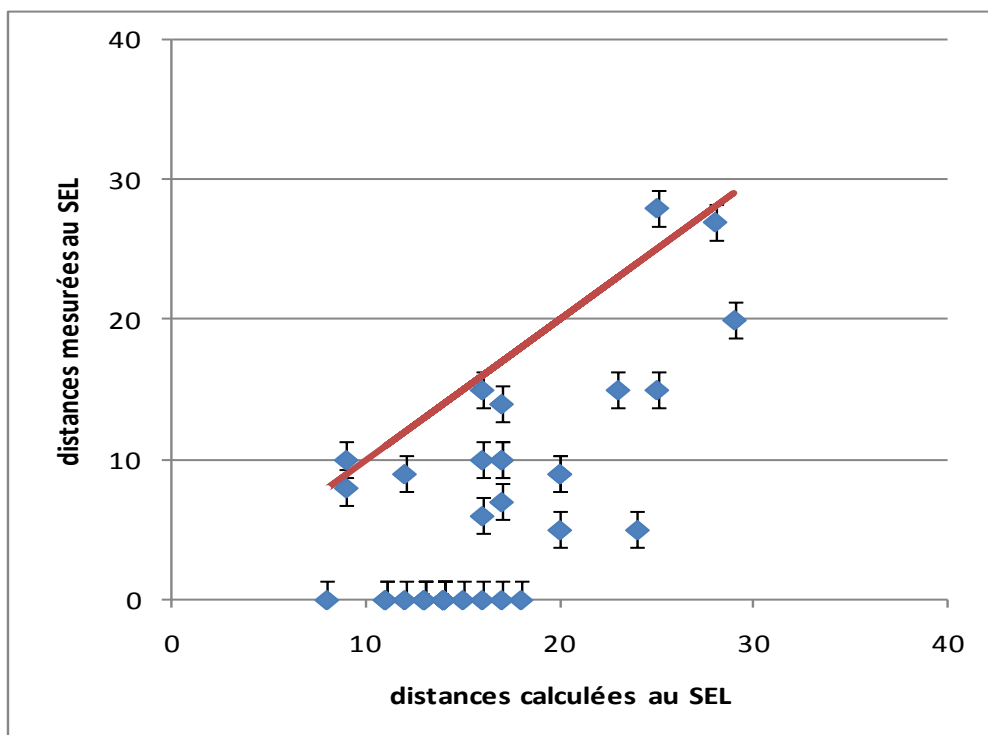


Figure 49 : Courbes dans le cas des effets létaux

Les courbes font apparaître que globalement les distances calculées sont du même ordre de grandeur que les distances observées et qu'elles sont généralement plus grandes que celles mesurées.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La méthode développée permet de calculer les distances d'effet associées à l'incendie d'une cellule d'entrepôt à chaque instant. Le calcul proposé prend en compte les principales caractéristiques de ce type de stockage. En particulier, il est possible de prendre en compte des produits assez différents dans leur composition, le mode de stockage et surtout le nombre de niveaux de stockage et enfin les caractéristiques de la cellule (structure, parois et toiture) dont les dimensions peuvent évoluer au cours du temps.

La construction de cette méthode s'est basée sur les connaissances disponibles auprès de chacun des organismes partenaires de ce projet. Elle s'est bien évidemment appuyée également sur les résultats des essais à moyenne et grande échelle. En particulier, l'effet du vent a été intégré dans le calcul des distances d'effet.

La comparaison entre les résultats des essais et ceux fournis par le calcul montre que la méthode donne des résultats avec une marge de 10% environ par excès. L'étude de sensibilité réalisée a montré que l'influence des différents paramètres (ratio de combustible, d'incombustible) était conforme aux attentes et qu'il n'existait pas de discontinuité dans l'évolution des résultats. Cette étude a été réalisée sur une plage de combustible englobant largement le domaine d'utilisation visé dans la mesure où les stockages réels présentent une charge calorifique bien inférieure à certains cas testés.

Enfin, cette méthode permet de traiter le cas de la propagation aux cellules voisines en intégrant l'évolution attendue des parois et de la puissance de l'incendie au cours du temps.

Concernant les perspectives possibles, on pourrait envisager d'étendre l'utilisation de la méthode à des stockages très hétérogènes (en type de produit et type de stockage) ; cette évolution nécessiterait notamment une définition très fine du stockage.

La méthode actuelle prend en compte les matériaux les plus utilisés pour la construction au travers de leurs caractéristiques (R, E, I), en revanche, seul l'acier a fait l'objet d'une étude plus poussée sur son comportement au-delà des durées définies lors des essais normalisés. Des études de ce type pourraient être réalisées pour les autres matériaux.

8. GLOSSAIRE

C_{incomb_i} : Capacité calorifique des incombustibles (kJ/kg K),

$Coef_{absorpt}$: Part d'énergie qui est réellement absorbée par les incombustibles.

$Coef_{toi}$: Taux de recouvrement du combustible par les éléments effondrés de toiture (-).

$Coef_{ventil}$: coefficient réducteur dépendant de la ventilation (-).

ΔH_{comb_i} : Chaleur de combustion de chaque combustible (kJ/kg).

$\Delta H_{comb_palette}$: Chaleur de combustion moyenne de la palette (kJ/kg).

$\Delta H_{\varphi incomb}$: Chaleur de changement de phase pour l'incombustible i sur la plage de température 20°C – 1000°C

ΔT : Augmentation de température due à l'incendie (K).

$fraction_{résid}$: fraction résiduelle de la combustion (-).

$P(t)$: puissance libérée par l'incendie à chaque instant

P_{ini} : puissance dégagée lors des tous premiers instants de l'incendie (kW).

$P_{palette}$: Puissance théorique de la palette (kW).

$P_{palette\ réelle}$: puissance réelle de la palette corrigée par le ratio_pyro (kW).

$P_{rack_surfacique}$: puissance libérée par unité de surface enveloppante des racks (kW)

$Puissance_{absor}$: Puissance absorbée par les produits incombustibles présents sur la palette (kW).

$Ratio_{combolu}$: fraction volumique de combustibles sur la palette (-).

$Ratio_{incombolu}$: fraction volumique de produits incombustibles sur la palette (-).

$Ratio_{pyro}$: Rapport entre la puissance théorique et la puissance expérimentale de la palette (-).

$S_{chutetoit}(t)$: Surface couverte par des éléments de toit au cours du temps (m²),

$S_{feu_dev}(t)$: surface des racks en feu à l'instant t donné (m²).

$S_{feu_plafond}(t)$: Surface du plafond de la cellule atteinte par les flammes (m²),

$S_{sol_palette}$: Surface au sol de la palette (m²).

$t_{comb_palette}$: Durée de combustion de la palette (s).

t_{retard_toit} : Durée pendant laquelle le matériau de toiture soumis aux flammes est censé résister et ne pas s'effondrer (s),

V_{comb_i} : Vitesse de combustion de chaque combustible (kg/m² s).

$V_{comb_palette}$: Vitesse de combustion moyenne de la palette (kg/m² s)

$Volume_{comb}$: Volume de chaque combustible contenu sur la palette (m³),

$Volume_{incomb}$: Volume de chaque incombustible (m³),

$Volume_{palette}$: Volume de la palette (m³).

V_{prop_horiz} : Vitesse de propagation horizontale dans le stockage.

V_{prop_vert} : Vitesse de propagation verticale dans le stockage.

9. **BIBLIOGRAPHIE**

CARRAU André, DRA-03 : Spécificités des entrepôts au regard de l'incendie, INERIS-DRA-2000-25291-ACa/Aca, 2000.

CARRAU André, BCRD : Caractérisation des feux industriels, rapport d'avancement, 2003.

CARRAU André, BCRD : Caractérisation des feux industriels, rapport final, INERIS-DRA Aca-LFo-Spa-2004-28659, 2004.

EVANS, CEILING JET FLOWS, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, p2.40-2.49, 1995.

HESKESTAD, Smoke movement and venting, Fire Safety Journal, 11, 77-83, 1986.

d'HOOP Jean-Michel, Sécurité incendie, Techniques de l'ingénieur, 2002.

INGASON H., "Rack storage fires", Safetynet Seminar at www.safetynet.de/activities/35.htm, 2001.

INGASON H., MODELING OF A TWO DIMENSIONAL RACK STORAGE, Fire Safety Science, Proceedings of the 4th International Symposium, pp. 1209-1220, 1994.

INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID, La sécurité incendie dans les entrepôts frigorifiques, 1987.

NAUDIN Cécile-Anne, Nomenclature, classification et formules chimiques des polymères, Techniques de l'ingénieur, A3035-1, 1995.

SIEGEL, R., and HOWELL, J.R., Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd Ed., Hemisphere, Washington, 1992.

TEWARSON, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA, 1995.

WELKER, SLIEPCEVICH, *Fire Technology*, 2, 1966.

10. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb pages
Annexes 1 à 7	Exemples d'accidents ayant impliqué des produits susceptibles d'être stockés en entrepôts	42
Annexe 8	Données nécessaires à l'outil FLUMILOG	8
Annexes A à E	Eléments du REX sur les structures	25

ANNEXE 1 :
Exemples d'accidents ayant impliqué des liquides inflammables

N° 18827 - 02/08/2000 - 79 - NIORT

YY.0 - Activité indéterminée

Un incendie se déclare dans un entrepôt de 200 m². Les flammes sont alimentées par des produits très inflammables. La présence d'une porte coupe-feu se révèle efficace, empêchant la propagation du feu à tout le magasin et à un garage mitoyen. L'incident serait d'origine criminelle (vitre brisée).

N° 20452 - 18/03/2001 - 68 - PFASTATT

YY.0 - Activité indéterminée

Un incendie se déclare dans un entrepôt désaffecté contenant des matières inflammables : pneus, huiles, solvants, peintures... Les flammes ont ensuite pris de l'ampleur sous l'effet du vent. Le feu détruit 1 750 m² au sol et 600 m² au premier étage. Sous l'effet de la chaleur, la charpente métallique s'effondre entraînant les murs de l'entrepôt. Les pompiers interviennent et protègent l'annexe du bâtiment contenant de l'oxygène par un rideau d'eau. Les pompiers protègent aussi une maison de retraite située à proximité de l'entrepôt. L'incendie semble être d'origine criminelle.

N° 21827 - 30/11/2001 - 93 - AUBERVILLIERS

63.1 - Manutention et entreposage

En début d'après-midi (15h30), un incendie détruit une partie d'un entrepôt jouxtant un stockage d'alcools. Ce dernier, situé en zone urbaine, abrite 6 500 m³ d'hydrocarbures particulièrement inflammables et susceptibles d'exploser. Le personnel est évacué aussitôt. L'incendie serait dû à un feu de voiture, en stationnement dans la rue devant le mur de l'établissement, au droit de la tuyauterie d'arrivée de gaz. Le feu se serait ensuite propagé au poste de détente de la tuyauterie situé sur le mur. Le jet enflammé résultant communique l'incendie aux locaux techniques situés de l'autre côté du mur. Environ 150 pompiers et 25 véhicules en provenance de plusieurs casernes se rendent sur place. Les bacs de stockage et murs de séparation sont arrosés à titre préventif. Les services techniques du gaz sont appelés pour couper l'alimentation en gaz de la tuyauterie. Ils y parviennent après 45 min. Le feu est ensuite maîtrisé. L'intervention des pompiers a été gênée par la présence dans le local technique d'une bouteille d'acétylène, qui n'a finalement pas été affectée par l'incendie. Par ailleurs, le local technique se situe dans le même bâtiment que l'entreposage des produits en petit conditionnement (white-spirit, alcool). Ceci a constitué une menace d'aggravation pendant la durée du sinistre. En revanche, les cuves aériennes d'alcools sont distantes d'une cinquantaine de mètres du lieu de l'incendie. Au final, le poste de détente et l'atelier de réparation mécanique sont détruits. Il n'y a pas de blessé.

N° 24384 - 04/04/2003 - 72 - LE MANS

63.1 - Manutention et entreposage

Un incendie se déclare dans un atelier de 100 m² abritant des produits inflammables dans un entrepôt frigorifique. Le feu n'atteint pas la réserve d'ammoniac de l'installation de réfrigération. Les locaux sont ventilés.

ANNEXE 2 :
Exemples d'accidents ayant impliqué des aérosols

Accidents extraits de la base de données ARIA du BARPI

Saint-Egrève (38 -08/03/84)

Dans une usine conditionnant des produits chimiques, un incendie se déclare dans le bâtiment réservé aux stockages des produits finis et des emballages. Environ 20 000 générateurs aérosols de produits inflammables, également à proximité, explosent sous l'effet de la chaleur. Les pompiers maîtrisent l'incendie et parviennent à protéger les autres bâtiments. Les locaux directement concernés par le sinistre sont inutilisables et encombrés par les générateurs éventrés. Les jours suivants, les produits sont évacués par des entreprises spécialisées dans le traitement des déchets. Le ruisseau, situé en contrebas de l'usine, est pollué par les eaux d'extinction chargées en mousse et en produits chimiques.

Saint Grève (38 - 03/10/89)

Un incendie se déclare dans un dépôt en sous-sol contenant 5 000 bouteilles de 750 cm³ d'aérosols (désodorisant, insecticides). 50 pompiers interviennent. Les rejets dans le sol sont analysés et les terres souillées enlevées.

Lunéville (54 - 11/10/90)

Une explosion suivie d'un incendie se produisent dans un hangar destiné aux stockages d'aérosols appartenant à une société spécialisée dans la récupération et transformation des métaux. Le hangar est entièrement détruit. Un employé est grièvement brûlé.

Paris 18^{ème} (75 - 29/07/91)

Un incendie, des explosions et des déflagrations se produisent dans un entrepôt où sont stockés des matériels divers, des cartouches d'air comprimé et des générateurs de laque pour cheveux. Un épais nuage de fumée noire se dégage. 1 500 m² d'entrepôts sont détruits. 60 personnes sont évacuées. 16 sapeurs-pompiers légèrement intoxiqués sont examinés sur place.

Nanterre (92 - 20/08/93)

Un incendie se déclare dans les entrepôts d'une entreprise de transport, stockant notamment des aérosols. Le feu se propage à dix sociétés voisines représentant une superficie totale de 2 500 m². 150 pompiers sont mobilisés. Les locaux, le matériel de bureau, les archives et autres documents sont totalement détruits. Deux pompiers sont légèrement blessés.

Aiguillon (47 - 17/11/93)

Un incendie se produit dans l'entrepôt de 700 m² d'une entreprise spécialisée dans la commercialisation de produits de droguerie. La combustion des matières plastiques, générateurs aérosols et papiers provoque un épais dégagement de fumée. 40 pompiers et une douzaine d'engins interviennent. Un périmètre de sécurité est établi et l'incendie est circonscrit en 3 heures environ. L'entrepôt et la totalité des stocks sont détruits. La circulation est fortement perturbée par le dégagement de fumée.

Saint-Ouen (93 - 25/02/96)

Un violent incendie d'origine inconnue se déclare dans un entrepôt d'outillage. De nombreuses bouteilles d'acétylène, d'oxygène et de générateurs aérosols explosent. 2 000 m² sont entièrement détruits. 140 pompiers de 12 casernes interviennent et évitent que le feu ne se propage à d'autres entrepôts contigus. Deux pompiers sont légèrement blessés au cours de l'intervention. Le coût de l'accident s'élève à 32 M.F.

