

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

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
1.1 Contexte.....	3
1.2 Organisation du document .....	3
<b>2. ACCIDENTOLOGIE : DESCRIPTIF D'ACCIDENTS CARACTERISTIQUES ..</b>	<b>5</b>
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	
<b>3. DESCRIPTION DE LA METHODE ANTERIEURE.....</b>	<b>11</b>
<b>4. PRESENTATION DE LA METHODE FLUMILOG.....</b>	<b>13</b>
4.1 Domaine d'application .....	13
4.2 Les grandes étapes de la méthode .....	15
<b>5. DESCRIPTION DE LA METHODE FLUMILOG .....</b>	<b>19</b>
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
<b>6. COMPARAISONS AVEC L'EXPERIMENTAL .....</b>	<b>81</b>
<b>7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>85</b>
<b>8. GLOSSAIRE .....</b>	<b>87</b>
<b>9. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>89</b>
<b>10. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>91</b>

## **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 IMPLIQUÉ 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 m<sup>2</sup>. 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 600m<sup>2</sup> (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 m<sup>3</sup>/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 circonscire 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 équipe 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 m<sup>2</sup>. 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 liquides<sup>1</sup>. 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.

---

<sup>1</sup> 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/m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>) 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 m<sup>2</sup>), 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 a 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.

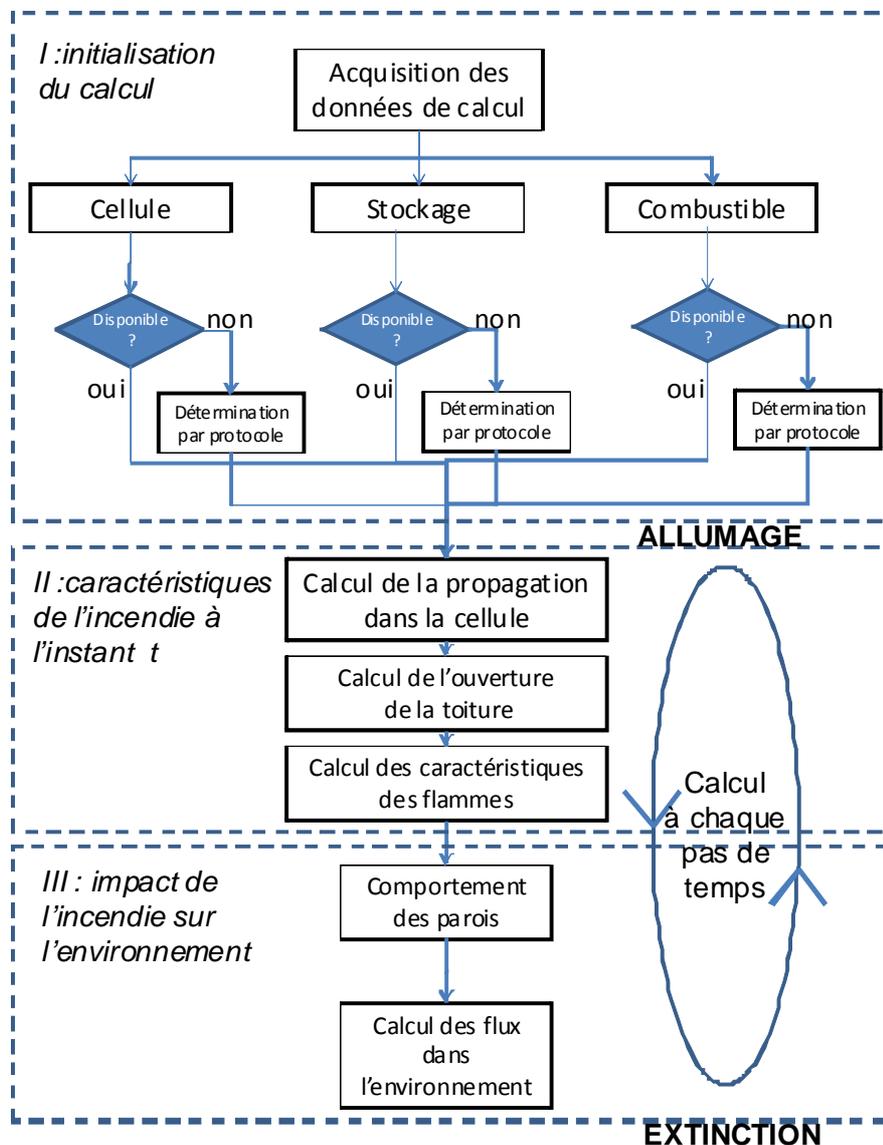


Figure 1 : principe de la méthode

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  $\eta$  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  $\Delta H_{comb\_i}$  : 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)
<b>Matières plastiques</b>		
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	
<b>Textiles</b>		
Viscose coton	18	DRA03 (CARRAU, 2000)
Synthétique	30 à 40	
<b>Denrées alimentaires</b>		
<b><u>Produits gras</u></b>		Institut International du froid, 1987
Saindoux, huiles végétales et graisses	40	
Beurre	38	
Margarine	31	
Noix	29	
<b><u>Produits à base de viande</u></b>		
Bacon	27	
Viande	25	
<b><u>Produits secs</u></b>		
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/(m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup>/s,
- sous forme divisée, des valeurs de l'ordre de 60 g/m<sup>2</sup>/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 <sup>2</sup> /s)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
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/m<sup>2</sup> s.

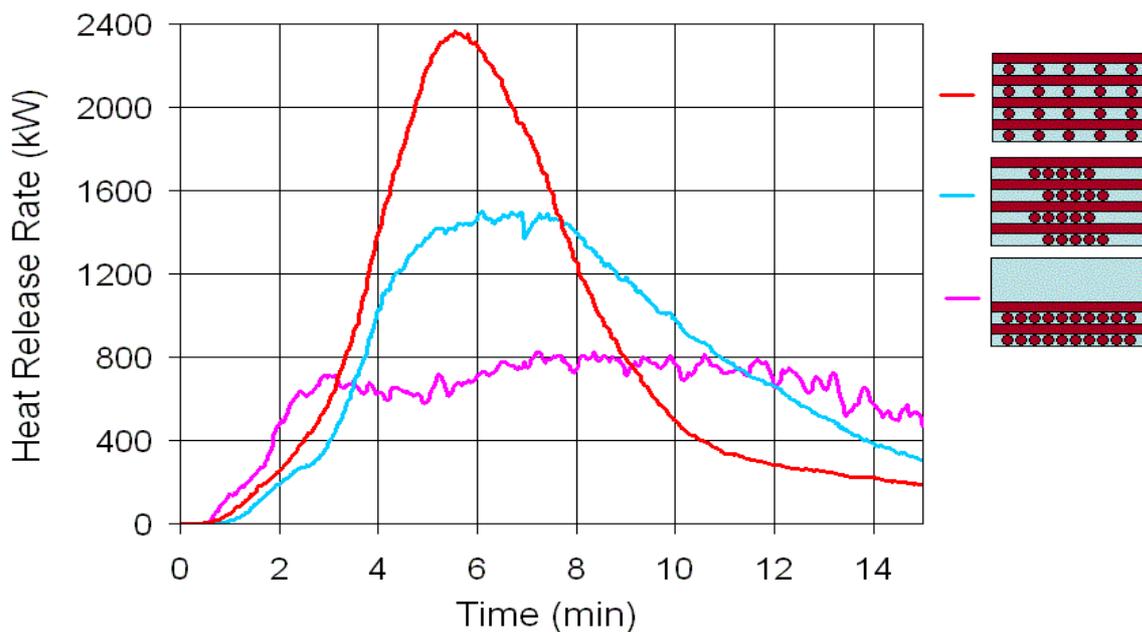


Figure 2 : Evolution de la puissance en fonction de l'arrangement des bûchettes

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.