Egypte - inconnu (04/05/96)

L'explosion puis l'incendie d'un dépôt de 6 millions de récipients aérosols insecticide blessent 6 employés et 17 pompiers.

08/11/1999

FRANCE - 77 - CROISSY-BEAUBOURG

63.1E - Entreposage non frigorifique

Un incendie détruit un entrepôt de 10 000 m² de cartons d'emballage, de bombes aérosols et de boîtes de conserve. Au fur et à mesure de l'élévation de température, les conserves et les bombes explosent. L'intervention mobilise 120 pompiers. Les bureaux seront épargnés et les pompiers parviennent à protéger les entreprises voisines.

11/04/2001

FRANCE - 94 - RUNGIS

24.3Z - Fabrication de peintures et vernis

Un incendie se déclare dans un entrepôt d'une société de fabrication d'aérosols de peinture de 2 000 m². Une épaisse fumée noire gêne l'intervention des pompiers. Quatre foyers sont repérés et une porte d'entrée de l'entrepôt doit être forcée en raison de la sécurisation du site. Le service technique de la préfecture de police effectue des prélèvements.

23/08/2003

FRANCE - 35 - SAINT-JACQUES-DE-LA-LANDE

90.0E - Traitements des autres déchets solides

Un important incendie, suivi d'une explosion, se déclare sur le site d'une entreprise de traitement de déchets industriels. Le feu, qui concerne d'abord la partie extérieure abritant des aérosols, se généralise ensuite à tout l'entrepôt. Une semaine plus tôt, les produits les plus dangereux ont été évacués. Finalement, 200 m² de bâtiments sont détruits, les bureaux ont pu être sauvés, les eaux d'extinction sont récupérées dans les bacs prévus à cet effet, et tout risque de pollution atmosphérique est écarté.

22/09/2003

FRANCE - 02 - CHATEAU-THIERRY

24.5A - Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien

Un important incendie accompagné d'explosions détruit les ateliers et les entrepôts d'une usine de produits d'entretien. Le feu se serait déclaré durant la pause déjeuner du personnel, du côté du laboratoire, et se serait rapidement propagé au reste de l'usine. Cette dernière, spécialisée dans le conditionnement de produits d'entretien, dispose de près de 5 m³ de produits inflammables : white-spirit, acétate d'éthyle et de butyle, huiles de silicone et diverses, essence de térébenthine, alcool éthoxylé, cire en pastilles. La propagation du sinistre à ces stocks de solvants entraîne la formation de flammes hautes de 30 m et de nombreuses explosions. L'unité de production de bombes aérosols, également impactée, est le siège d'explosions en rafales. Une cinquantaine de pompiers met en sécurité le stockage de 40 t de GIL situé en périphérie. Compte tenu de la présence de lourdes volutes de fumée noire poussées vers l'extérieur de l'établissement, un lycée technique est évacué et 2 écoles sont confinées préventivement. Le sinistre est maîtrisé après 2h15 d'intervention ; les fumées toxiques ont incommodé 11 pompiers, mais aucune victime n'est à déplorer. Sur les 2 500 m² de l'installation, 1 500 m² sont détruits, une partie importante des 200 m³ d'eau d'extinction s'est déversée dans la MARNE via le réseau d'eaux pluviales : l'entrée de la station d'épuration avait préalablement été fermée pour éviter la destruction du dispositif d'épuration biologique. La majeure partie des 5 à 6 m³ de substances inflammables présentes a très probablement brûlé dans le sinistre. L'ancien logement de l'exploitant, situé à proximité et revendu à un tiers, est inclus dans le périmètre de sécurité : les occupants ne peuvent regagner leur domicile. L'exploitant assure l'évacuation vers un autre site du réservoir de GIL et des autres produits dangereux ou polluants, et sur recommandation de l'inspection des installations classées, réalise une étude simplifiée des risques.

Les accidents ci-après ne proviennent pas de base de données ARIA

Un accident a concerné le stockage d'une usine de conditionnement de générateurs d'aérosols, qui a été entièrement détruit début 1998 à Ringersburg en Allemagne. Le feu aurait débuté lors du chargement d'une palette de générateurs d'aérosols dans un camion et se serait ensuite propagé très rapidement aux locaux de stockages des générateurs.

Un autre accident s'est produit le 18 avril 1995 au Meux (Oise), dans une installation de suremballage de générateurs d'aérosols, qui a également été entièrement détruite. L'incendie s'est développé très rapidement : un bâtiment de 6 000 m² a été totalement détruit en 20 minutes environ.

ANNEXE 3 :
***Exemples d'accidents ayant impliqué des comburants,
des acides ou des bases***

N° 1547

24/06/1990

FRANCE - 69 - BRIGNAIS

24.5A - Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien

Un incendie se déclare dans des bâtiments de conditionnement et des entrepôts contenant des produits organiques (blé, amidon), des produits toxiques (acide chlorhydrique, soude), des tensioactifs et des anti-coagulants. Plus de 30 pompiers interviennent. Les fumées chargées de résidus sulfureux provoquent une gêne respiratoire chez certains sauveteurs. Le feu détruit 400 m² de bâtiments. Les dommages sont évalués à 3 MF.

N° 2723

08/07/1991

FRANCE - 29 - PLOUIGNEAU

63.1E - Entreposage non frigorifique

Une explosion a lieu dans l'entrepôt d'un ancien grossiste en fruits et légumes qui a été loué à une grande surface. En redressement judiciaire depuis avril 1988, le grossiste utilisait le bâtiment pour stocker des engrais, aérosols, chlorophénols et produits inflammables ; 6 palettes de chlorate et 1 lot de désherbants avaient ainsi été mis en vente en juin 1989 dans le cadre de la liquidation judiciaire. L'explosion tue le gérant de la grande surface et détruit 1 000 m² de bâtiment. La presse mentionne le déplacement d'un camion sur 15 m et des projections de morceaux de métal à plusieurs dizaines de mètres, certains d'entre eux auraient traversé le toit d'un atelier situé à 60 m du lieu de l'explosion ; un ouvrier projeté à 20 m du chariot-élévateur où il était assis ne sera pas blessé. Selon les premiers éléments de l'enquête effectuée par la gendarmerie et les services de secours, l'accident s'est produit alors que le gérant jetait dans une benne à ordures contenant diverses substances alimentaires, des produits phytosanitaires aux emballages défectueux (sacs de chlorate de soude, autres désherbants solide ou liquide, insecticides, fongicides...) et qui étaient entreposés dans le bâtiment depuis 2 ans. Une réaction chimique imprévue serait à l'origine de l'explosion. L'Inspection des installations classées constate que la cessation d'activité n'avait pas été déclarée et que le site accidenté n'avait pas fait l'objet d'une complète mise en sécurité. Une entreprise spécialisée est chargée d'enlever les substances dangereuses.

N° 9677

06/08/1996

FRANCE - 54 - HEILLECOURT

51.5L - Commerce de gros de produits chimiques

Une explosion a lieu dans un dépôt de produits agricoles. Un incendie et d'autres explosions détruisent 2 des 3 entrepôts du site (5 000 m²). Des missiles sont projetés à 100 m de haut. La population de 5 communes sous le vent se confine par sécurité. Le feu est éteint en 3 h. Le directeur et 5 pompiers sont légèrement intoxiqués, 4 autres sont blessés. La MEURTHE et la MOSELLE sont polluées (hydrocarbures, organo-phosphorés, pesticides) ; baignade, pêche et consommation de légumes sont interdites. Des captages sont surveillés et 1 t de poissons morts est récupérée. 1 000 m³ d'eau, 1 000 m³ de résidus solides et 2 000 m³ de terres seront évacués (coût du sinistre 70 à 80 MF). Le feu a pris sur un sac de 25 kg du stock de 15 t de chlorate de soude.

N° 11667

13/10/1997

FRANCE - 42 - VEAUCHE

63.1E - Entreposage non frigorifique

Un conteneur de soude se renverse sur le quai d'un entrepôt au cours de sa manutention et 800 l se répandent sur le sol. Une CMIC intervient. Aucune pollution n'est constatée.

N° 13369

06/08/1998

FRANCE - 91 - LISSES

74.8K - Services annexes à la production

Un incendie détruit un entrepôt d'une entreprise de logistique. Les eaux d'extinction chargées en produits chimiques s'écoulent dans le réseau d'eaux usées et atteignent la station d'épuration. Le décanteur primaire doit être by-passé. Les effluents rejetés (sulfate de cuivre, ammoniacale, soude et éthylamine) polluent la SEINE. Les dommages s'élèvent à 1,2 MF. L'administration constate les faits.

N° 13640

11/09/1998

FRANCE - 84 - SORGUES

51.5L - Commerce de gros de produits chimiques

Une explosion suivie d'un incendie détruit le plus ancien des 3 entrepôts d'une coopérative agricole abritant une centaine de tonnes de produits phytosanitaires et 26 t de chlorate de soude. Vingt personnes sont choquées. L'onde de choc brise les vitres dans un rayon de 500 m. Des bidons sont projetés. L'essentiel des eaux d'extinction est récupéré. La nappe est surveillée par 2 piézomètres et par le contrôle des puits voisins. Aucune pollution n'est constatée 1 mois après le sinistre. Les fumées endommagent la végétation sur une distance de 500 m. Des riverains se plaignent d'une atteinte aux cultures voisines. Une entreprise spécialisée évacue les déchets qui seront éliminés dans des centres appropriés. Un arrêté préfectoral interdit le stockage de chlorate sur le site, tout en imposant le recours à des tiers experts pour modéliser les effets du sinistre sur l'environnement du site et réaliser un audit sur l'organisation du management de la sécurité mis en place par l'exploitant.

N° 25790

25/10/2003

FRANCE - 27 - BERNAY

24.5A - Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien

Les pompiers détectent vers 7h un incendie dans un stockage de matières premières d'une industrie de produits d'hygiène et d'entretien ménager. Ce bâtiment contient outre de la soude, de l'HCl, des tensioactifs, 2 étuves électriques de 30 et 60 °C utilisées afin d'éviter que les matières premières ne se figent. Le feu semble s'être déclaré au niveau de l'étuve à 60 °C contenant des tensioactifs. Une enquête (experts incendie, électrique, gendarmerie, pompiers, DRIRE) ouverte à la demande du procureur ne montre aucun dysfonctionnement dans l'alimentation électrique. L'hypothèse avancée est celle d'un emballage posé sur un convecteur et qui se serait enflammé. L'incendie est maîtrisé vers 9h15. Les rétentions présentes sur le site ont une capacité insuffisante pour contenir toutes les eaux d'extinction dont le surplus déborde par-dessus le muret de rétention et rejoint la CHARENTONNE. Des analyses sont réalisées pour évaluer la pollution aquatique (pH 10 entrepôt, pH 7 rivière). Ces produits chimiques génèrent une mousse qui flotte à la surface des eaux. Les pompiers mettent en place un barrage pour éviter la dispersion des substances et pompent les 28 m³ d'eaux d'extinction récupérées dans les rétentions ; 5 pompiers sont hospitalisés pour de légères brûlures aux pieds après contact avec de la soude. Les conditions météorologiques étant favorables, les fumées irritantes dégagées par l'incendie s'élèvent verticalement. Un périmètre de sécurité est mis en place. Par précaution, EDF coupe une ligne électrique HT de 20 KV et 10 maisons sont évacuées (30 personnes). Les riverains rejoignent leur domicile en fin de matinée. Aucun blessé n'est à déplorer. Une ronde effectuée par l'exploitant, la veille de l'incendie vers 18 h, ne signale rien d'anormal. Ce dernier est averti du sinistre par la gendarmerie, la télésurveillance ne visant que le stockage de gaz pour lequel le site est classé Seveso 'seuil bas'. L'activité reprend dès 5h du matin. 16 000 kg des 58 300 kg de matières

premières présentes dans le bâtiment sont détruites. Compte tenu de la nature des dangers présents sur le site, l'Inspection demande à l'exploitant de finaliser un POI pour fin novembre. Le 13/11, un arrêté de mise en demeure proposé au Préfet, vise des mesures appropriées au gardiennage de l'ensemble du site et au dimensionnement des rétentions en cas d'incendie ou d'accident.

Recherche ARIA portant sur « comburant » seulement : seuls des accidents pouvant présenter des enseignements pour l'activité d'entreposage sont retenus.

N° 13273

20/07/1998

FRANCE - 38 - CHASSE-SUR-RHONE

90.0E - Traitements des autres déchets solides

Dans une usine traitant des déchets industriels, une palette de cartons de 25 kg de galets de chlore périmés à base d'acide trichloroisocyanurique s'enflamme dans une alvéole couverte, fermée sur 3 côtés et dotée d'un dispositif fixe de détection / intervention incendie. Le foyer ne peut être éteint avec de la poudre. Une forte odeur de chlore se dégage lorsque les pompiers externes arrosent les emballages. L'exploitant demande l'arrêt de cette opération et l'évacuation des cartons 15 min plus tard. L'un d'eux devait contenir un combustible mélangé aux galets comburants (erreur de remplissage ou défaut de contrôle ?). La chaleur estivale peut aussi être une circonstance aggravante. Il n'y a ni victime, ni dommage matériel.

N° 15087

12/03/1999

FRANCE - 67 - DUTTLENHEIM

63.1E - Entreposage non frigorifique

Dans un établissement stockant des produits divers, substances comburantes et produits chlorés notamment, un fût contenant les balayures d'un atelier émet des vapeurs chlorées qui polluent l'atmosphère. Les pompiers établissent un périmètre de sécurité. Une émission vraisemblablement de chlore due à l'hydrolyse de produits à base de composés chloroisocyanuriques serait à l'origine de l'incident.

N° 24232

28/01/2003

FRANCE - 24 - SAINT-FELIX-DE-VILLADEIX

24.5A - Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien

Dans une usine de fabrication de pastilles chlorées pour piscines, une combustion a lieu dans une trémie alimentant une machine de compression servant à pastiller. Trois personnes dans l'atelier aperçoivent des fumées s'échappant de la cabine de la machine et du cône d'alimentation en surplomb. Les pompiers sont alertés, le POI est déclenché et les 10 employés évacuent l'usine. Equipés de masques panoramiques, 4 d'entre eux reviennent pour dégager les emballages stockés autour de la machine (cartons, plastiques, produits chimiques...), démonter l'avant de la cabine et récupérer les substances en combustion dans des fûts pour éviter une propagation du sinistre. Les 300 kg de matières premières impliquées (mélange d'acide dichloroisocyanurique / bicarbonate de soude / acide adipique) sont en phase finale de combustion 20 min après le départ du feu. Les exutoires mécaniques de fumée minimisent l'accumulation des fumées blanches dans l'atelier et un nuage dérive à l'extérieur. Les cendres de combustion sont extraites de la machine et stockées dans des bidons métalliques. Les pompiers sur place 20 à 25 min après l'alerte, pénètrent dans l'atelier sous ARI pour évaluer l'ampleur des dommages. En accord avec l'industriel, ils n'utilisent pas d'eau pour éteindre l'incendie, l'hydrolyse des substances en cause entraînant une émission de fumées toxiques et de gaz chlorés. Equipés de combinaisons de protection chimique, ils entrent dans l'atelier pour effectuer des prélèvements ; les analyses sont négatives. La production est suspendue durant 12 h, mais la ligne de production ne sera totalement remise en service que 48 h plus tard. Un examen visuel de l'installation révèle une trace d'échauffement circulaire sur la peinture du support du moteur de la vis de transfert des substances chimiques. Le démontage du dispositif permet de constater le désaccouplement de la vis et du moteur. Le boulon de maintien vis sans fin / arbre du moteur a cédé, frottant ensuite lors de la rotation des pièces contre la paroi métallique du tube d'entraînement. L'échauffement induit est à l'origine de l'inflammation des poussières de la substance chlorée. L'usine envisage de développer les contrôles et la maintenance préventives des pièces à risque avec pour objectif une amélioration progressive des installations. Des consignes sont modifiées. Autorisé à stocker 200 t de substances comburantes correspondant au seuil SEVESO AS, ce site doit faire l'objet d'un PPI.

N° 24994

05/07/2003

FRANCE - 69 - MEYZIEU

YY.OZ - Activité indéterminée

Un déversement volontaire de 300 l de fuel, 1 000 l de produits comburants et de 200 l de produits nocifs pollue des puits perdus situés devant des garages. Une entreprise de dépollution privée récupère les produits. Des prélèvements d'eau sont réalisés afin de vérifier l'absence de propagation vers la nappe phréatique. Etant donné la présence d'acide et d'hydrocarbures, la compagnie des eaux opte pour l'arrêt complet de 4 à 5 puits de captage de manière à drainer correctement tous les canaux.

N° 26663

05/03/2004

FRANCE - 24 - SAINT-FELIX-DE-VILLADEIX

24.5A - Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien

Un feu se déclare dans une usine fabriquant des pastilles de produit d'entretien pour piscines. L'alerte est simultanément donnée par un opérateur et le système de détection des fumées de l'unité. Le bâtiment est évacué et le POI de l'établissement est déclenché. La fumée se faisant moins dense 20 min plus tard, 2 employés équipés de masque respiratoire pénètrent dans l'atelier pour évaluer la situation : la fumée se dégage d'une masse de poudre en combustion sur le sol de la cabine à côté d'une machine. Pour éviter une propagation de la combustion, les 2 employés isolent la matière comburante dans des sceaux métalliques à l'aide d'une pelle. L'accident est maîtrisé 35 min après le déclenchement de l'alerte, juste avant l'arrivée des pompiers. Le site est sécurisé et les bâtiments sont aérés. Le départ de combustion s'est produit dans le récipient de collecte des poudres résiduelles de la machine de conditionnement de pastilles à base d'acide trichloroisocyanurique (ATCC). Une défaillance de la machine ou la qualité des matières premières présentes dans l'unité ne semblent pas être à l'origine de l'accident. L'exploitant retient comme origine probable de l'accident, la présence dans le récipient d'un résidu non compatible avec l'ATCC : traces d'humidité...

ANNEXE 4 :
Exemples d'accidents ayant impliqué des engrais

Note : Les accidents présentés ne comprennent pas de nitrate d'ammonium. De même, la sélection a été réalisée par type d'accident : les explosions et l'auto-décomposition de tas d'engrais (stockage en masse) n'ont pas été retenus. L'étude de ces accidents ne s'applique donc qu'à l'entreposage d'engrais tels que visés à la rubrique IC 1331.III.

N° 31470

02/07/2004

SUEDE - 00 - KOPING / VASTMANLAND

24.1J - Fabrication de produits azotés et d'engrais

Un feu suivi d'une explosion des gaz formés (type 'backdraft') se déclare dans un bâtiment de stockage d'une usine de production d'engrais abritant des matières premières (150 t de phosphate d'ammonium, 100 t de kiesérite, 250 t de sulfate de potassium), des produits finis (engrais de type C, non susceptibles de subir une décomposition auto-entretenu : 1500 t de NPK 27-3-3, 100 t de NP 26-6...) et 500 t d'engrais NPK 'off-spec' obtenus lors des phases de mise au point des formulations. L'incendie est maîtrisé après 6 h de lutte mais l'intervention des secours durera 15 h. Le bâtiment de stockage est détruit et la production du site est arrêtée pour plusieurs jours. Les rejets de polluants à l'atmosphère (5 à 7 t de NOx soit 10 à 13 % des rejets annuels autorisés) et dans l'eau (22,7 t d'azote représentant 25% de l'autorisation annuelle de rejet, 710 kg de phosphore) sont significatifs mais aucune conséquence humaine n'est relevée : sous l'action du vent, les importantes fumées dégagées se sont dispersées vers une zone inhabitée. Les origines de l'accident ne sont pas clairement établies du fait de la destruction totale de l'installation. Néanmoins, la cause probable de l'accident serait l'échauffement de l'engrais par friction au niveau d'une bande transporteuse située sous le toit et fonctionnant à vide depuis plus de 2h. Un défaut électrique est également plausible. Par ailleurs, l'accumulation de poussières d'engrais NPK dans le bâtiment, des bandes transporteuses en matériaux combustibles, la toiture en bois avec papier goudronné, l'absence de détecteur de feu dans le stockage et l'absence de mur coupe-feu au niveau des galeries de transport par bandes sont autant de facteurs aggravants. L'explosion des gaz issus de l'incendie et accumulés au niveau du toit s'est produite après que les déshumidificateurs du bâtiment se soient mis en fonctionnement, apportant ainsi de l'air 'frais' (l'humidité détectée serait due à l'ouverture des portes du stockage après activation des alarmes). Les mesures prises suite à ce sinistre sont les suivantes : consultation d'un spécialiste pour la sécurisation de l'installation contre l'incendie, interdiction du fonctionnement à vide des équipements, utilisation de bandes transporteuses en matériaux ignifugés, amélioration de la propreté des installations...

N° 22083

22/03/2002

FRANCE - 37 - SAINT-PIERRE-DES-CORPS

24.1J - Fabrication de produits azotés et d'engrais

Dans un établissement conditionnant à façon des engrais, amendements et produits phytosanitaires pour les jardins, un feu se déclare vers 5h30 dans un entrepôt de 6 500 m² abritant 50 t de substances soufrées, dont 15 à 18 t touchées par les flammes et 20 t en stockage sur palettes mises en contact avec l'eau, 10 t de nitrates d'ammonium stockées à l'extérieur de l'usine en sacs de 25 kg, 56 t de sulfates d'ammonium en palettes également stockées hors de l'usine, dont 4 t prises dans l'incendie, 10 t de sulfate de fer non atteintes, 50 t d'engrais divers également préservées et une quantité moindre de répulsifs en petits conditionnements. Un périmètre de sécurité de 800 m est mis en place. En l'absence de vent, l'incendie génère un important nuage de fumée noire qui dérive sur 3 km et à 200 m du sol. Parfois loin des lieux du sinistre une partie de cette fumée non toxique, mais riche en oxydes de soufre et d'azote, provoquera cependant quelques irritations passagères et sans gravité au niveau de la population. Les importants moyens d'intervention mobilisés (70 pompiers, CMIC, 10 gros véhicules, ambulances...) évitent la propagation du sinistre à un établissement mitoyen susceptible de stocker quant à lui 4 900 t de nitrate d'ammonium. Des difficultés d'intervention sont rencontrées : substances chimiques prises dans les flammes non totalement identifiées jusqu'à 10 h dans la matinée, latence dans la mise à disposition des plans des réseaux pour contenir les eaux d'extinction, protection respiratoire nécessaire aux pompiers, difficultés pour approvisionner en masques à cartouche filtrante les entreprises extérieures chargées des travaux de déblaiement, rotation de ces entreprises difficile en raison de la période (week-end, ARTT). L'incendie est maîtrisé à 7h13, les 2 500 à 3 000 m² de locaux et les substances chimiques qu'ils abritent continuant ensuite à brûler sous contrôle jusqu'à 10 h. Malgré l'obstruction des buses d'écoulement des eaux pluviales, une partie des 600 m³ d'eaux d'extinction utilisées pollue la BOIRE, affluent du CHER se rejetant lui-même dans la LOIRE. La fermeture de vannes contrôlant le déversement de la BOIRE dans le CHER permet de confiner dans la BOIRE les eaux susceptibles d'être polluées. Une surveillance du milieu naturel est mise en place. Des prélèvements d'eau et des analyses sont effectués durant l'intervention des secours.

N° 18678

08/09/2000

ETATS-UNIS - 00 - ROGERS CITY

63.1E - Entreposage non frigorifique

Un incendie se produit dans un entrepôt contenant des herbicides, pesticides et engrais. Une zone de 800 m autour du sinistre est évacuée, soit environ une cinquantaine de personnes. Les routes voisines sont coupées pendant environ 20 h.

N° 14220

02/11/1998

FRANCE - 59 - BLARINGHEM

51.2A - Commerce de gros de céréales et aliments pour le bétail

Un feu se déclare dans un dépôt de 300 t d'engrais NPK 14/8/24 contenant 5 % de soufre. Après avoir aperçu de la fumée, les employés tentent vainement d'éteindre l'incendie avec un extincteur et alertent les secours. Un périmètre de sécurité est mis en place. D'importants moyens interviennent (150 sauveteurs, etc.). Les 60 employés du site, des riverains et les employés de 2 établissements voisins situés dans l'axe des fumées sont évacués (80 personnes). Pour une raison indéterminée, une partie du stockage d'engrais sortie de l'entrepôt génère un 2ème sinistre. Un pompier légèrement intoxiqué est hospitalisé. Une partie des eaux d'extinction rejoint le milieu naturel, mais aucune conséquence notable n'est observée sur la faune ou la flore.

N° 14436

14/10/1992

ROYAUME-UNI - 00 - IPSWICH

63.1E - Entreposage non frigorifique

A la suite d'une négligence lors des travaux de soudure, une étincelle est le point de départ d'un incendie sur un stock d'engrais dans un entrepôt. Mille personnes sont évacuées à cause des émissions de fumées.

N° 3776

08/08/1992

BELGIQUE - 00 - BASECLES

24.1J - Fabrication de produits azotés et d'engrais

Un incendie se déclare dans les entrepôts d'une usine d'engrais chimiques. Une épaisse fumée et des émanations de nitrate gêne fortement les pompiers. La circulation est coupée pendant plusieurs heures sur la route nationale.

N° 5009

29/10/1987

FRANCE - 44 - NANTES

51.5L - Commerce de gros de produits chimiques

Dans un entrepôt dont le contenu est mal connu, la décomposition auto-entretenue d'un stock de 850 t d'engrais NPK 15-8-22 livré 5 jours plus tôt entraîne la formation d'un nuage de 10 km de long dérivant vers l'Ouest et dans lequel de l'acide nitrique est décelé. 100 t d'engrais brûlent sans flamme visible. 3 ouvriers sont légèrement intoxiqués et hospitalisés. Le plan ORSEC est déclenché, 1 500 policiers ou militaires sont mobilisés et 37 000 personnes sont évacuées durant 9 h. Le sinistre est maîtrisé après 7 h d'intervention. La LOIRE n'est que faiblement polluée. Le sinistre a été initié par la présence de matière organique dans l'engrais et par des installations électriques vétustes dont les sécurités avaient été neutralisées.

ANNEXE 5 :
Exemples d'accidents ayant impliqué des stockages de charbon

Note : Les activités de la très grande majorité des installations mises en cause dans les accidents de charbon ne s'apparentent pas à celle prévue sur le site FM LOGISTIC. De fait, seuls des incendies mettant en cause du stockage de charbon sont alors présentés, nonobstant de son utilisation finale.

N° 25350

16/08/2003

FRANCE - 03 - BRAIZE

24.1G - Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base

Un incendie se déclare dans un bâtiment de stockage en vrac de charbon de bois d'une usine de carbonisation de bois, fermée pour le week-end. Un automobiliste passant à proximité donne l'alerte, mais un portail fermé et un chien interdisant l'entrée du site retardent l'intervention des pompiers. Lors des faits, le bâtiment abrite 150 t de braisettes de charbon en vrac et en big-bag, ainsi que des big-bag de fines. L'incendie est circonscrit par arrosage du produit qui est ensuite évacué du hangar. Finalement, 50 t de stock sont détruites ou inutilisables et la toiture du bâtiment est fortement endommagée : le sinistre est évalué à 15 000 euros. L'essentiel des eaux d'extinction a été absorbé par le charbon de bois, seule une faible partie s'est écoulée dans le bassin de réception des eaux pluviales. Une auto-combustion des matières stockées serait à l'origine de l'accident. L'Inspection demande à l'exploitant de prendre en compte ce phénomène dans l'étude de danger de l'installation.

N° 23267

10/10/2002

FRANCE - 76 - VAL-DE-LA-HAYE

63.1 - Manutention et entreposage

Un incendie se déclare peu avant minuit dans un entrepôt de 6 600 m² contenant un stock de charbon, des bobines métalliques et des palettes de bouteilles en verre. Celui-ci est recoupé en 3 cellules et est occupé par 2 entreprises. Le stockage de verre est détruit. Les 60 pompiers qui interviennent pendant 6 h mettent en œuvre de gros moyens hydrauliques (2 lances canon et 6 grosses lances) nécessitant une alimentation par pompage dans la SEINE voisine. Les structures métalliques du bâtiment sont partiellement effondrées. Les 4 employés des sociétés sont mis en chômage technique. Les pompiers maintiennent un dispositif de surveillance pendant plus de 3 jours. Les travaux de déblaiement ne débiteront qu'après intervention de l'expert judiciaire.

N° 20567

19/05/2001

FRANCE - 15 - NEUSSARGUES-MOISSAC

10.1 - Extraction et agglomération de la houille

Dans une entreprise de carbonisation, un incendie se déclare dans la nuit sur une aire de stockage de charbon de bois. Au total, 600 palettes soit une centaine de tonnes de charbon de bois ont été détruites. Une vingtaine de pompiers est intervenue pour éviter la propagation du feu au reste du stockage des sacs sous films plastique, sur des palettes. Le sinistre a été circonscrit au terme de 3 h de lutte. La particularité de l'incendie réside dans l'absence de flamme : le charbon se consume longuement. Les lieux sont donc restés sous surveillance toute la nuit. Les palettes endommagées ont été transportées vers la décharge située non loin du site.

ANNEXE 6 :
Exemples d'accidents ayant impliqué des peroxydes organiques

N° 28981 - 15/10/2004 - FRANCE - 13 – ROGNAC

E38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux

Dans une usine d'incinération de déchets industriels, un incendie et 3 explosions se produisent lors du broyage sous inertage par brumisation d'emballages pollués par des peroxydes organiques. Le POI est déclenché à 14h37. L'intervention mobilise les services de secours publics, ainsi que les pompiers d'une entreprise voisine. La chaîne de broyage est isolée, mais la ligne d'incinération n'est pas arrêtée. Les laboratoires et le personnel administratif sont évacués. Le POI est levé à 15h10 et la situation est maîtrisée 50 min plus tard. Aucun impact sur l'environnement n'est signalé. Les procédures de réception et de tri de ce type d'emballages sont modifiées pour orienter ces derniers sur la filière d'incinération directe ou sur un broyage spécifique.