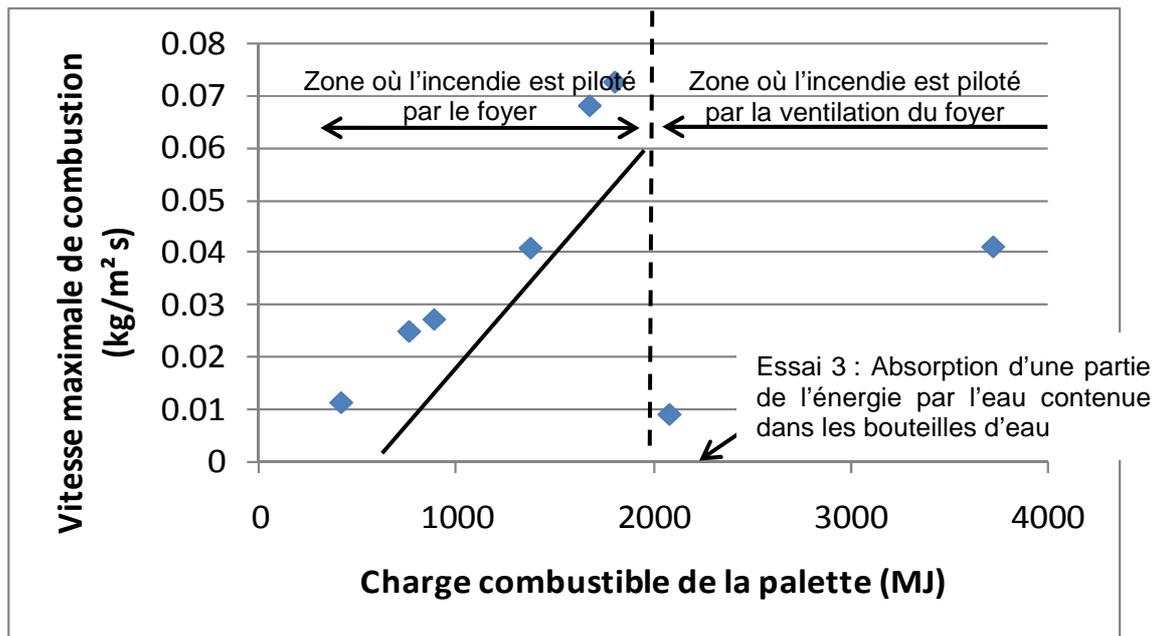


Figure 3 : Evolution de la vitesse de combustion suivant la charge combustible de la palette pour les essais à moyenne échelle

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 (m<sup>3</sup>),

$Volume_{incomb\_i}$  : Volume de chaque incombustible (m<sup>3</sup>),

$Volume\_palette$  : Volume de la palette (m<sup>3</sup>).

#### 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),

$\Delta T$  : Augmentation de température due à l'incendie (K).  $\Delta T$  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 important 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 :  $E_{absorbée} = \beta * E_{dispo}$  ;
- L'énergie absorbée est égale à une partie de l'énergie absorbable, cette partie correspond au coef d'absorption telle que :  $E_{absorbée} = \alpha * E_{absorbable}$  ;

- Un 3<sup>ème</sup> ratio « gamma » est introduit comme suit :  $\gamma = E_{dispo}/E_{absorbable}$ , d'où  $\gamma = \alpha/\beta$ ;
- $E_{finale} = E_{dispo} - E_{absorbée}$ .

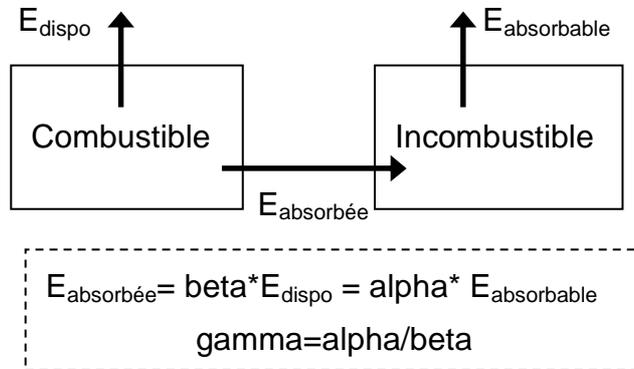


Figure 4 : Schéma explicatif du bilan énergétique sur la palette

Ensuite, les postulats sont les suivants :

- $E_{dispo} \ll E_{absorbable}$ ,  $\gamma \ll 1$  :  $\alpha = 0$  ;
- $E_{dispo} = E_{absorbable}$ ,  $\gamma = 1$  :  $\alpha = 0,5$  ;
- $E_{dispo} \gg E_{absorbable}$ ,  $\gamma \gg 1$  :  $\alpha = 1$ .

Entre ces différentes bornes, les valeurs de alpha, 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

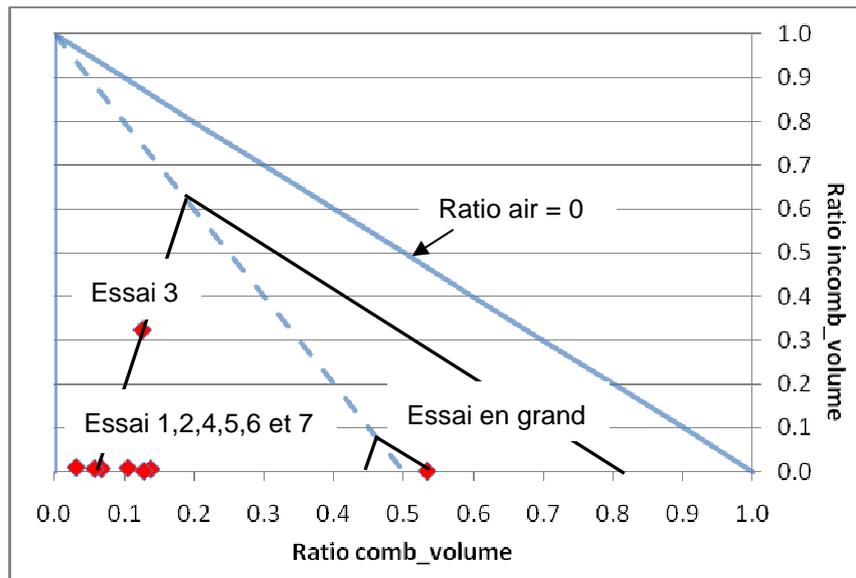


Figure 5 : Représentation des essais à moyenne et grande échelle en fonction de la fraction volumique de combustible et d'incombustible

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  $x > 0.115$

$$ratio\_pyro = -15.533 (x-y/5.565)^2 + 14.727 (x-y/5.565) - 0.487$$

$$\text{sinon } ratio\_pyro = 1$$

Ces relations sont représentées sur la Figure 6.