N° 22459 - 18/05/2002 - FRANCE - 59 – DUNKERQUE

C19.20 - Raffinage du pétrole

Dans une usine produisant des bitumes, huiles de base et autres dérivés, une explosion se produit sur un réservoir de 140 t contenant un additif entrant dans la composition de bitumes routiers et constitué de 2 polymères à point éclair élevé. Calorifugé et pratiquement plein lors de l'accident, le réservoir dispose d'un agitateur et d'un serpentin de réchauffage (produit visqueux maintenu au-dessus de 150°C), ainsi que d'un indicateur de température, d'un dispositif d'inertage à l'azote et d'un évent. Sous l'effet de l'explosion, le toit du réservoir est projeté à proximité et le bac s'enflamme. Le POI est déclenché. L'exploitant maîtrise le feu en 10 min à l'aide de 2 lances canon. Les pompiers externes alertés n'auront pas à intervenir. Aucun blessé n'est à déplorer et les dommages matériels se limitent au réservoir. Le vent ne soufflait pas en direction des riverains mais vers les darses. Les matières restées dans le réservoir seront transférées en quasi-totalité dans une autre capacité. La quantité de matière perdue dans l'incendie est évaluée à 1 m³. La cuvette de rétention sera vidangée. Sur proposition de l'inspection, le préfet signe un arrêté d'urgence suspendant l'approvisionnement de l'additif concerné le temps de réaliser les investigations et expertises nécessaires. Les enquêtes réalisées révèlent que les 2 polymères peuvent se décomposer en présence de chaleur. Le premier se décompose en une substance ayant un point de flash inférieur à 50 °C et en un monomère très inflammable de point éclair inférieur à 0°C. Le second peut dégager des gaz extrêmement inflammables. L'origine de l'accident serait due à une décomposition lente des 2 constituants de l'additif pouvant donner, en présence d'air, des peroxydes organiques ou autres substances susceptibles de s'enflammer spontanément. Ces constituants, stockés depuis longtemps sans agitation, sont par ailleurs fortement accumulateurs d'électricité statique. Le simple balayage à l'azote du réservoir permettait l'entrée d'air. Au-delà des mesures immédiates, l'inspection propose au préfet la mise en place des équipements suivants : mesure en continu et régulation automatique de température avec alarme niveau haut, inertage à l'azote sur contrôle de pression, contrôle de l'intensité du moteur de l'agitateur, évent à clapet limitant les entrées d'air ou équivalent. Une étude sur l'extension de ces équipements aux autres bacs de liquides inflammables est également demandée.

N° 20091 - 23/02/2001 - FRANCE - 62 – MAZINGARBE

C20.16 - Fabrication de matières plastiques de base

Dans une usine de fabrication de Polychlorure de Vinyle, un incendie se déclare, le vendredi matin, dans le local électrique situé sous la salle de contrôle. Le déclenchement de l'alarme et la présence de fumée, alertent l'équipe d'intervention interne. L'usine est alors mise en sécurité par actionnement des systèmes d'arrêts d'urgence, introduction d'inhibiteurs dans les réacteurs et isolement des circuits de CVM. Les secours extérieurs interviennent 20 min plus tard et ventilent le local enfumé avant de combattre l'incendie. Une soupape de réacteur laissant échapper du gaz à la torche, le personnel est évacué 35 min après le début de l'incendie. Le POI est activé. Des mesures de gaz effectuées dans l'usine montrent qu'il n'y a pas d'émanation dangereuse extérieure au site. L'usine est rapidement privée de toute utilité (eau, électricité, air comprimé, instrumentation). Une surveillance locale des réacteurs est mise en place. Le sinistre est maîtrisé en 2 h (2 foyers dans le local électrique). 2 employés sont légèrement incommodés par la fumée. Les dégâts se limitent au local électrique (une armoire détruite). Le stockage de peroxydes organiques dont la réfrigération est obligatoire, nécessite l'intervention d'une société externe. La remise en route des utilités et la réalimentation des tableaux électriques sont prévues le soir même, les lignes de fabrication redémarreront le lundi matin.

N° 5983 - 28/10/1994 - FRANCE - 77 - MONTEREAU-FAUT-YONNE

C27.32 - Fabrication d'autres fils et câbles électroniques ou électriques

Un incendie se déclare au deuxième étage d'une entreprise fabriquant des câbles électriques isolés. Le POI est déclenché. Trois pompiers sont intoxiqués au cours de l'intervention ; leurs appareils respiratoires individuels sont arrachés à la suite des difficultés d'accès (canalisations). L'origine de l'incendie pourrait être liée à la présence de peroxydes organiques injectés sous forme liquide dans la vis de l'extrudeuse. A la suite de cet accident, des mesures préventives sont décidées : déplacement de l'installation électrique, mise en place de moyens de protection anti-feu sur la machine et de détection incendie avec dispositifs d'extinction asservis.

N° 219 - 26/06/1991 - JAPON - 00 - ICHIHARA-SHI

C20.13 - Fabrication d'autres produits chimiques inorganiques de base

Lors de l'arrêt d'une unité, la moitié supérieure d'une colonne de distillation (hauteur 30 m, diamètre 0,9 m) explose. Le méthanol contenu était contaminé par du peroxyde d'hydrogène utilisé en amont et non neutralisé à la suite d'une panne de pH-mètre. L'explosion, due à la formation de peroxydes organiques (méthylhydroperoxyde notamment) et d'une puissance estimée de 10 à 50 kg d'équivalents TNT, fait 2 morts et 11 blessés. Des missiles sont projetés à 900 m, faisant 2 blessés dans une entreprise voisine. L'incendie qui suit est maîtrisé en 10 min par 250 sauveteurs.

N° 87 - 22/03/1989 - ITALIE - 00 - TREZZANO SUL NAVIGLIO

C20.59 - Fabrication d'autres produits chimiques n.c.a.

Lors du nettoyage d'une unité de production de résines à l'arrêt depuis 1 an, un agent densifiant à base de peroxydes organiques est introduit dans des fûts de résine. Une réaction intempestive provoque l'émission de vapeurs irritantes. Quelques personnes à l'extérieur du site présentent des symptômes d'intoxication légère. L'affaire suscite une vive réaction de la population.

N° 15248 - 03/07/1986 - FRANCE - 38 – BRIGNOUD

C20.13 - Fabrication d'autres produits chimiques inorganiques de base

Une explosion de peroxydes organiques se produit dans un dépôt de 1 200 kg d'une usine chimique.

N° 6266 - 18/06/1986 - FRANCE - 69 – GRIGNY

E38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux

L'auto-inflammation de peroxydes organiques provoque l'incendie d'un stockage de déchets (produits de laboratoire, etc.). Plusieurs pompiers sont indisposés par la fumée. Les voies ferroviaires sont coupées. Il n'y a pas de conséquence sur la nappe phréatique qui sera surveillée jusqu'en septembre 1986.

***ANNEXE 7 :
Accidentologie orientée sur les possibilités de propagation
des incendies***

N°29058 - 29/01/2005 - 17 - ROYAN

52.1F - Hypermarchés

Un violent incendie vers 22 h dans le local semi-ouvert de compactage des emballages d'un hypermarché se propage à une réserve de 2 000 m² contenant des racks de 10 m de haut. Alerté par un vigile, les secours mobilisent d'importants moyens humains (90 pompiers) et matériels (25 véhicules venus de 12 centres de secours) pour maîtriser le sinistre. Les 2 cellules de la réserve s'embrasent rapidement ; une porte (actionnée par fusible) du mur coupe-feu interne est restée ouverte et l'exploitant a neutralisé l'installation d'extinction automatique par sprinklers en raison du gel. De nombreuses explosions (aérosols, bouteilles de gaz...) se produisent. L'incendie attisé par le vent menaçant la surface de vente, les pompiers concentrent leurs efforts sur le mur coupe-feu entre le magasin et la réserve et demande à l'exploitant la remise en service du dispositif d'extinction automatique. Activés par la fumée et les gaz chauds qui s'infiltrèrent sous la toiture de la surface de vente les sprinklers se déclenchent. L'action conjuguée des lances des pompiers et de l'installation d'extinction automatique permet d'arrêter la propagation du feu à 0h20. Les risques d'effondrement ne permettant pas aux pompiers de s'engager pour atteindre l'ensemble des foyers, la poursuite de l'extinction s'effectue à distance. Maîtrisé à 2h30, le feu ne sera considéré éteint que 4 jours plus tard. Selon la presse un acte de malveillance pourrait être à l'origine du sinistre. La police effectue une enquête. La réserve de 2 000 m² est détruite, mais la surface de vente, la galerie marchande et des locaux périphériques (locaux techniques, boucherie, pâtisserie, zone traiteur) sont préservés.

14852 - 8/2/1999- 14 - LIVAROT

15.5 - Industrie laitière

Un feu se déclare la nuit dans l'un des locaux de stockage d'une fromagerie. D'importants moyens de secours (8 casernes / 100 pompiers) interviennent en ARI durant 4h30. Un vent violent accompagné de pluie et de neige, la présence de produits chimiques divers (soude, ammoniac, acide, fréon, oxygène), l'explosion de bonbonnes de gaz, la présence de 4 bouteilles d'acétylène, de bouteilles de propane et de nombreux aérosols (peinture) en feu qui seront plongés dans une cuve d'eau, ainsi qu'une légère fuite d'ammoniac à la suite de la rupture d'une canalisation associée à une installation de réfrigération et fixée sur un IPN déformé par l'incendie... compliquent l'intervention. L'établissement de 10 000 m² est détruit à 90 % ; seuls les endroits équipés de murs coupe-feu sont épargnés. Les dommages matériels et les pertes d'exploitation sont évalués à 125 et 65 MF, 150 personnes risquent d'être en chômage technique. La reconstruction de l'établissement demandera 12 à 14 mois de travaux.

Retour d'expérience sur les Incendies de stockage de produits inflammables :

N° 18827 - 2/8/2000- 79 - NIORT

YY.0 - Activité indéterminée

Un incendie se déclare dans un entrepôt de 200 m². Les flammes sont alimentées par des produits très inflammables. La présence d'une porte coupe-feu se révèle efficace, empêchant la propagation du feu à tout le magasin et à un garage mitoyen. L'incident serait d'origine criminelle (vitre brisée).

20361 - 19/5/2001- 33 - PAUILLAC

52.1 - Commerce de détail en magasin non spécialisé

Un incendie détruit un supermarché de 1750 m². Les pompiers éteignent le feu en 3 h en préservant les maisons mitoyennes. Le feu se serait déclaré au niveau des meubles réfrigérés du magasin. Les séparations coupe-feu ont permis de protéger le local de stockage de marchandises qui contient des produits inflammables. Aucune information n'est donné sur les dommages occasionnés aux installations de réfrigération.

N°31730 - 01/04/2006 - 25 - AUDINCOURT

34.3Z - Fabrication d'équipements automobiles

A la suite d'un acte de malveillance, un feu se déclare vers 15 h dans un entrepôt de produits finis de 2 000 m² (pare-chocs en polypropylène et calandres en acrylonitrile-butadiène-styrène) d'une usine de fabrication d'équipements automobiles. L'incendie émet d'épaisses fumées noires et se propage au bâtiment voisin, sans atteindre toutefois les liquides inflammables (solvants) stockés dans un local coupe-feu aménagé à l'intérieur de ce bâtiment en pierre. Le POI est déclenché. Le flux thermique provoque l'explosion (vraisemblablement Bleve) de 65 des 191 bouteilles de GPL (13 Kg de charge unitaire) stockées à l'air libre à quelques mètres de l'entrepôt et utilisées pour le fonctionnement des chariots-élévateurs du site. Des éclats de bouteilles sont projetés à l'extérieur de l'établissement et blessent légèrement un passant. Les 75 pompiers mobilisés maîtrisent le sinistre en 3 h avec 8 lances à débit variable ; les foyers résiduels sont éteints avec des lances à mousse. L'entrepôt de produits finis, à structure métallique et la toiture du bâtiment voisin sont détruits. Cet accident n'a pas de conséquence sur l'activité de l'usine, aucun atelier de production n'ayant été impliqué dans l'incendie. Les vannes empêchant l'écoulement des eaux d'extinction vers la rivière LE GLAND, inaccessibles au début de l'intervention des secours, ne seront fermées qu'une heure après le début de l'incendie ; ces eaux ont pu entraîner des résidus solides de combustion des plastiques. Les eaux d'extinction confinées sur le site sont évacuées par une entreprise spécialisée. L'Inspection des installations classées effectue une enquête et constate des non-conformités au regard des prescriptions de l'arrêté d'autorisation applicable à l'entrepôt : absence de détection incendie, de RIA et de détection automatique de fumées avec report d'alarme. Une enquête judiciaire est également diligentée à la suite d'une plainte contre X. Selon la presse écrite des jours suivants, un agent de sécurité du site, employé d'une entreprise sous-traitante de surveillance, aurait été mis en examen pour " dégradations volontaires par le feu de nature à créer un danger pour les personnes ".

Retour d'expérience sur les Incendies de stockage de produits combustibles :

16540 - 22/8/1999- 19 - TULLE

15.1 - Industrie des viandes

Un incendie détruit un entrepôt de viande. La toiture et la charpente métallique sont fortement endommagées, 13 personnes sont en chômage technique. Aucune précision n'est donnée quant aux dommages éventuels subis par les installations de réfrigération. Séparé de l'établissement par un simple mur coupe-feu, un magasin de produits agricoles (solvants, etc.) et de jardinage a été protégé lors de l'intervention.

20361 - 19/5/2001- 33 - PAUILLAC

52.1 - Commerce de détail en magasin non spécialisé

Un incendie détruit un supermarché de 1750 m². Les pompiers éteignent le feu en 3 h en préservant les maisons mitoyennes. Le feu se serait déclaré au niveau des meubles réfrigérés du magasin. Les séparations coupe-feu ont permis de protéger le local de stockage de marchandises qui contient des produits inflammables. Aucune information n'est donnée sur les dommages occasionnés aux installations de réfrigération.

02/12/1996 - 60 - NEUILLY-EN-THELLE

Un incendie d'origine criminelle détruit la partie centrale d'un entrepôt de 4 000 m² abritant des jouets. La présence de murs coupe-feu a permis de sauvegarder le reste du bâtiment et éviter la propagation du feu aux entrepôts voisins.

19/06/1998 - 01 - AMBERIEU-EN-BUGEY

Un feu se déclare dans une charcuterie. Les ateliers et les entrepôts s'embrasent rapidement (panneaux sandwich) Une fumée abondante est émise. En 3 h, 15 000 m² de bâtiments et les unités de réfrigération (F22) sont détruits. Un intervenant extérieur (retrouvé dans un couloir) effectuant des travaux de soudure et 2 employés (en mezzanine au-dessus des chambres froides) périssent asphyxiés, 8 personnes sont blessées. Les eaux d'extinction rejoignent un bassin d'orage. Un mur coupe-feu a protégé les locaux administratifs. Plusieurs jours sont nécessaires pour évacuer 500 t de viande, ce qui génère odeurs et nuisances diverses.