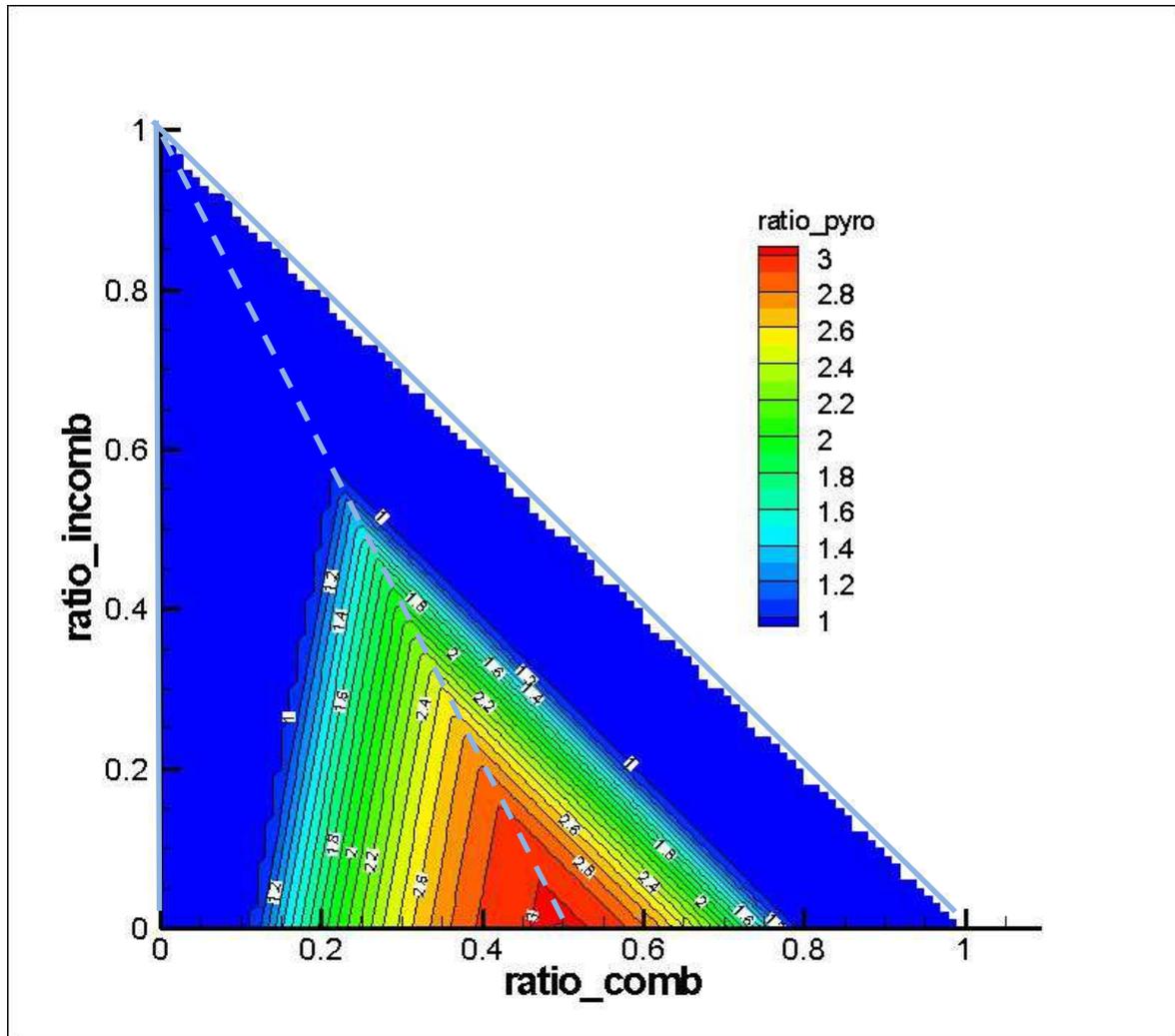


Figure 6 : Représentation du ratio\_pyro

Au final, le calcul de la puissance dégagée par la palette est corrigé par la relation suivante :

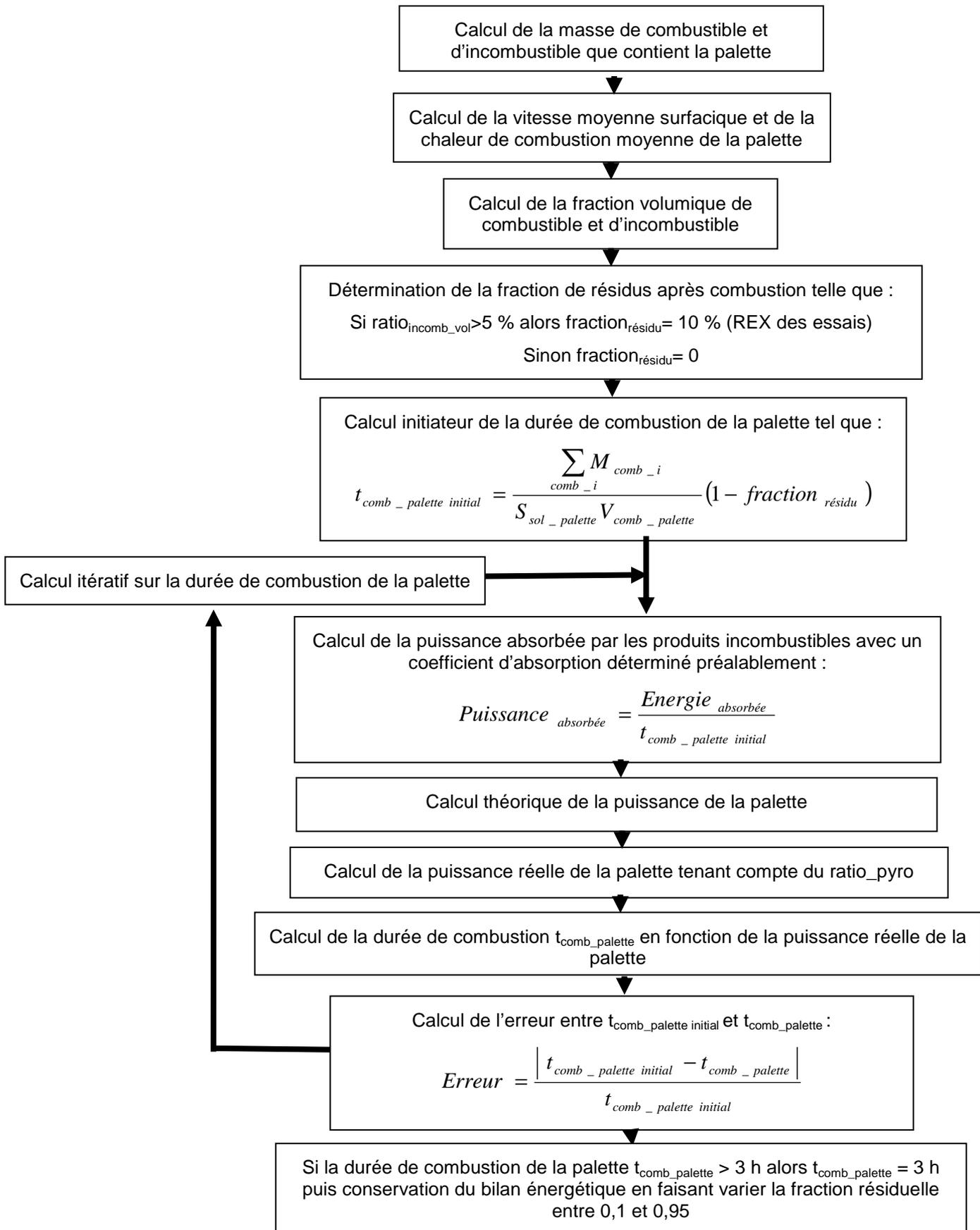
$$P_{palette\ réelle} = ratio\_pyro * P_{palette}$$

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.

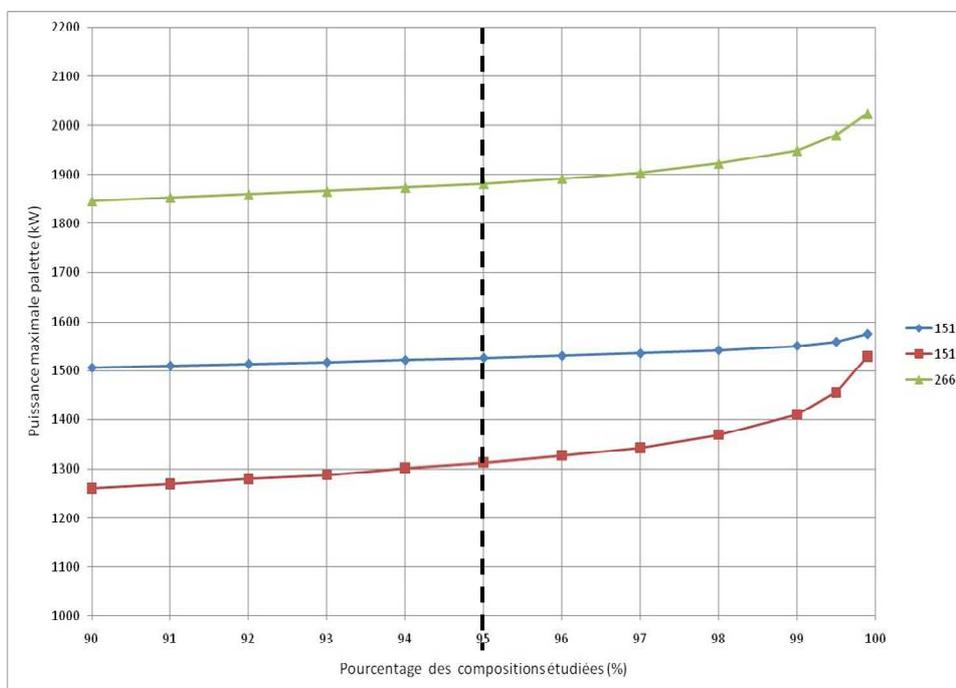


Figure 7 : Evolution de la puissance maximale de palette correspondant à un pourcentage élevé des 30000 compositions étudiées

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.