N° 31870 - 20/06/2006 - 88 - LAVAL-SUR-VOLOGNE

21.2E - Fabrication d'articles en papier à usage sanitaire ou domestique

Dans une papeterie, un feu se déclare vers 15h15 dans un bâtiment de 1 500 m² abritant 2 500 t de balles de pâte à papier, des bobines de 'cassés' et 200 t de produits chimiques (utilisés comme charges dans la fabrication du papier). Impuissant face au départ de feu, l'opérateur alerte les pompiers qui constatent à leur arrivée que l'incendie s'est généralisé à tout le bâtiment. Les secours évacuent les produits chimiques et éloignent les produits combustibles de l'exploitant voisin, stockés dans le même bâtiment mais séparés par un mur coupe-feu 2 heures. Ils mettent en œuvre d'importants moyens hydrauliques (jusqu'à 10 m³/s) alimentés par motopompes à partir du canal de dérivation de la VOLOGNE. Les eaux d'extinction se dirigent par gravité vers le milieu naturel ; des mesures de DCO, MES, DBO5 et de l'indice biologique global normalisé seront effectuées en amont et aval du point de rejet. Un dispositif de relevage est mis en place le lendemain pour acheminer les eaux d'extinction vers la STEP du site. Un pompier est légèrement incommodé par les fumées. L'incendie détruit les 3/4 du bâtiment mais aucun produit chimique n'a été libéré durant le sinistre. Faute de matière 1ère, la production sera arrêtée durant 72 h. Les dommages matériels sont estimés à 2 M.euro et les pertes de production à 0,2 M.euro. A titre de retour d'expérience, on peut ajouter que la toiture métallique refroidie par les pompiers a résisté, que les murs en parpaings ont permis de limiter les flux thermiques vers l'extérieur et que les balles de pâte, abondamment arrosées, ont gonflé puis chuté en causant l'effondrement d'un mur d'enceinte du stockage. A la suite de l'accident, l'exploitant reconstruit le bâtiment en réorganisant les stockages et en révisant les dispositifs de détection / extinction d'incendie, les moyens d'intervention et la collecte des eaux d'extinction.

N°31730 - 01/04/2006 - 25 - AUDINCOURT

34.3Z - Fabrication d'équipements automobiles

A la suite d'un acte de malveillance, un feu se déclare vers 15 h dans un entrepôt de produits finis de 2 000 m² (pare-chocs en polypropylène et calandres en acrylonitrile-butadiène-styrène) d'une usine de fabrication d'équipements automobiles. L'incendie émet d'épaisses fumées noires et se propage au bâtiment voisin, sans atteindre toutefois les liquides inflammables (solvants) stockés dans un local coupe-feu aménagé à l'intérieur de ce bâtiment en pierre. Le POI est déclenché. Le flux thermique provoque l'explosion (vraisemblablement Bleve) de 65 des 191 bouteilles de GPL (13 Kg de charge unitaire) stockées à l'air libre à quelques mètres de l'entrepôt et utilisées pour le fonctionnement des chariots-élévateurs du site. Des éclats de bouteilles sont projetés à l'extérieur de l'établissement et blessent légèrement un passant. Les 75 pompiers mobilisés maîtrisent le sinistre en 3 h avec 8 lances à débit variable ; les foyers résiduels sont éteints avec des lances à mousse. L'entrepôt de produits finis, à structure métallique et la toiture du bâtiment voisin sont détruits. Cet accident n'a pas de conséquence sur l'activité de l'usine, aucun atelier de production n'ayant été impliqué dans l'incendie. Les vannes empêchant l'écoulement des eaux d'extinction vers la rivière LE GLAND, inaccessibles au début de l'intervention des secours, ne seront fermées qu'une heure après le début de l'incendie ; ces eaux ont pu entraîner des résidus solides de combustion des plastiques. Les eaux d'extinction confinées sur le site sont évacuées par une entreprise spécialisée. L'Inspection des installations classées effectue une enquête et constate des non-

conformités au regard des prescriptions de l'arrêté d'autorisation applicable à l'entrepôt : absence de détection incendie, de RIA et de détection automatique de fumées avec report d'alarme. Une enquête judiciaire est également diligentée à la suite d'une plainte contre X. Selon la presse écrite des jours suivants, un agent de sécurité du site, employé d'une entreprise sous-traitante de surveillance, aurait été mis en examen pour " dégradations volontaires par le feu de nature à créer un danger pour les personnes ".

N°30979 - 06/11/2005 - 71 - MONTCEAU-LES-MINES

29.5E - Fabrication de machines pour l'industrie agroalimentaire

A la suite de violences urbaines, un feu de voitures se propage à un bâtiment de 1 400 m² abritant des cartons, des produits finis et 2 poids lourds dans une usine de fabrication d'appareils électroménagers. Les 40 pompiers mobilisés circonscrivent le sinistre en 2 h avec 5 lances à débit variable et préservent des flammes l'atelier de production séparé du dépôt par un mur coupe-feu.

N°31186 - 21/12/2005 - 91 - BRIERES-LES-SCELLES

51.5A - Commerce de gros de combustibles

Un feu se déclare vers 13h30 sur la chaîne de transvasement occupant 300 m² de l'un des 2 ateliers de conditionnement d'un commerce de gros de combustibles. L'entreprise mélange et conditionne du carburant pour moteurs 2 temps. Les 2 opérateurs ne peuvent maîtriser le départ de feu qui se propage aux 1 000 m² de l'atelier abritant 1 200 l de carburants (2 palettes de bidons) et 1 200 l d'huile (6 fûts). Les 11 employés évacuent le site et un périmètre de sécurité de 150 m est mis en place. Les 57 pompiers mobilisés qui utilisent 6 lances à eau et 2 lances à mousse, circonscrivent le sinistre en 1h30 ; 2 pompiers seront légèrement blessés. L'intervention des secours, ainsi que la présence de murs coupe-feu 2 h et de portes coupe-feu ½ h évitent la propagation des flammes à un local contigu stockant 30 000 l de carburant (conditionné en bidons de 2 ou 5 l). Pour prévenir toute reprise du feu dans la nuit suivante, 2 lances restent en manœuvre pour maintenir un tapis de mousse. Le lendemain matin, une société spécialisée abat les murs menacés d'effondrement. Une défaillance électrique serait à l'origine du sinistre, les opérateurs ayant entendu un grésillement peu avant le départ de feu. Les eaux d'extinction ont transité par un décanteur déshuileur qui n'était toutefois pas dimensionné pour faire face à l'important débit assuré par les lances, des hydrocarbures ont ainsi rejoint le réseau collectif d'assainissement ; aucune pollution des eaux n'a cependant été constatée. Quatre personnes sont en chômage technique. La gendarmerie et des élus locaux se sont rendus sur les lieux.

18/7/2001 69 - SAINT-GENIS-LAVAL

29.7 - Fabrication d'appareils domestiques

Dans une usine fabriquant des appareils fonctionnant au GPL, un violent incendie se déclare la nuit dans un atelier de 18 000 m². Ce dernier abrite les activités de montage et de peinture de petits matériels divers (appareils de soudage, bombones de camping, réchauds,...). Sous l'effet de la chaleur, la toiture du bâtiment explose et un pan de mur s'effondre. L'atelier est à l'arrêt à l'heure de l'accident. L'alerte est donnée à la société de gardiennage par le dispositif de détection. L'ensemble du site est aussitôt mis en sécurité (coupure de l'électricité, du réseau d'air comprimé). L'atelier concerné se situe à 150 m de l'atelier de conditionnement et de remplissage de récipients mobiles de gaz inflammables liquéfiés et à 350 m des stockages en vrac (1 sphère de 550 m³ et 11 citernes de 150 m³). De très gros moyens sont déployés par les services de secours : 20 véhicules d'intervention, 3 grandes échelles, 14 lances de 60 m³/h et environ 70 pompiers. Le sinistre est maîtrisé au terme de 4 h de lutte. L'intervention des secours a porté aussi la protection des bâtiments voisins. 6 000 m² sont détruits et plus de 100 personnes sont en chômage technique. Les installations de production situées dans le bâtiment mais protégées par des murs coupe-feu n'ont quasiment pas été touchées. Il est à noter que des riverains ont spontanément quitté leur habitation par crainte d'une aggravation.

10/03/2001

33 - BORDEAUX

15.4 - Industrie des corps gras

Une heure après la ronde d'un chef de quart dans une usine produisant des huiles alimentaires, un feu se déclare dans un atelier de 250 m² où sont stockés des acides gras entrant dans la composition des huiles. Une épaisse fumée noire est émise. Le gardien donne l'alerte. Le POI déclenché 15 mn plus tard restera activé durant 1 h. D'importants moyens en hommes et matériels interviennent (16 véhicules, 1 bateau-pompe). Le réseau des effluents est rapidement isolé en sortie d'usine pour éviter toute pollution ; une société spécialisée éliminera 15 m³ d'un mélange d'eaux d'extinction, d'eaux et acide gras. Aucune pollution de la GARONNE n'est observée. L'incendie serait d'origine électrique. Les flammes ont pu être circonscrites à un seul local grâce aux murs coupe-feu séparant les 4 unités de l'établissement. Les dommages matériels sont évalués à 2 MF et les pertes d'exploitation à 1,8 MF.

Violent incendie dans une charcuterie industrielle à Ambérieu-en-Bugey (01), le 19 juin 1998.

La charcuterie industrielle est implantée, depuis 1981, à proximité d'habitations en Zone Industrielle et d'activité commerciale à Ambérieu en Bugey dans le département de l'Ain. L'établissement qui a fait l'objet d'une extension en 1986 et de modifications en 1992 et 1995-1996, a une capacité de production de 15 000 t/an ou 300 t/semaine. La charcuterie emploie 270 salariés en 1996 lorsqu'elle est reprise par un grand groupe de l'agroalimentaire. L'usine qui a été restructurée en 1997 et 1998 (2 x 4 MF) et emploie depuis 140 personnes pour une production de 35 t/jour, est en cours de régularisation administrative.

LES INSTALLATIONS CONCERNEES PAR L'ACCIDENT

L'établissement comprend un bâtiment sur 2 niveaux, bureaux et locaux de vie pour les employés, de 1 500 m². Un 2ème bâtiment de 15 000 m² est utilisé pour la réception, le stockage, la fabrication et l'expédition des matières premières ou des produits finis. Ce bâtiment est constitué d'une charpente métallique, de poteaux et éléments de support de charpente (en béton armé jusqu'en 1992, métalliques depuis) et de cloisons en panneaux isolants à base de mousse polyuréthane. Des murs en parpaings isolent les bâtiments techniques et administratifs, ainsi que certains locaux spécifiques (chaufferie, etc.). Une partie du toit est constitué de bacs acier bitumés et un 2ème niveau existe dans certaines zones (salle des machines, salles blanches, etc.).

L'ACCIDENT ET SES CONSEQUENCES

Le 19 juin vers 13h25, un feu se déclare dans la charcuterie. L'alerte est donnée et les premiers secours arrivent sur place 7 mn plus tard, mais le sinistre s'est déjà largement généralisé. L'usine s'est embrasée sur 4 000 m² en 17 mn (panneaux sandwich combustibles) et une fumée abondante est émise.

Malgré les renforts qui affluent progressivement, les 15 000 m² du bâtiment d'exploitation et les unités de réfrigération (R22) seront détruits en moins de 2 h. Les secours confirment plusieurs enseignements qui expliquent la rapidité de la propagation du sinistre et les difficultés d'intervention :

Un retard dans le déclenchement des secours (appel du 18) en raison de l'absence d'alarme sonore, à la suite d'une découverte tardive du sinistre (pause de midi et alerte donnée par les voisins) et de moyens de communication inadaptés (téléphone des locaux de travail sans accès extérieur, standard fermé).

Le principe de construction retenu, 1 boîte (panneaux sandwich) dans une autre boîte (bardage et toits), sans exutoire de fumée, entraîne dans un premier temps le confinement de la chaleur et du rayonnement dans la double enceinte en empêchant l'évacuation des gaz chauds.

Un cloisonnement insuffisant, voir inexistant, en présence d'une utilisation massive de panneaux sandwich (paroi et plafond) à base de mousse polyuréthane. Ces panneaux classés M1, mais n'ayant plus aucune tenue au-delà de 300 °C, accroissent la charge thermique et génèrent des gaz dangereux et des matières volatiles qui alimentent les flammes ; selon les pompiers, celles-ci se propagent dans les murs " comme des chalumeaux ".

Les éléments métalliques des charpentes s'effondrent au feu. Le bitume constituant la toiture (bac acier panneaux bitumineux) fond, coule et brûle.

Des faux plafonds inaccessibles en certains lieux isolant d'importants volumes sous toiture et des chambres de congélation de très grand volume sont des facteurs aggravants.

Les charges calorifiques sont très variables (matériaux de conditionnement, etc.) et l'inflammation des marchandises congelées est favorisée par le froid qui dessèche le contenu. Un taux de remplissage important laisse peu de place pour évoluer et le gerbage des racks crée un effet " cheminée ".

Les fumées abondantes empêchent la localisation précise des foyers, mais les fluides réfrigérants, eau glycolée et R22 en l'occurrence, sont sans répercussion.

Par ailleurs, la destruction lors d'un incendie des descentes d'eaux pluviales en plastique non renforcées par un fourreau en tube métallique peut permettre un retour des eaux d'extinction directement dans la nappe via le réseau EP lorsque celui-ci est relié à un puisard d'infiltration.

Malgré les renforts qui progressivement affluent, les 15 000 m² du bâtiment d'exploitation et les unités de réfrigération (R22) sont détruits en moins de 2 h. Au plus fort de l'incendie, 450 m³/h d'eau sont nécessaires. L'incendie sera maîtrisé à 15h50 et éteint le lendemain à 8h00. Les opérations de secours se terminent le surlendemain à 15 h 00.

A la suite du sinistre, 3 morts (un intervenant extérieur, retrouvé dans un couloir, effectuant des travaux de soudure et 2 employés, en mezzanine au-dessus des chambres froides, périssent asphyxiés) et 8 blessés légers sont à déplorer. Un mur coupe-feu a préservé les locaux administratifs, mais l'usine est détruite. Les dommages matériels sont évalués à plus de 40 MF et 120 employés sont licenciés. La direction annoncera la fermeture définitive de l'établissement un an plus tard.

ENSEIGNEMENTS TIRES ET CONCLUSIONS

Les installations maintes fois remaniées étaient en travaux le jour de l'accident qui s'est produit en période d'activité réduite de l'établissement (pause déjeuner). L'ampleur, la rapidité du sinistre et la crainte d'émissions toxiques ont compliqué la coordination des secours.

A la suite du sinistre et en raison notamment de la procédure judiciaire et des expertises à réaliser, plusieurs jours seront nécessaires pour dégager et évacuer 500 t de viande ensevelies sous les décombres (odeurs perçues à longue distance, pullulation d'insectes et de rats, risque de pollution de la nappe phréatique, etc.).

De nombreuses mesures préventives ou curatives sont recommandées :

Au niveau de la conception de l'établissement ;

Intégrer la protection incendie dès la conception ;

Compartimenter les différents espaces (murs séparatifs, panneaux MO en laine de verre, mousse de roche, etc.) ;

Isoler les locaux à risques ou à fort pouvoir calorifique (salle des machines, chaufferie, stockages de combustibles, etc.) ;

Protéger les installations électriques (armoires résistantes au feu, etc.), éviter le passage de conducteurs électriques au travers des panneaux sandwich, isoler les câbles dans des gaines, décoller les luminaires des parois, etc ;

Sprinkler les locaux sensibles ;

Etudier et installer une détection adaptée.

Au niveau des matériaux utilisés et de l'aménagement de l'établissement

Nombre et emplacement des RIA (pression suffisante),

Ossature et charpente porteuse stables au feu (béton armé ou fer " ignifugé "), pour le béton. Enrobage des armatures (4 cm au minimum), " murs " extérieurs en béton cellulaire ou bardage métallique avec âme isolante MO,

Exutoire de fumée/chaleur + cantonnement de désenfumage.

Vis-à-vis du personnel et du fonctionnement des ateliers

Sensibiliser, informer et former les employés (sécurité comprise : exercices internes, avec les secours, etc.),

Utiliser la procédure permis de feu lors de travaux.

Installer une alarme sonore,

Installer une signalisation renforcée des issues de secours (feux à éclats, etc...),

Permettre l'accès direct des ateliers au 18 (appel des secours).

Mesures curatives

Informar les personnes par le déclenchement précoce d'alarmes et faciliter l'évacuation des locaux usuels, ainsi que des parties aménagées en hauteur telles que les mezzanines (vers le toit lorsqu'il est en béton ou vers le bas dans les autres cas),

Assurer des liens avec les secours (contact avec l'officier coordonnant les secours, plan actualisé des bâtiments avec emplacement des hydrants, RIA, etc.),

Sauvegarder le milieu naturel (devenir des eaux d'extinction, décontamination rapide des lieux sinistrés, etc.).

Incendie de générateurs d'aérosols dans une usine chimique à Saint Egrève (38), le 13 juillet 1999

LES INSTALLATIONS CONCERNEES

L'entreprise a été créée en 1952 et emploie 66 personnes. Elle fabrique et conditionne divers générateurs d'aérosols. L'établissement est situé en zone urbaine dense dans les locaux d'une ancienne brasserie. L'ensemble du site bénéficie d'une autorisation. Un arrêté préfectoral pris en 1986 a autorisé une extension du site.

L'ACCIDENT, SON DEROULEMENT ET SES CONSÉQUENCES

Le 13 juillet 1999, vers 17 h, un feu se déclare au 2ème sous-sol de l'entreprise, dans le stockage de produits finis constitués de générateurs d'aérosols. L'entreprise alerte immédiatement les pompiers.

Le conducteur d'un chariot élévateur a vu un flash apparaître sous son engin et l'atmosphère s'enflammer. Légèrement brûlé, il a aussitôt quitté les lieux. Plusieurs explosions se produisent (BLEVE des générateurs aérosol), d'épaisses fumées noires malodorantes se dégagent en toiture et cheminées du bâtiment de stockage conduisant à l'évacuation de 59 habitations.

La fumée et la chaleur dégagées compliquent l'intervention des pompiers : 4 d'entre eux, légèrement blessés lors d'une explosion, sont examinés et 2 sont gardés en observation une journée ; 25 autres incommodés par les gaz de combustion sont hospitalisés. L'intervention mobilise 8 centres de secours, soit 130 pompiers et 42 véhicules. L'incendie est maîtrisé vers 21 h.

Les dommages évalués à 5 ou 6 MF sont limités au local de stockage et quelques locaux voisins. Le chariot élévateur et le monte-charge sont détruits, de nombreux générateurs d'aérosol ont brûlé (environ 75 000 unités, soit 35 m³ de GPL et liquides inflammables), les installations électriques et le système de détection incendie sont hors service. Une des cheminées et la toiture sont endommagées. Les eaux d'extinction contenues dans les rétentions de l'établissement, n'ont pas engendré de pollution.

La production qui n'a été interrompue que pendant le sinistre, est évacuée vers le 2ème site de l'usine.

L'ORIGINE, LES CAUSES ET LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT

Un chariot élévateur de type ordinaire évoluait dans un local de stockage fortement rempli. Le gaz propulseur des générateurs étant soit un mélange propane butane, soit de l'hydrofluoroalcane, ce chariot aurait du être adapté au risque d'atmosphère explosive. Si l'origine exacte du départ de feu est inconnue, plusieurs hypothèses sont envisagées :

Le chariot aurait heurté et endommagé une palette provoquant la chute d'une bombe aérosol.

Des générateurs d'aérosols défectueux auraient présenté des fuites.

L'exploitant n'avait pas détecté d'odeur permettant de suspecter une atmosphère explosive.

LES SUITES DONNEES

L'exploitant n'est pas en mesure d'indiquer les natures et quantités de générateurs d'aérosols stockés. Un arrêté préfectoral de mesures d'urgence, pris le 22 juillet, impose le maintien de l'installation sinistrée en sécurité permanente, l'évacuation des déchets, ainsi que des eaux polluées et la tenue permanente d'un état précis des stocks. La remise en service des installations aura lieu sous conditions.

Une visite d'inspection approfondie a lieu le 13 août : un arrêté préfectoral de mise en demeure (31 points) et 2 arrêtés préfectoraux complémentaires (remise en service sous conditions, évaluation d'ensemble au plan des risques) sont pris. L'inspection observe de nombreuses anomalies dont :

- l'absence ou l'insuffisance de rétentions,
- l'absence de protection de récipients mobiles contre les heurts,
- la présence de clôture percée, de cul de sac, l'absence de consignes,
- l'absence de surveillance humaine permanente, de ligne téléphonique directe,
- l'absence de données concernant l'état des stocks...

Une société spécialisée évacue les eaux polluées et les déchets. Le local incendié est désaffecté.

LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS

L'usine est implantée dans les locaux d'une ancienne brasserie, le local de stockage était fortement rempli, les passages étant étroits et complexes : le local semblait peu adapté à l'activité et son évolution, 5 incendies ont ainsi eu lieu sur ce site en une quinzaine d'années.

Une vingtaine d'accidents concernant le stockage de générateurs d'aérosols sont recensés dans la base de données ARIA. Ils ont pour caractéristiques communes une propagation rapide du sinistre et un flux thermique très intense. L'inflammation se produit souvent lors de travaux de manutention ou de nettoyage, en présence de chariots élévateurs ou autres engins et d'installations électriques inadaptés. Les dangers potentiels de ce type de stockage n'ont pas été suffisamment pris en compte :

Les engins évoluant dans ce type de stockage et les installations électriques auraient dû être adaptés au risque lié à la présence éventuelle d'une atmosphère explosive.

Le local de stockage aurait dû être aménagé en conséquence et disposer notamment d'allées de circulation de largeur suffisante.

Le local de stockage aurait dû être ventilé correctement et équipé de moyens de détection efficace d'atmosphère explosive.

N° 10216 - 2/12/1996- 60 - NEUILLY-EN-THELLE

63.1 - Manutention et entreposage

Un incendie d'origine criminelle détruit la partie centrale d'un entrepôt de 4 000 m² abritant des jouets. La présence de murs coupe-feu a permis de sauvegarder le reste du bâtiment et éviter la propagation du feu aux entrepôts voisins.

N° 4599 - 15/7/1993- 76 - ROUEN

63.4 - Organisation du transport de fret

Un incendie se déclare dans un entrepôt de 3 700 m² contenant des caisses, des cartons et fûts de produits alimentaires, du matériel électrique et des meubles. 40 pompiers maîtrisent rapidement l'incendie en raison de la présence d'un mur coupe-feu. Toutefois les dégâts matériels sont importants. La structure métallique du toit est détruite, les marchandises sont endommagées par les eaux d'extinction et la chute d'éléments de la charpente.

N° 11409 - 22/6/1997- 29 - PLOZEVET

15.2 - Industrie du poisson

Un feu se déclare dans l'entrepôt de produits finis d'une conserverie de poisson. Sous l'effet de la chaleur, les boîtes de conserve explosent, libèrent leur contenu d'huile et propagent l'incendie à tout l'établissement. Seule la salle des machines abritant l'unité de réfrigération à l'ammoniac est épargnée par les flammes ; un mur coupe-feu avait été installé récemment. Les eaux d'extinction chargées d'huile sont traitées dans la STEP communale. Aucun blessé n'est à déplorer et l'environnement n'est pas atteint. L'exploitant envisage une reprise de son activité dans une ancienne conserverie (100 emplois sont concernés).

N° 14355 - 14/11/1998- 69 - SAVIGNY

24.1 - Industrie chimique de base

Dans une usine de fabrication de matières plastiques, un incendie détruit un entrepôt de stockage de produits finis en matière plastique de 1 600 m². D'abondantes fumées noires sont visibles à plusieurs kilomètres. Un mur coupe-feu a limité la progression des flammes aux ateliers, mais la structure métallique du bâtiment a souffert dans son ensemble. Aucune victime n'est à déplorer. Les dommages matériels et pertes d'exploitation sont évalués à 13 et 4 MF ; 40 employés sont en chômage technique quelques jours. La gendarmerie effectue une enquête.

N° 16540 - 22/8/1999- 19 - TULLE

15.1 - Industrie des viandes

Un incendie détruit un entrepôt de viande. La toiture et la charpente métallique sont fortement endommagées, 13 personnes sont en chômage technique. Aucune précision n'est donnée quant aux dommages éventuels subis par les installations de réfrigération. Séparé de l'établissement par un simple mur coupe-feu, un magasin de produits agricoles (solvants, etc.) et de jardinage a été protégé lors de l'intervention.

N° 21090 - 26/6/2001- 80 - ROYE

63.1 - Manutention et entreposage

Dans un entrepôt, un départ de feu est découvert à 6 h 40 dans un rack de stockage. Le personnel est évacué, les portes coupe-feu fermées et les pompiers sont appelés. Il est rapidement maîtrisé grâce au déclenchement des sprinklers (4 têtes) et l'intervention d'employés avec des RIA. Les dégâts sont limités à 10 palettes de chips et rouleaux de papier "essuie-tout" touchés par le feu et 50 mouillées par les eaux d'extinction. L'origine du sinistre est inconnue. La gendarmerie effectue une enquête.

N° 13548 - 28/1/2002- 80 - ROYE

63.1 - Manutention et entreposage

Un gigantesque incendie détruit un entrepôt d'archives comportant 2 cellules, une de 3 630 m² et 14 m de haut (5 niveaux de stockage d'archives accessibles par des passerelles) et l'autre de 1 838 m² et 8,5 m de haut, à structure métallique et séparée par un mur coupe-feu ne dépassant pas du toit. Les employés situés dans les étages détectent le début d'incendie, descendent et utilisent 8 extincteurs sans parvenir à arrêter le feu. Alertés, les pompiers pénètrent 10 min plus tard dans l'entrepôt et arrosent plusieurs foyers situés au rez-de-chaussée. Ils tentent de monter dans les étages équipés de ARI. Arrivés au premier étage après 5 min d'effort, gênés par des accès étroits, ils l'évacuent rapidement, abandonnant du matériel à l'intérieur, surpris par un embrasement soudain des stockages de papiers et constatant un fort effet de cheminée. Un important dispositif hydraulique est mis en place. Le débit des poteaux d'incendie étant insuffisant, un approvisionnement par camions est nécessaire. En 1 h, la grande cellule s'effondre, tôles déformées, structures métalliques fortement courbées. Le mur coupe-feu s'écroule peu après, emporté par la chute du toit. Les papiers sont dispersés par un fort vent (100 km/h) qui entraîne le panache de fumée vers la ville. Les flammes dépassent le bâtiment d'une hauteur équivalente à son élévation. Le rayonnement thermique est faible à 50 m au vent de l'incendie. L'incendie est encore important 24 h après et nécessitera plusieurs jours pour une maîtrise totale. Le système d'extinction automatique aurait fonctionné de façon partielle. Les causes de cet incendie sont indéterminées. Les 8 employés sont mis en chômage technique.

N° 22115 - 28/03/2002 - 10 - TORVILLIERS

21.2 - Fabrication d'articles en papier ou en carton

Lors de travaux effectués sur l'installation électrique par une entreprise extérieure, des étincelles provenant d'une meuleuse initient un violent incendie dans un entrepôt de 3 700 m² abritant plusieurs centaines de bobines de papier de toilette. L'alarme incendie se déclenche et l'ouverture des exutoires du bâtiment permet l'évacuation des fumées. La chaleur intense du feu qui se propage rapidement, entraîne l'effondrement des tôles métalliques de la toiture mais les murs résistent accomplissant leur rôle de barrière coupe-feu. La totalité des eaux d'extinction est confinée dans le bassin de rétention prévu à cet effet, une motopompe a permis la remise en circulation de ces eaux. L'exploitant met en place une surveillance pendant 24 h des bâtiments voisins pour prévenir tout départ de feu par des flammèches. Le réseau d'extinction automatique équipant le bâtiment n'a pas pu fonctionner car il était momentanément neutralisé par une autre entreprise extérieure pour la réparation de fuites détectées lors de sa mise en pression. L'absence d'un agent veillant à la sécurité générale des travaux et l'absence de moyens d'intervention incendie spécifiques mis en place lors de ces travaux ont également favorisé la survenue de ce sinistre.

N° 22457 - 18/05/2002 - 45 - SAINT-JEAN-DE-BRAYE

60.2 - Transports urbains et routiers

Un incendie se déclare dans 2 cellules et un atelier d'entretien et de réparation dans une société de transport. L'incendie n'est circonscrit qu'au bout de 5 h de lutte ce qui explique l'effondrement du mur coupe-feu 2 h entre les 2 cellules. Le mur de séparation avec les autres cellules a rempli sa fonction de stabilité, d'étanchéité aux flammes et d'isolant thermique. Plus de 5000 m² d'un entrepôt sont détruits. L'approvisionnement en eau à partir de la réserve mise à disposition par la raffinerie située à proximité se révèle déterminant dans la maîtrise du sinistre du fait du débit insuffisant délivré par le réseau public. Les 2 cellules affectées sont détruites ainsi que le matériel entreposé et les véhicules de transport présents dans l'atelier d'entretien. Une épaisse fumée noire résultant de la combustion de matériaux plastiques divers, tissus, pneumatiques conduit à l'interruption de la circulation sur la voie rapide RN 60. 3 pompiers ont les mains superficiellement brûlées. Les eaux d'extinction rejoignent le réseau d'eaux pluviales qui se prolonge par l'EGOUTIER avant rejet en LOIRE. Un barrage flottant est mis en place au niveau de l'exutoire de la LOIRE et aucune mortalité piscicole n'est observée.

N° 23265 - 11/10/2002 - 01 - OYONNAX

25.2 - Transformation des matières plastiques

Un incendie embrase vers 3 h des bâtiments de stockage dans une usine de fabrication d'articles en matières plastiques comprenant plusieurs entrepôts totalisant un volume d'environ 200 000 m³. Deux cellules de stockage de produits finis de 6 000 m² au total sont détruites. De gros moyens d'intervention, dont 12 grosses lances, sont nécessaires pour maîtriser le sinistre. Les pompiers restent en surveillance sur le site pour éviter tout nouveau départ de feu. La partie production du site a été préservée grâce à la présence de murs coupe-feu séparatifs. L'incendie qui serait d'origine criminelle, a débuté sur un stock de palettes à l'extérieur des bâtiments. L'inspection des installations classées propose la mise en place d'un dispositif d'extinction automatique dans les bâtiments non équipés.