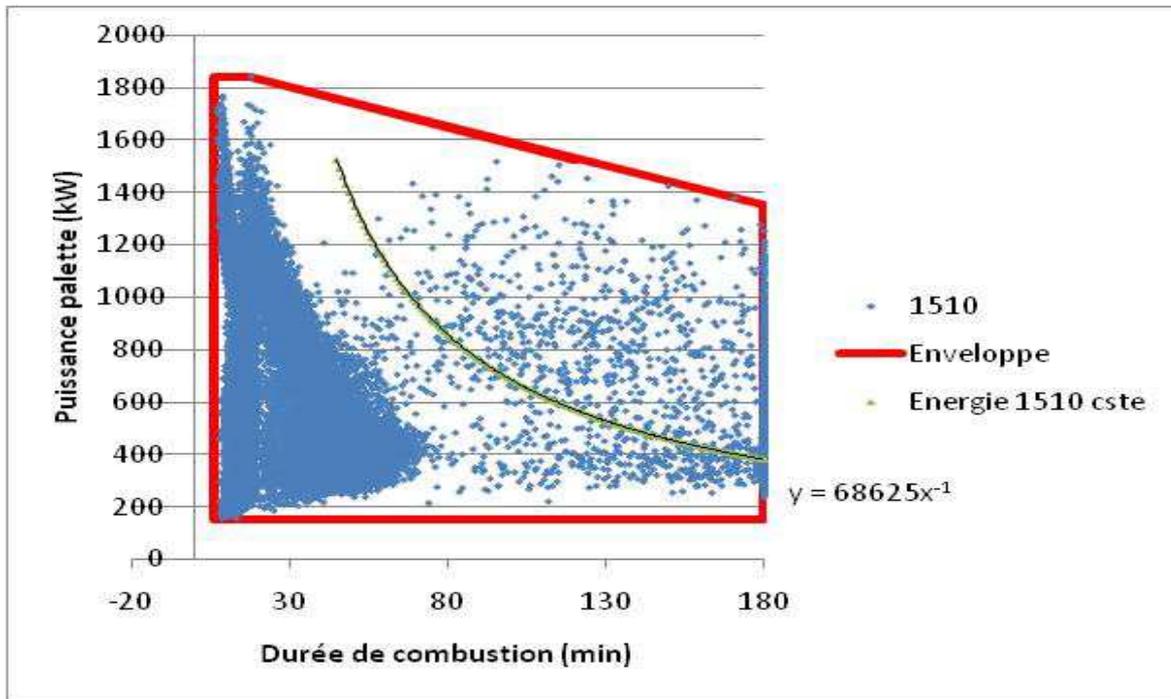


Figure 8 : Répartition de la puissance de la palette pour les 30000 compositions testées pour la rubrique 1510

#### 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 :

- $V_{prop\_horiz\_pal} = 3$  m/min
- $V_{prop\_vert\_pal} = 0,7$  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.

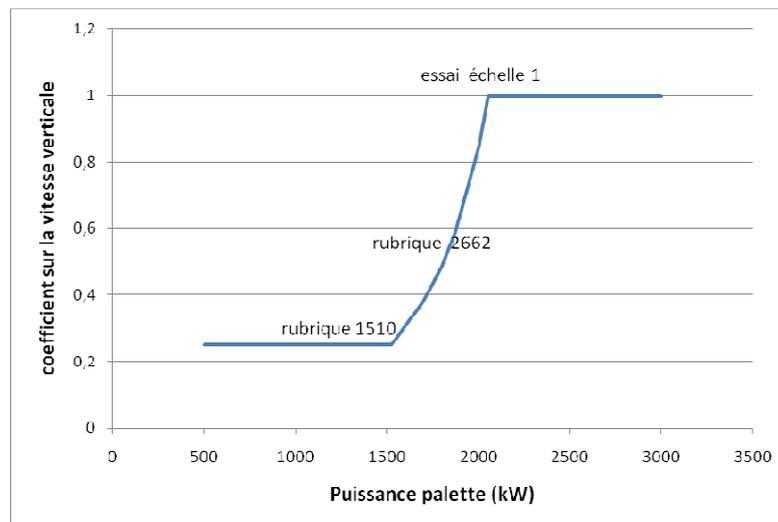


Figure 9 : Coefficient réducteur de la vitesse de propagation verticale fonction de la puissance de la palette

## 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).

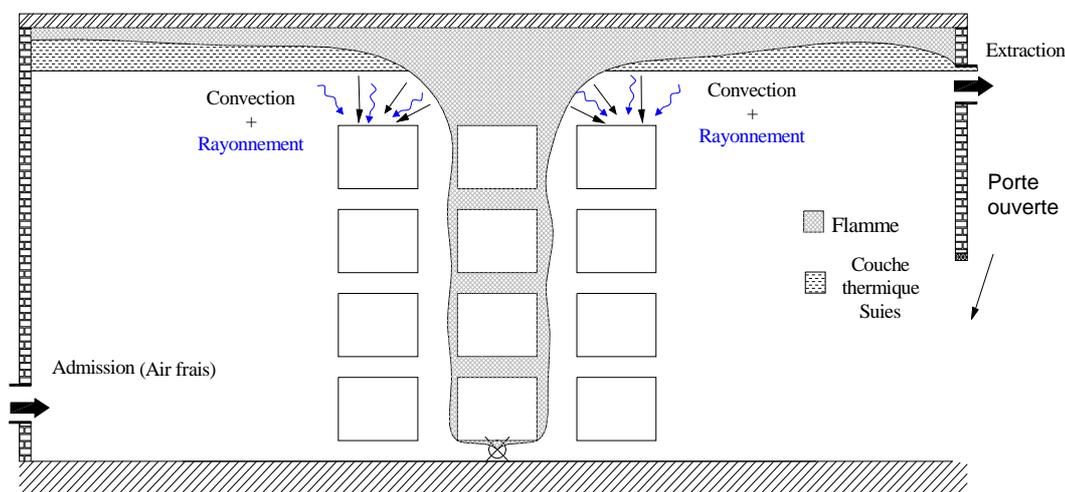


Figure 10 : Apparition de la couche chaude, influence du rayonnement et de la convection naturelle sur les racks voisins

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.

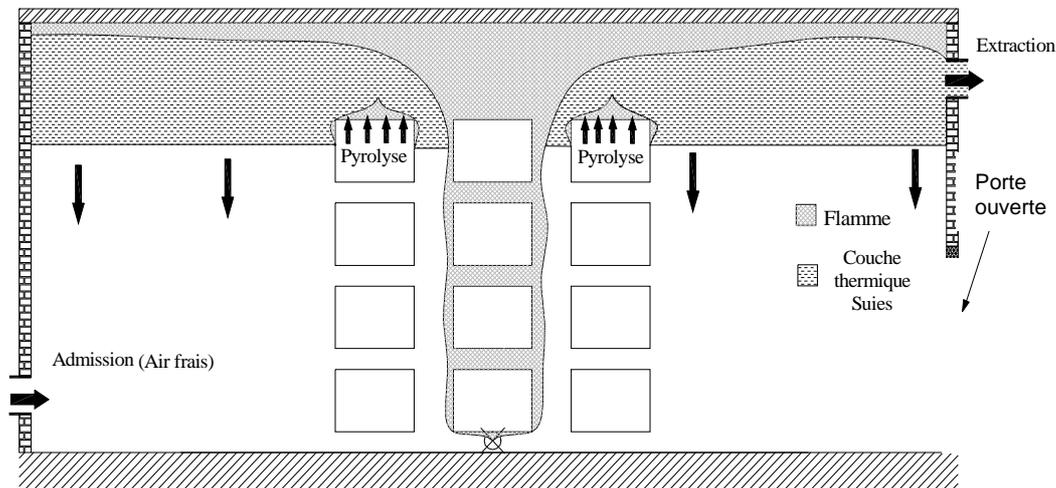


Figure 11 : Descente de la couche chaude, pyrolyse et inflammation des produits au-dessus des racks voisins

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).