ANNEXE 8 :
Données nécessaires à l'outil FLUMILOG

LES DONNEES D'ENTREE NECESSAIRES

L'objet de cette annexe est de décrire les paramètres nécessaires pour appliquer la méthode.

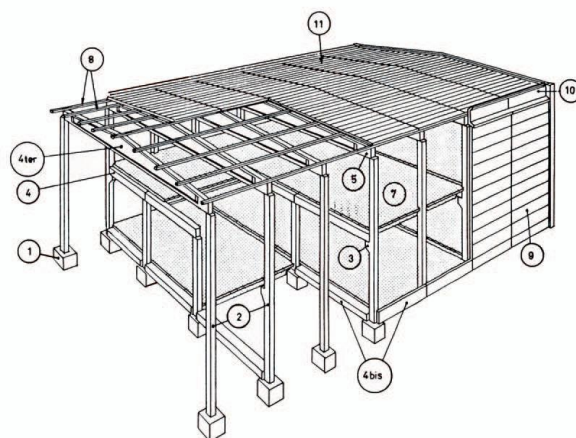
Lorsque certains de ces paramètres ne seront pas connus, des valeurs par défaut seront fournies.

Les informations nécessaires pour appliquer la méthode sont :

- Relatives à la cellule, dimensions et nature de la structure, des parois et de la toiture et leur comportement au feu
- Relatives au stockage, dimensions, nombre de niveaux et mode de stockage
- Relatives au combustible, dimensions, composition de la palette (ou des « big bags », la méthode ne traite pas de stockage en vrac)

DONNEES RELATIVES A LA CELLULE

Les différents éléments sont décrits schématiquement ci-après :



- 4 ter : poutres
2 : poteau
8 : pannes
9 : parois
11 : toiture/couverture

Figure 50 : Exemple d'éléments de structure

Les informations à obtenir pour la cellule sont listées dans le tableau suivant :

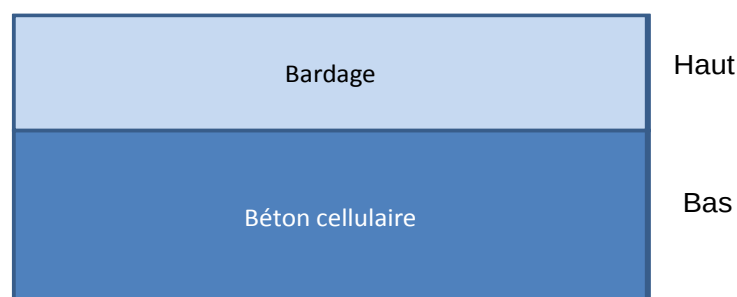
Grandeurs	Utilisation/objectif visé
Dimensions intérieures	Positionner l'incendie par rapport à l'environnement et déterminer le volume d'oxygène disponible pour la combustion au démarrage de l'incendie
largeur (m)	Largeur intérieure de la cellule
Longueur ou Profondeur (m)	Longueur intérieure de la cellule (généralement, les zones de préparation se situent aux extrémités de cette dimension)
hauteur moyenne sous-face de couverture (m)	Cette grandeur est utile pour connaître l'oxygène disponible dans la cellule. Il n'est pas utile de connaître les valeurs minimales et maximales, la valeur moyenne est suffisante.
Toiture	Déterminer d'une part la cinétique d'ouverture conduisant au passage des flammes, d'autre part le pouvoir couvrant en cas de chute sur le combustible
Poutres	Le critère R est à préciser (en minutes)
Panne	Le critère R est à préciser (en minutes). Il est supposé que c'est cette durée qui est dimensionnante car les couvertures ont généralement une résistance supérieure à celle des pannes à l'exception du fibrociment.
Couverture	Pour une dalle béton autoportante, considérer la résistance R de la dalle. Pour des panneaux béton, sans pannes, ce sont les poutres qui sont dimensionnantes. Pour les autres produits, ce sont les pannes qui sont dimensionnantes à l'exception du fibrociment qui a une résistance inférieure à celle des pannes.
Surface utile d'exutoires dans la toiture m ²	Cette valeur correspond à la surface utile d'exutoires en toiture mais également à toutes les autres surfaces de zones fragiles susceptibles de disparaître
Parois	Connaître leur capacité à jouer le rôle d'écran thermique au cours du temps Pour une paroi monocomposante , Il faut fournir le degré E d'étanchéité de la paroi, le degré I d'isolation thermique de la paroi et le degré Y de résistance au feu de son système d'attache aux poteaux.
Portiques	Poteaux en acier ou béton associés rigidement aux poutres/traverses. C'est la résistance au feu R de la structure qui est à fournir.
poteaux	acier, béton, bois : c'est la résistance au feu R qui est à fournir.
présence d'ouvertures (par exemple portes de quais)	tout type d'ouverture permettant l'arrivée d'air frais et susceptible de laisser passer un rayonnement thermique
nombre d'ouvertures	A répartir de façon simplifiée sur toute la largeur de la paroi concernée (pour une prise en compte des portes de quai)
largeur des portes	Largeur et hauteur moyenne peuvent être remplacées par la surface (pour prendre en compte des fenêtres par exemple)
hauteur des portes	

Tableau 8 : Données nécessaire pour chaque cellule

Cette méthode inclut la prise en compte d'une réduction progressive de la hauteur des parois, il est donc nécessaire que l'évolution des caractéristiques de chacune des parois puisse être déterminée en fonction du temps. Ce travail a été fait pour les différentes parois métalliques existantes à partir des résultats des essais et du REX. Lorsque ces données n'étaient pas disponibles ou pas suffisamment nombreuses, le parti a été pris de considérer de façon prudente que la paroi était effacée dès lors que le minimum des critères Y et E étaient dépassés.

Il est également possible qu'une façade soit composée de plusieurs natures de parois verticales, il est toutefois supposé que les poteaux (ou portiques) sont de même nature sur toute la façade. La figure suivante donne des exemples de configurations qui pourront être prises en compte à l'aide de la méthode dans sa version finale.

Cas 1 : paroi plus résistante en partie basse qu'en partie haute



Cas 2 : une partie de la paroi a été renforcée pour pouvoir Réduire les distances d'effet en raison par exemple de la Proximité de la limite de propriété

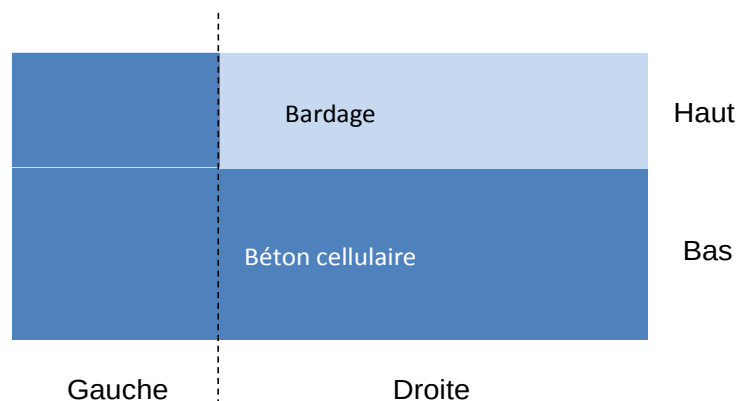


Figure 51 : Exemple de parois multi composants

Il est alors nécessaire de préciser les caractéristiques de chacune des composantes de la paroi.

Paroi verticale multi composants	Utilisation de plusieurs natures de matériaux sur la hauteur et sur la longueur afin de prendre en compte la spécificité du site Toutefois, pour des raisons constructives, seuls deux produits différents peuvent être pris en compte
Pour chaque partie	
paroi verticale	De façon générale, il faut connaître le critère E de la paroi et Y de son système d'attache.
hauteur	La hauteur peut varier par « séquence » avec des vitesses de décroissance différentes du fait de la superposition de parois de natures différentes.
largeur	Largeur de chaque élément

Tableau 9 : données nécessaires pour les parois multicomposants

Par ailleurs, il est à noter que la présence des cantons de désenfumage n'est pas prise en compte dans la mesure où les dispositions et règles de l'art imposent que la retombée reste au-dessus du stockage.

MODE DE STOCKAGE

Le mode de stockage inclut également le principe de stockage adopté par l'exploitant en considérant différemment les zones dites de préparation qui se caractérisent généralement par une hauteur de stockage plus faible que celle employée dans la zone de stockage proprement dite. Une zone est à considérer comme zone de préparation dès lors que le nombre de palettes gerbées n'excède pas 2 (hauteur maximale de 3 m environ). En effet, au-delà de 2 palettes, le stockage doit être assimilé à du stockage en masse.

Stockage	
Sens du stockage	Ceci permet de définir le sens de propagation privilégié de l'incendie dans la cellule
Dimensions	Uniquement de la partie stockage sans tenir compte du mode de stockage qui peut être différent (rack et masse par exemple) au sein d'une même cellule
longueur préparation (A) (m)	Zone située d'un côté de l'entrepôt où les palettes ne sont entreposées que sur une hauteur maximale de 2 palettes gerbées et où elles sont en transit avant mise en racks ou avant expédition
longueur préparation (B) (m)	Le cas échéant zone identique à la précédente mais située de l'autre côté de l'entrepôt
Déport latéral (α) (m)	distance entre une façade et la zone de stockage
Déport latéral (β) (m)	Grandeur identique à la valeur précédente mais pour l'autre face.
hauteur max stockage (m)	hauteur effective du stockage (partie supérieure des palettes sur le dernier niveau en rack ou en masse)

Tableau 10 : Données nécessaires pour définir le stockage

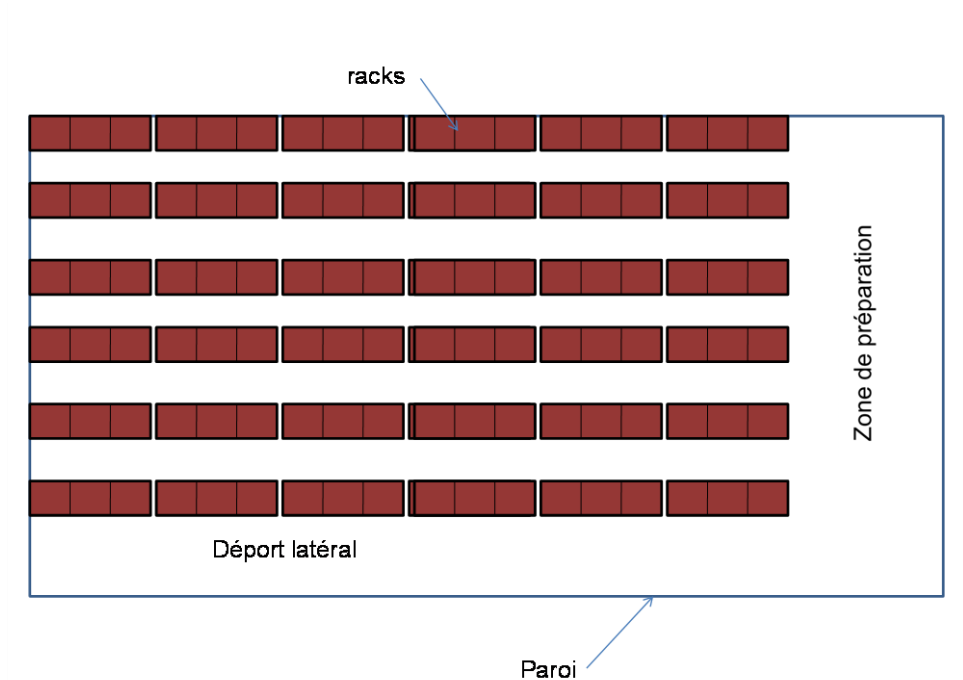


Figure 52 : Exemple d'implantation de la zone de préparation ou des déports latéraux

Pour la partie zone de stockage proprement dite, un seul mode de stockage a été considéré, le stockage en racks. Pour l'instant, le stockage en masse n'a pas été implémenté dans la méthode. Le stockage en vrac n'a pas été considéré car il n'est pas utilisé dans les entrepôts « classiques ».

Le stockage en rack se présente sous la forme d'étagères où sont disposées les palettes qui peuvent être récupérées indépendamment les unes des autres.

A titre indicatif, un stockage aéré, avec des palettes autoportantes sera à considérer comme un stockage en rack en raison de l'espace laissé entre 2 palettes.

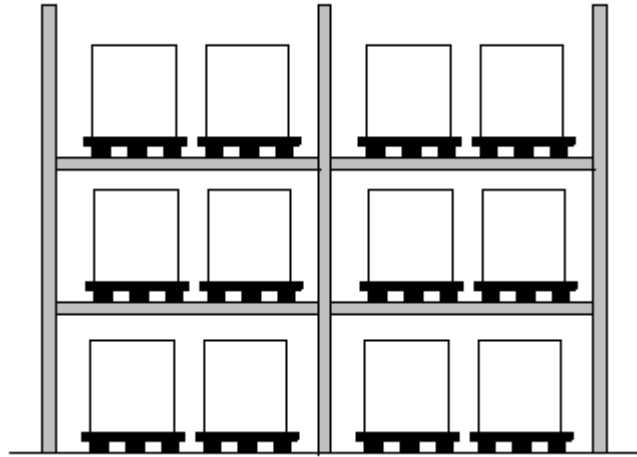


Figure 53 : stockage en racks

Mode de stockage	
Stockage en rack	Deux options sont prises en compte : simple rack ou double rack. Dans l'hypothèse d'un stockage principal par doubles racks, il est supposé que des simples racks sont présents le long des murs sauf si un déport latéral a été identifié préalablement
nombre de double racks	Dans la zone de stockage
largeur d'un double rack	Il sera supposé qu'un écart de 15 cm existe au sein d'un double rack, pour autoriser une détection rapide du feu ainsi qu'une meilleure efficacité de moyens de lutte en cas d'extinction automatique (sprinklage)
nombre de rack simples	Présents sur les bords, dans l'hypothèse où des racks simples sont utilisés dans la zone de stockage, il faut considérer les racks simples comme des doubles en conservant les dimensions enveloppes du rack simple (Nombre max de 2).
largeur d'un rack simple	-
largeur des allées	Elle a une influence notable sur la vitesse de propagation entre racks lors du démarrage de l'incendie. Si cette largeur varie au sein de la cellule, il faut considérer la valeur la plus faible car c'est celle qui favorisera la propagation.

Tableau 11 : Données nécessaire pour les conditions de stockage dans chaque cellule

Le cas d'un entrepôt à plusieurs étages (niveaux) n'est pas traité dans le cadre de la méthode car cela n'apporte pas de modification pour le dernier étage tant que le plancher est stable. Pour mémoire, la notion de niveau repose sur les caractéristiques de tenue au feu du plancher, sans présenter d'ouvertures, pour être considérés comme un obstacle à la propagation du feu.