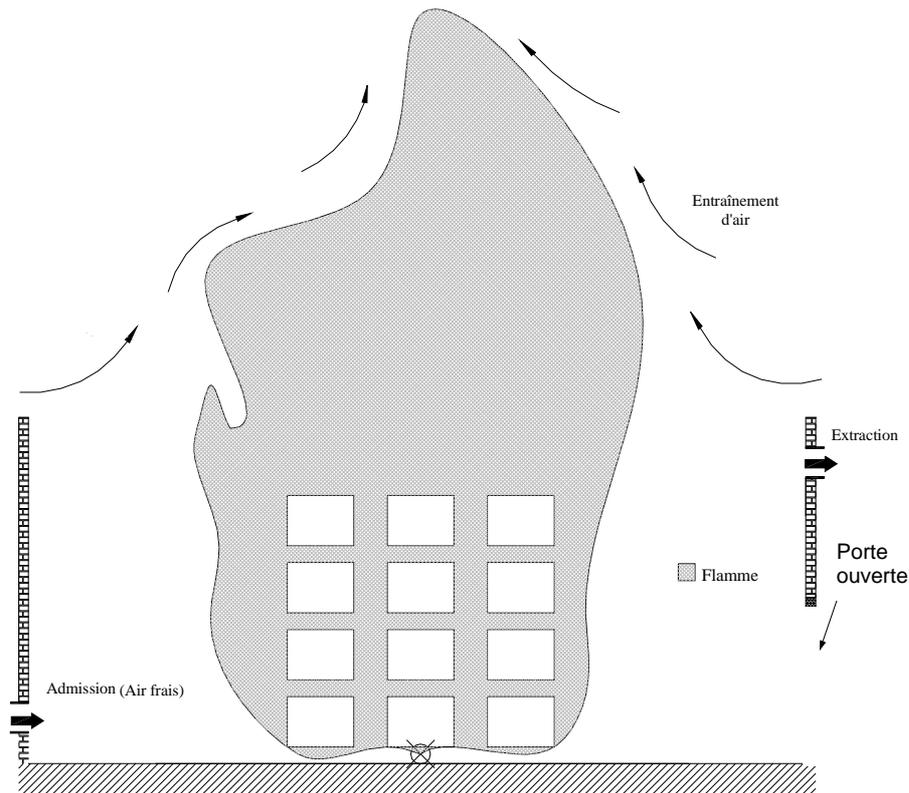


Figure 12 : Après effondrement de la toiture, feu bien ventilé

### 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 :

$$P(t) = \eta \times S_{\text{feu\_dev}}(t) \times P_{\text{rack\_surfactive}} \times \text{Coef}_{\text{ventil}} + P_{\text{ini}}$$

Où :

$P(t)$  est la puissance libérée à chaque instant,

$P_{\text{rack\_surfactive}}$  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.

$P_{\text{ini}}$  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.

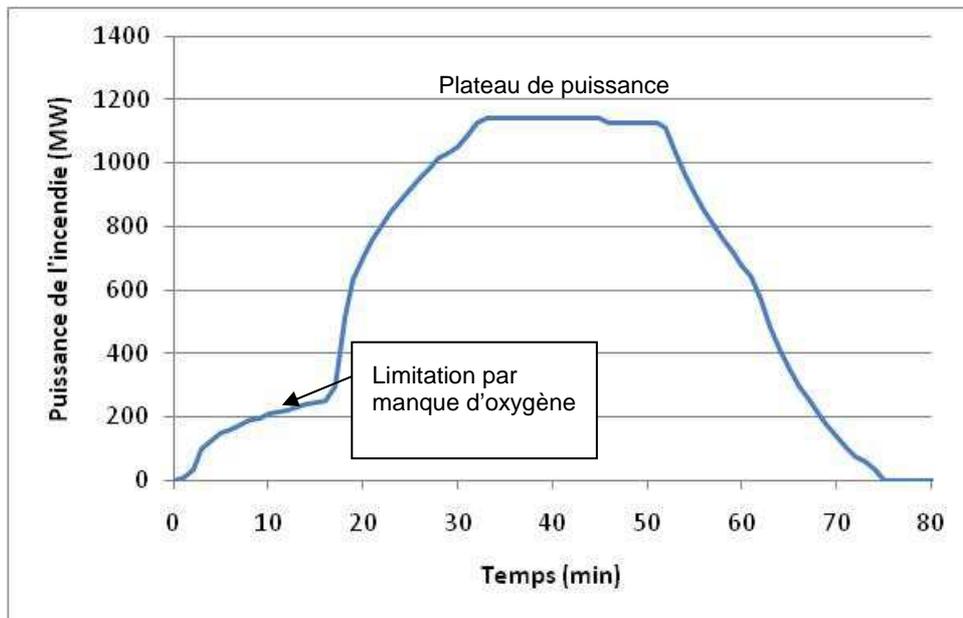


Figure 13 : Evolution calculée de la puissance pour l'essai en grand

### 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).

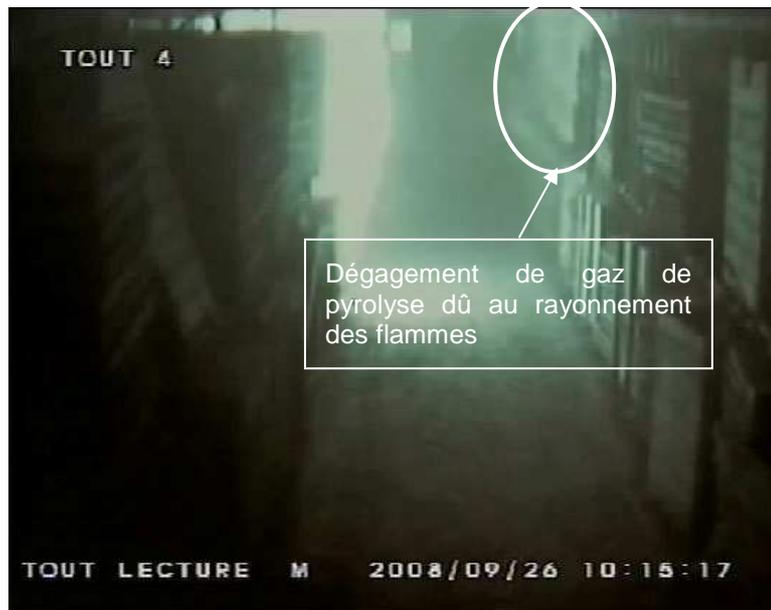


Figure 14 : Pyrolyse des palettes appartenant au rack mitoyen au rack central



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).

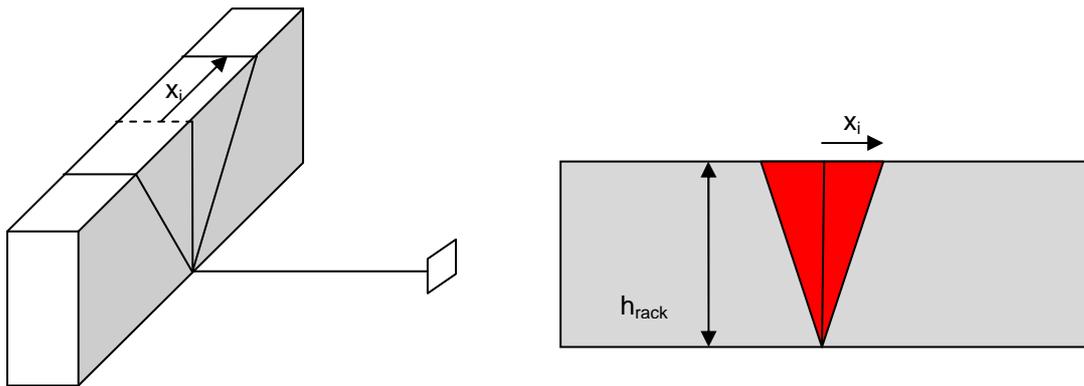


Figure 16 : Représentation schématique de la propagation par rayonnement entre rack

Ce flux est calculé en considérant une surface en feu de forme triangulaire d'une émittance de 100 kW/m<sup>2</sup>. 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/m<sup>2</sup>.

Le facteur de forme pour une surface en feu de forme triangulaire est donné par l'expression visible en Figure 17.

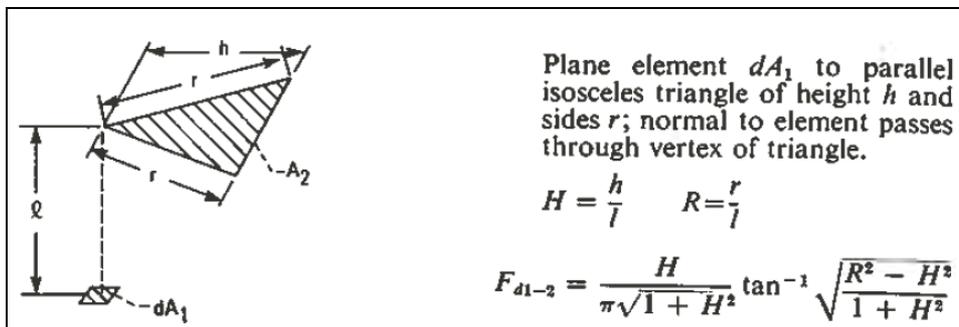


Figure 17 : Expression du facteur de vue pour une surface en feu de forme triangulaire (extrait du *Thermal Radiation Heat Transfer* (R. SIEGEL, J.R. HOWELL, 1992))

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 AFILOG 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'embrassement complet** est obtenu une fois que la phase descendante est terminée.