Pour les cas de niveaux séparés par des caillebotis ou des planchers en bois, la méthode est applicable en faisant abstraction de la présence de ces éléments (caillebotis, planchers en bois). Une démarche majorante pourrait être également

appliquée dès lors que la durée de résistance au feu du plancher est dépassée. Cette démarche est majorante, car il est évident qu'une partie non négligeable du combustible situé sous le plancher ne pourra plus brûler.

COMBUSTIBLE

L'objectif de ce paragraphe est de présenter la liste des éléments qu'il faut connaître sur le combustible et donc plus particulièrement sur la composition de la (ou des) palette(s) moyenne(s) stockées dans l'entrepôt.

L'objectif de ces données est d'obtenir une image réaliste du stockage dans la cellule.

Lorsqu'il n'y a pas de procédure particulière de positionnement des palettes au sein du stockage en fonction de la composition des palettes, il est recommandé de définir une composition moyenne. Dans le cas contraire, il peut être utile de faire plusieurs calculs en se basant sur des catégories de produits différentes et d'analyser les différences observées dans les résultats.

Définition d'une palette moyenne : masse de combustibles dans la cellule divisée par le nombre de palettes

Définition d'une palette testée : dans certains cas, il peut être nécessaire de réaliser des essais pour déterminer expérimentalement la puissance dégagée par une palette moyenne, on parlera alors de palette testée.

Palette stockée	2 cas sont à prendre en compte : 1^{er} cas : cas le plus fréquent, les données relatives à la combustion d'une palette moyenne ne sont pas connues lors d'essais mais il est possible d'estimer ces valeurs à partir de la composition de cette palette et de sa compacité 2^{ème} cas : Les données relatives à la combustion de la palette sont connues à partir d'essais spécifiques, on utilisera alors les résultats obtenus sur la palette testée.
dimensions	
largeur (m)	Largeur visible depuis l'allée c'est une face qui sera supposée pyrolyser.
hauteur (m)	Hauteur totale de la palette, en intégrant le support (palette à proprement parler) en bois ou tout autre matériau
profondeur (m)	Face qui a priori ne pyrolysera pas (espace insuffisant entre les palettes)
CAS 1 : composition connue	
Composition des produits combustibles (kg)	Nature et masse de combustibles présents dans la palette (bois, PE, PVC, caoutchouc, carton,...)
Composition des incombustibles (kg)	Nature et masse d'incombustibles présents dans la palette (acier, eau,...)
masse d'une palette (kg)	Cette valeur permet d'estimer la masse volumique de la palette et d'estimer ainsi son degré de compacité.

CAS 2 : données expérimentales	Cas où les données ont été obtenues en suivant le protocole d'essai FLUMILOG (§ 5.1.2)
Composition combustible (kg)	Ces valeurs ne sont pas utilisées dans la méthode dès lors que la puissance a été déterminée expérimentalement mais elles doivent être renseignées pour figurer dans la note de calcul PDF
composition incombustibles (kg)	
masse d'une palette (kg)	
fraction résiduelle de combustible	
Rendement	Ces valeurs sont déterminées à l'aide de la courbe de puissance mesurée en fonction du temps.
Puissance surfacique dégagée par une palette (kW/m²)	
durée de combustion d'une palette (min)	
CAS 3 : Palette Rubrique	Cas où la composition de la palette n'est pas connue (ex : entrepôt en blanc)
Choix de la rubrique de la palette	Rubrique 1510, 1511 ou 2662.

Tableau 12 : données nécessaires pour la définition des produits stockés

La liste des combustibles et incombustibles intégrés par défaut dans la méthode est donnée dans le tableau ci-après :

Combustibles	Incombustibles
Bois massif	Acier
PE	Eau
Carton	Verre
PVC	Aluminium
Polystyrène	
PU	
Caoutchouc	
Pneu	
Coton	
Synthétique	
Bois palette	

Tableau 13 : Liste des combustibles et incombustibles pris en compte dans la méthode

Les caractéristiques retenues pour chacun de ces produits seront précisées au paragraphe relatif au calcul de la puissance dégagée par l'incendie d'une palette. D'autres produits peuvent être intégrés dans la méthode dès lors que les propriétés de base de ces produits sont connues.

Prise en compte de géométries particulières

Dans le cas où les cellules ne sont pas parallélépipédiques, il est possible de d'utiliser d'autres modules de l'outil. Ces outils sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

Le cas des cellules de hauteur variable

Le premier cas traité est celui des cellules présentant plusieurs hauteurs de stockage. Nous attirons l'attention sur le fait que l'on parle de stockage et pas de simples différences de hauteurs. Ceci est illustré sur la Figure 54.

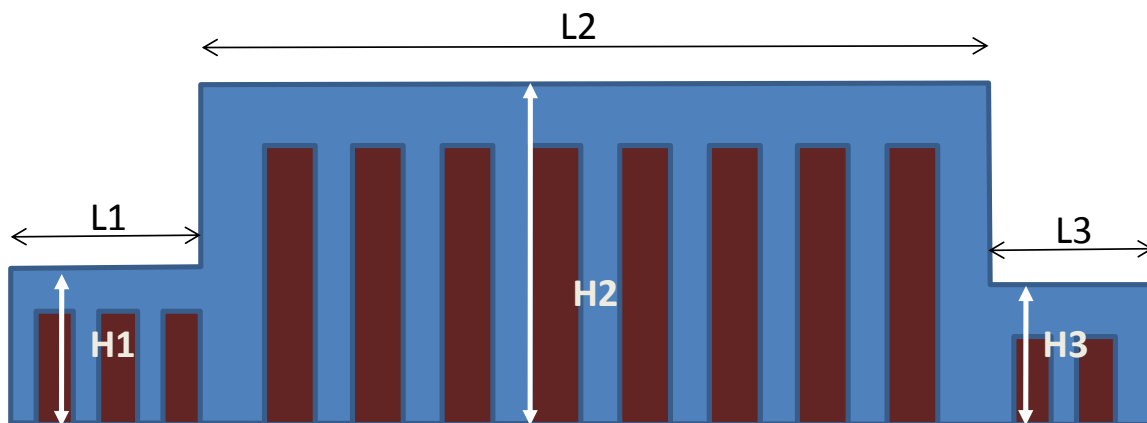


Figure 54 : représentation schématique d'un cas où il y a plusieurs hauteurs de stockage

Pour les cellules de ce type, on se ramène au cas d'une cellule rectangulaire dont :

- la longueur et la largeur seraient identiques à celles de la cellule initiale ;
- la hauteur serait calculée sur la base de la moyenne pondérée par la longueur de chaque portion : $H_{eq} = (\sum L_i H_i) / \sum L_i$;
- Il en serait de même pour la hauteur de stockage.

Comme pour les cellules classiques, la flamme est positionnée au niveau des extrémités.

Les limites de ce mode de calcul sont rappelées ci-après :

- H1 et H3 doivent être supérieures à un tiers de H2, sinon, il convient de s'interroger sur la notion de cellule pour ne pas réduire de façon trop importante la hauteur de flamme notamment pour le calcul des flux selon les longueurs.
- La somme de L1 et L3 ne doit pas dépasser un tiers de la longueur totale de la cellule
- L1 ou L3 ne doivent pas dépasser un quart de la longueur totale de la cellule

Dès lors que les 3 conditions ne sont pas respectées, il convient de revoir la notion de cellule car les parties de hauteur plus faible représentent alors une part surfacique trop importante.

Le cas des cellules qui ne sont pas rectangulaires

La méthode développée peut également être utilisée pour des cellules qui ne sont pas rectangulaires comme ceci est représenté sur le schéma suivant.

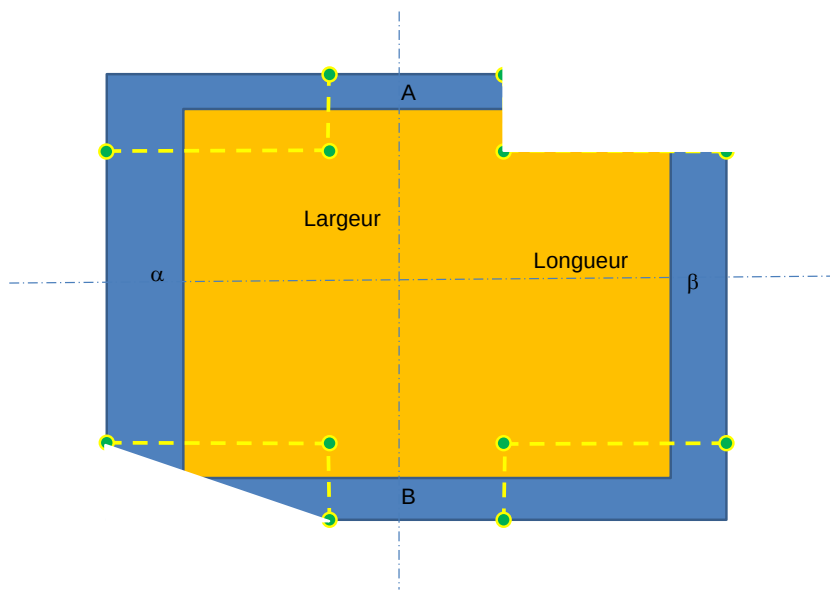


Figure 55 : exemple d'un cas de cellule non rectangulaire

L'outil développé permet de prendre en compte deux types de troncature : une coupe en biseau comme dans le coin inférieur gauche ou une découpe rentrante comme dans le coin supérieur droit.

Pour effectuer les calculs de flux, on part sur une surface de stockage réelle rectangulaire qui est utilisée pour faire tout le calcul de propagation et le calcul des caractéristiques des flammes. On utilise ces dernières caractéristiques pour calculer le flux incident.

Les limites figurant dans l'outil de calcul sont :

- Aucune ouverture dans les façades situées dans les coins,
- Sur chaque longueur, au moins une moitié restante après avoir réalisé les décrochements,
- et un décrochement maximal unitaire d'un tiers de la longueur.

Le cas des stockages extérieurs

Pour traiter le cas d'un stockage extérieur, qu'il soit en masse ou en rack, ce qui est plutôt rare pour le dernier cas, le modèle a été utilisé avec les hypothèses suivantes :

- $REI = 0$
- Résistance de la toiture égale à 1 sans recouvrement
- Les vitesses de propagation de propagation sont inchangées faute d'éléments plus précis. En effet, deux influences antagonistes ont été identifiées par rapport au cas du stockage confiné : le vent peut favoriser la propagation de l'incendie au sein du stockage mais en revanche l'absence de toiture empêche la formation d'une couche chaude et peut ainsi limiter la propagation.

***ANNEXES A à E :
Éléments du REX sur les structures***

Annexe A : Structure béton - bardage double peau

A.1. Sinistre F1

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : béton + bardage double peau métallique
- Surface sinistrée : totalité
- Durée de l'incendie : 3 h

Constatations :

- le bardage est appuyé par les racks là où la hauteur résiduelle est la plus faible
- effondrement des murs intérieurs et d'une paroi périphérique,
- hauteur résiduelle de la paroi périphérique : de 30% à 50%
- largeur de recouvrement : 30% de la hauteur de paroi.





Annexe B : Structure béton - paroi béton

B.1.Sinistre F2

- Surface de l'entrepôt : 2000 m²
- Structure : béton
- Surface sinistrée : 2 000m²
- Durée de l'incendie : 4 h

Constatations :

- défaillance de certaines fixations paroi/structure,
- effacement de certaines parois - comportement des façades où les poteaux sont restés : défaillance de certaines fixations.



Annexe C : Structure acier - paroi en parpaings

C.1.Sinistre F3

- Surface de l'entrepôt : 800 m²
- Structure : métallique avec remplissage par parpaings
- Surface sinistrée : 800 m²
- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- effacement des parois : de 0% à 20%,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : effondrement vers l'intérieur de la maçonnerie.



C.2.Sinistre F4

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + remplissage parpaings
- Surface sinistrée : totalité

- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- effacement des parois : 10% (façade en parpaings détruite par le service de secours),
- comportement des façades: stable.





Annexe D : Structure acier - bardage simple peau

D.1.Sinistre F5

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + bardage
- Surface sinistrée : inconnue
- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- hauteur résiduelle des parois : de 30% à 90%,
- largeur de recouvrement : 40% de la hauteur des parois ,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : inconnu.



D.2.Sinistre F6

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + bardage
- Surface sinistrée : inconnue
- Durée de l'incendie : inconnue

Constations :

- hauteur résiduelle des parois : de 20% à 70%,
- largeur de recouvrement : inconnu,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : effondrement total.



D.3.Sinistre F7

- Surface de l'entrepôt : 12000 m²
- Structure : métallique, bardage en périphérie, toiture avec poutres treillis
- Surface sinistrée : 12000 m²
- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- fortes variations des dégâts d'une zone à l'autre, déblaiement des façades par les pompiers,
- hauteur résiduelle des parois : de 50% à 75%,
- largeur de recouvrement : 30 % de la hauteur des parois,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : inconnu.





D.4.Face au risque - 372

- Surface de l'entrepôt : 6000 m²
- Structure : acier + bardage
- Surface sinistrée : 6000 m²
- Durée de l'incendie : 5 h

Constations :

- hauteur résiduelle des parois : 50%
- largeur de recouvrement : inconnu



D.5.Face au risque - 387

- Surface de l'entrepôt : 4000 m²
 - Structure : acier + bardage
 - Surface sinistrée : 4000 m²
 - Durée de l'incendie : 5 h
-
- hauteur résiduelle des parois : 50%
 - largeur de recouvrement : 25% de la hauteur des parois



Annexe E : structure acier - bardage double peau

E.1. Face au risque - 359

- Surface de l'entrepôt : 6000 m²
- Structure : métallique + bardage double peau
- Surface sinistrée : 3000 m²
- Durée de l'incendie : 3 h

Constations :

- hauteur résiduelle des parois : de 40% à 70%
- largeur de recouvrement : 20% de la hauteur des parois



E.2.Sinistre F8

- Surface de l'entrepôt : inconnu
 - Structure : métallique + bardage double peau
 - Surface sinistrée : inconnu
 - Durée de l'incendie : inconnu
-
- hauteur résiduelle des parois : 50%
 - largeur de recouvrement : 30% de la hauteur des parois





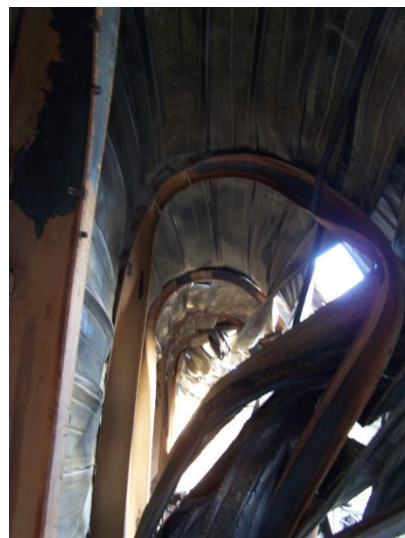
E.3.Sinistre F9

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + bardage
- Surface sinistrée : inconnue
- Durée de l'incendie : inconnue

Constations :

- hauteur résiduelle des parois : de 25% à 80%,
- largeur de recouvrement : 25% de la hauteur des parois,
- comportement des façades où les poteaux sont restés :







INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - **Internet :** <http://www.ineris.fr>