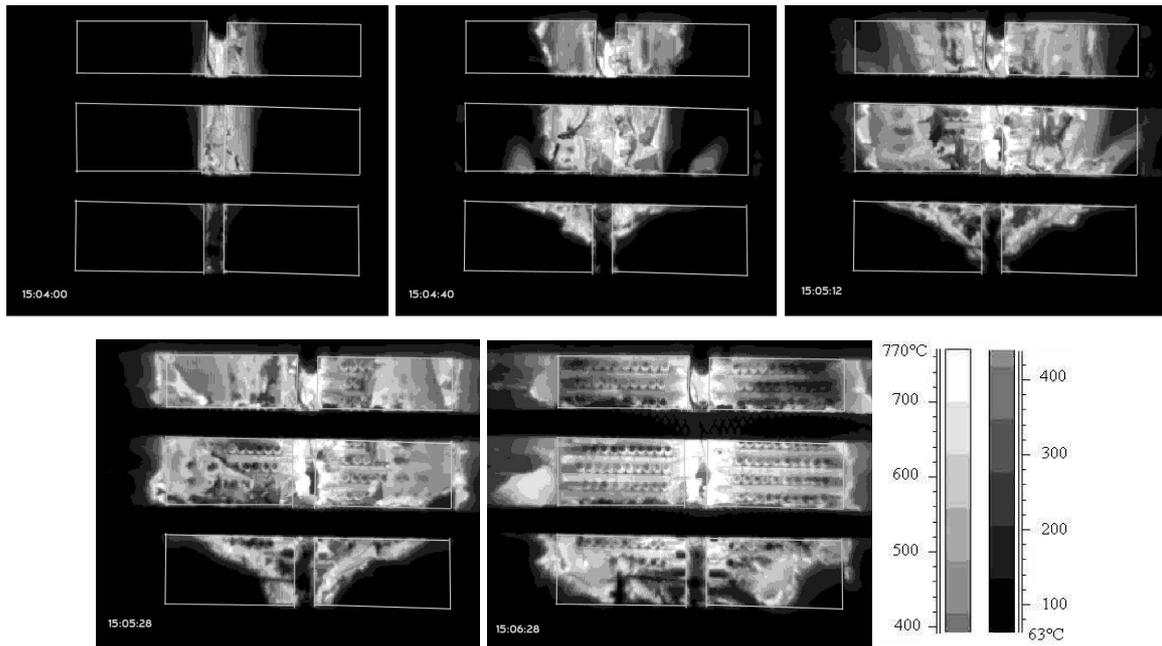


Figure 18 : Les 5 grandes phases de la propagation du feu au sein d'un rack illustrées par des images infrarouge

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).

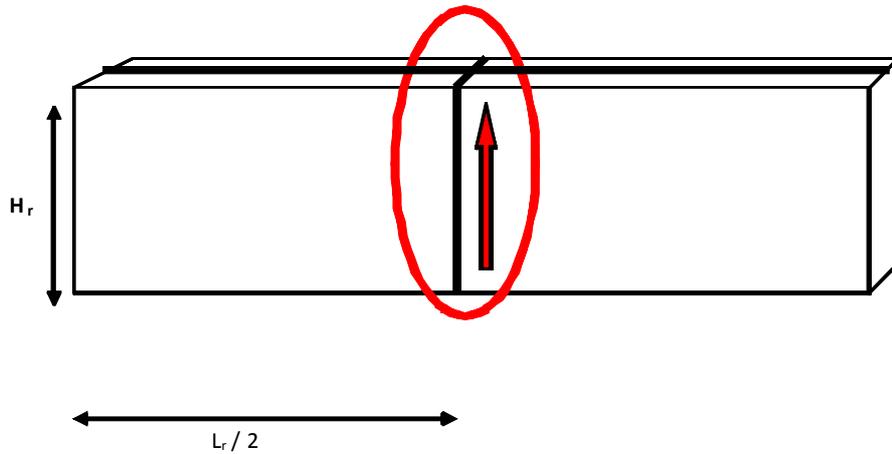


Figure 19 : Première phase de propagation dans un rack

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<sup>ème</sup> image IR de la Figure 18).

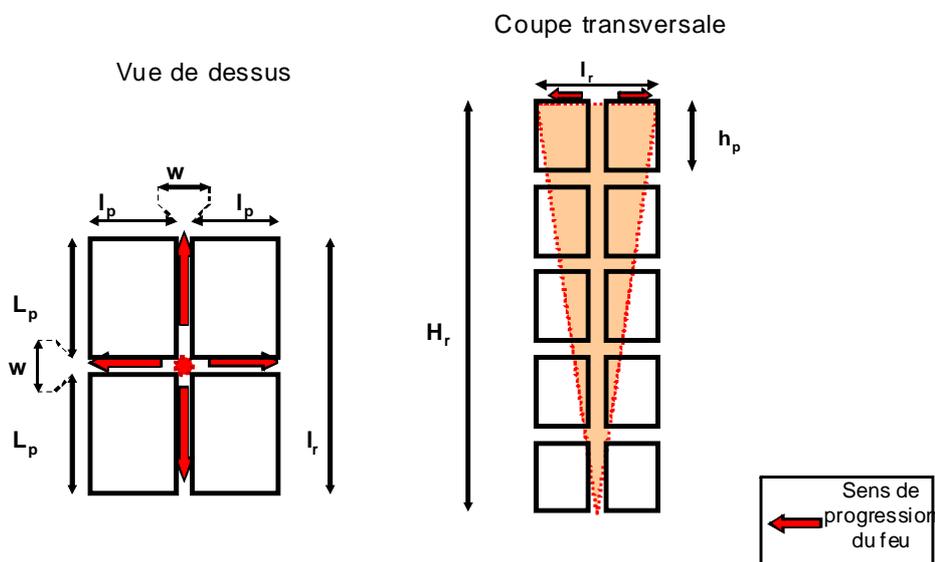


Figure 20 : Propagation en largeur dans le rack

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.

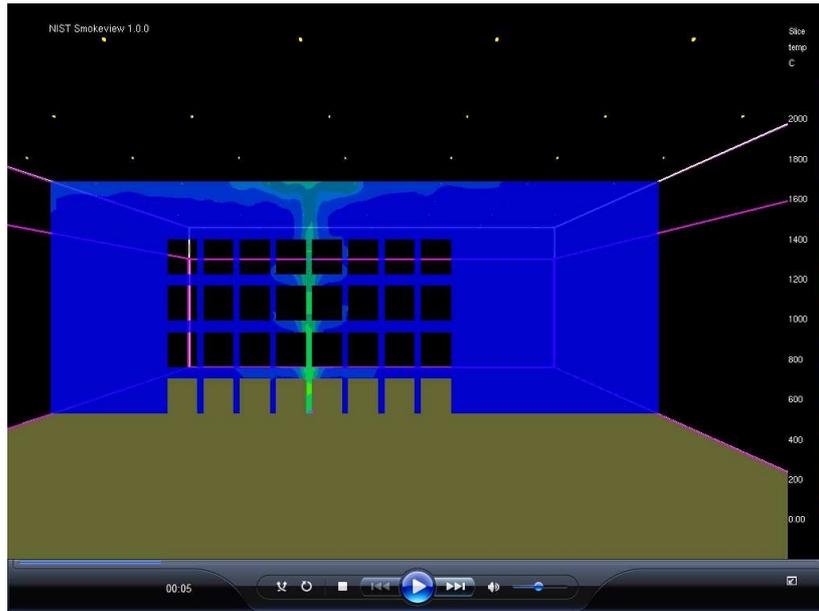


Figure 21 : Effet cheminée

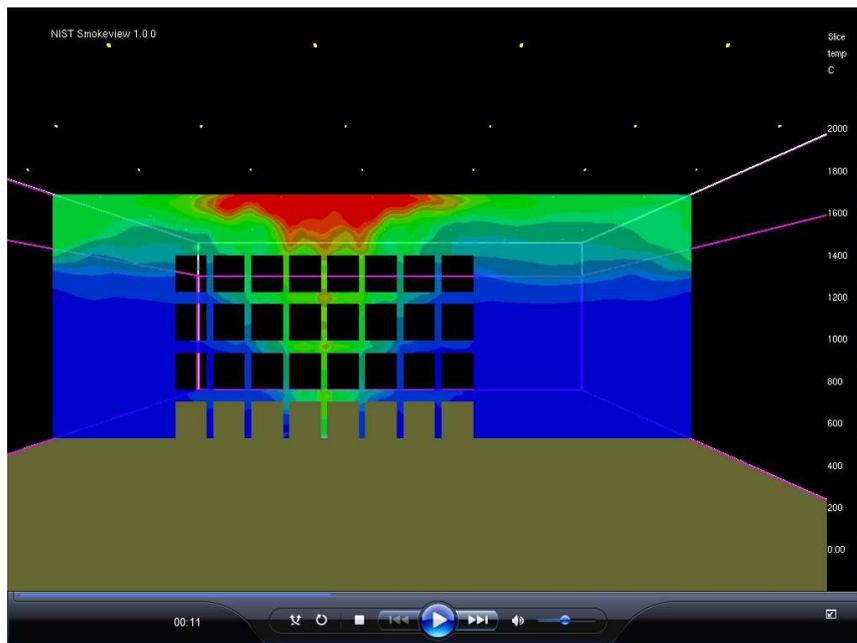


Figure 22 : Propagation en « V »

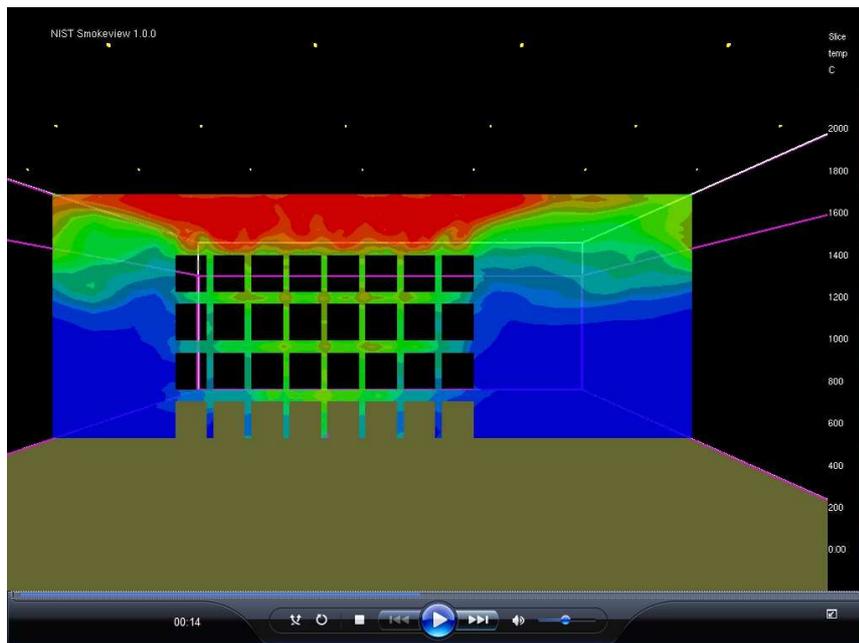


Figure 23 : Descente du feu vers le sol

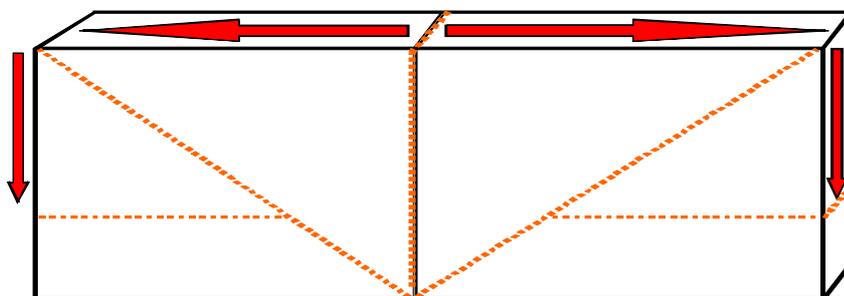


Figure 24 : Schéma de propagation dans un rack

Allumage en partie supérieure

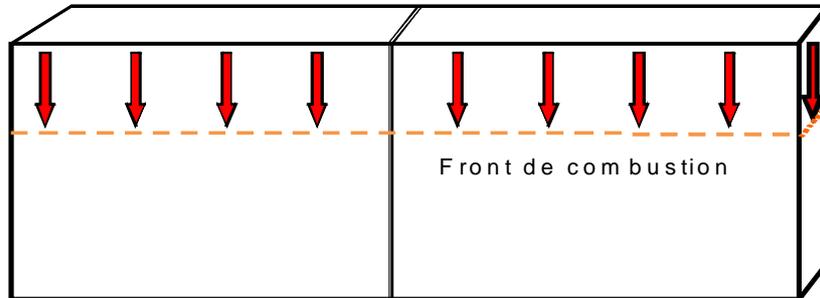


Figure 25 : Schéma de propagation dans le cas d'une propagation par flash-over

### 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 OXYGENE

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.

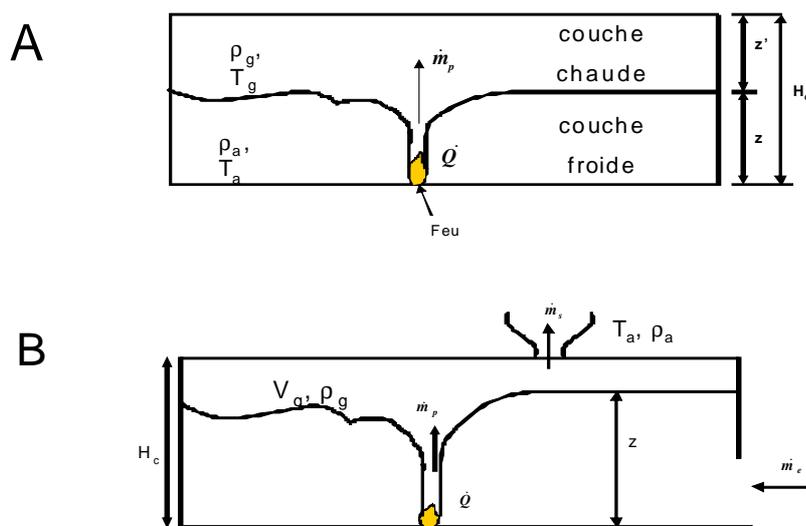


Figure 26 : Principe de combustion suivant l'intégrité de l'enveloppe

*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).

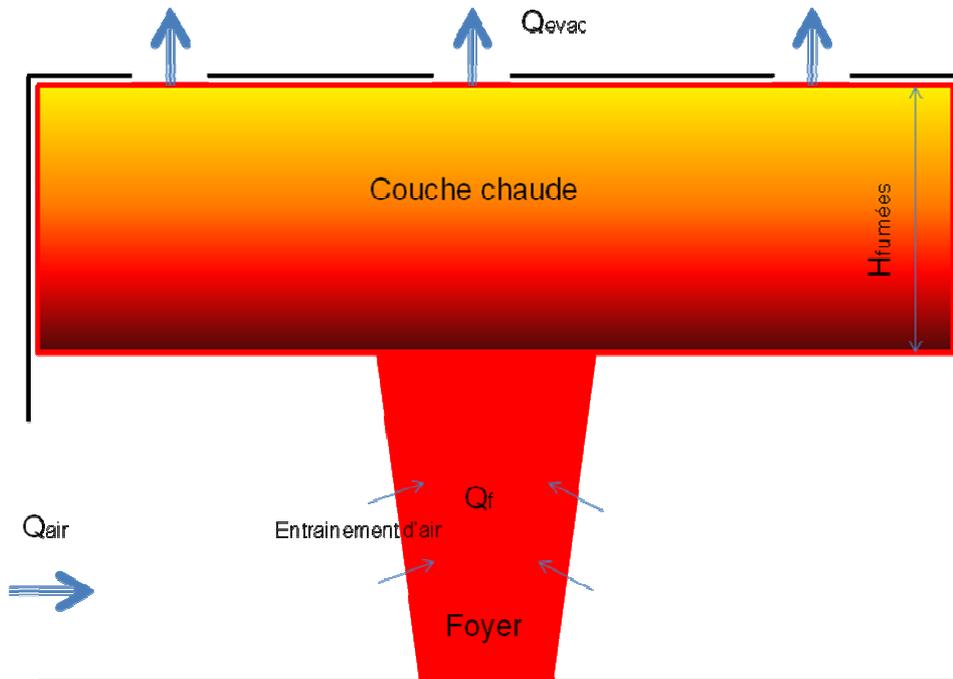


Figure 27 : Schéma du bilan sur la couche chaude

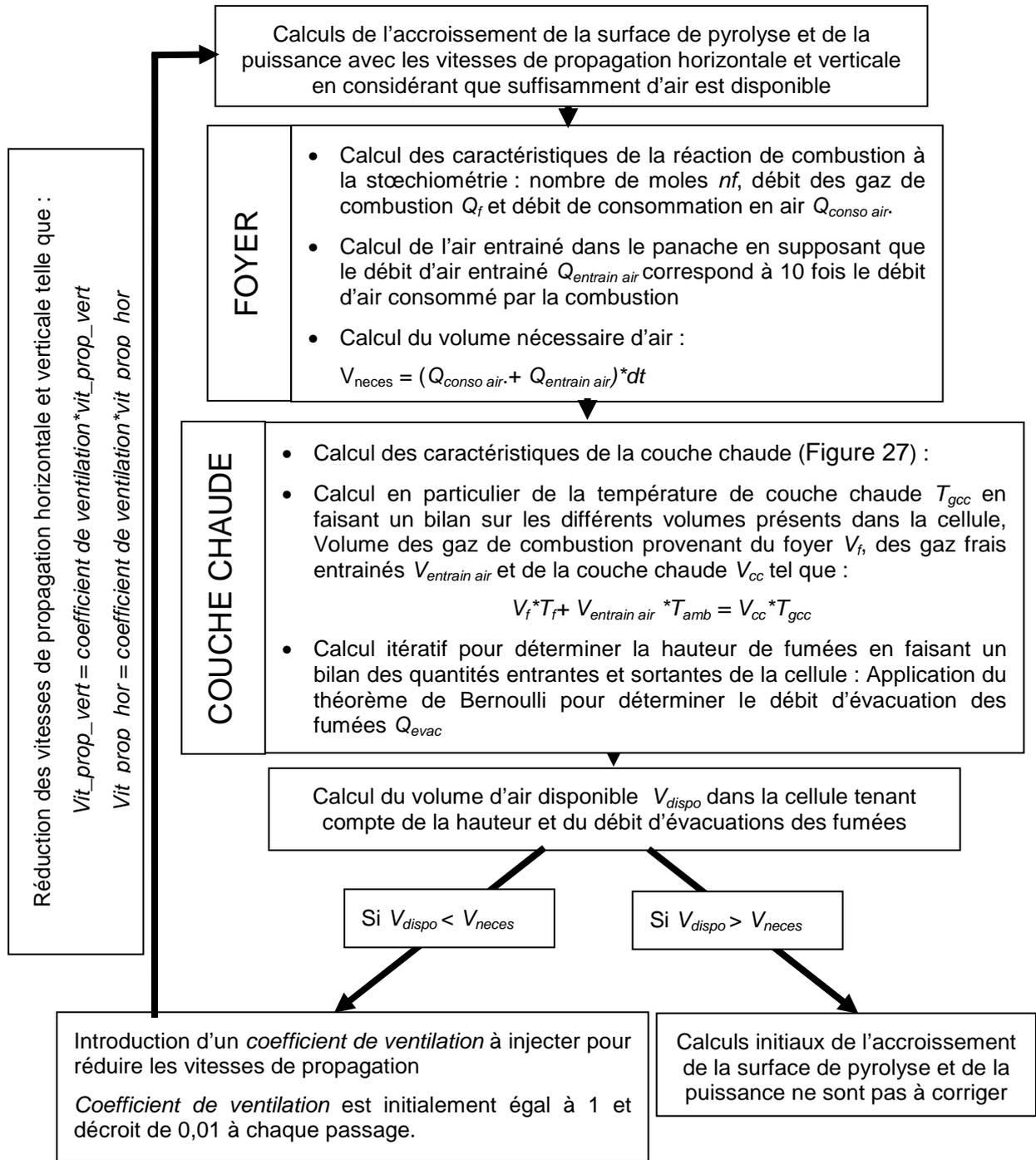


Figure 28 : Logigramme du calcul de limitation de la propagation de l'incendie en raison du manque d'oxygène

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 ( $P_{réf}$ ,  $T_{comb\_pal\_réf}$ ). 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  $Coef_{ventil}$  qui vaut :

$$Coef_{ventil} = -0,5coefficient\_de\_ventilation^2 + \frac{7}{6}coefficient\_de\_ventilation + \frac{1}{3}$$

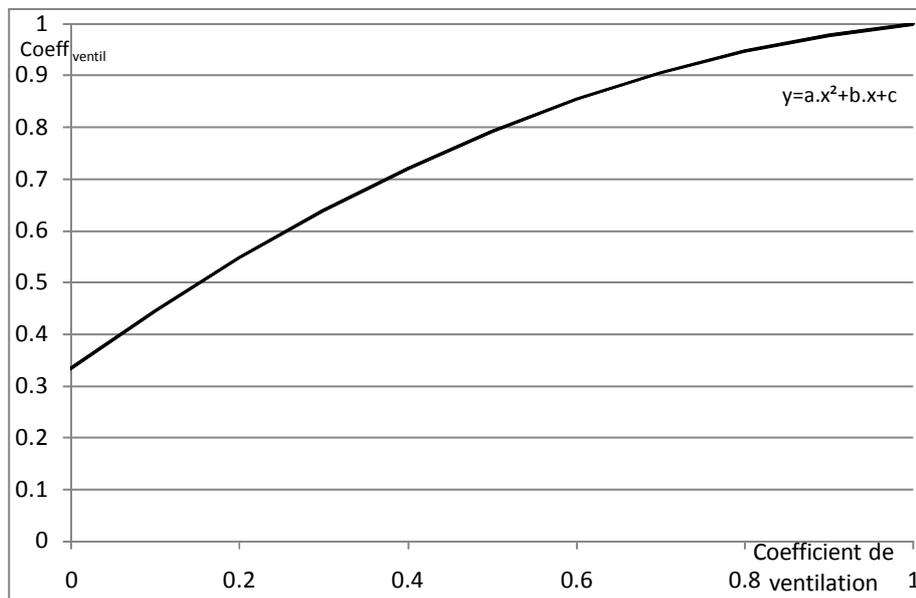


Figure 29 : Evolution du coefficient de pondération en fonction du coefficient de ventilation

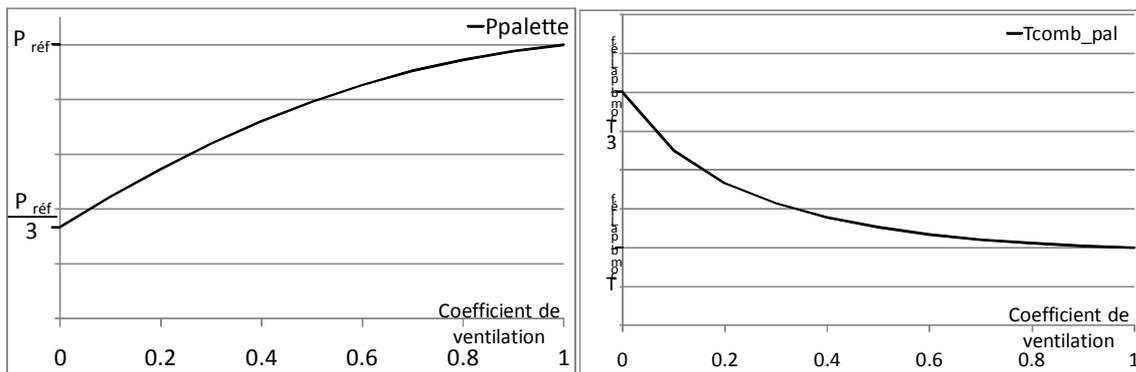


Figure 30 : Puissance libérée et temps de combustion d'une palette

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).

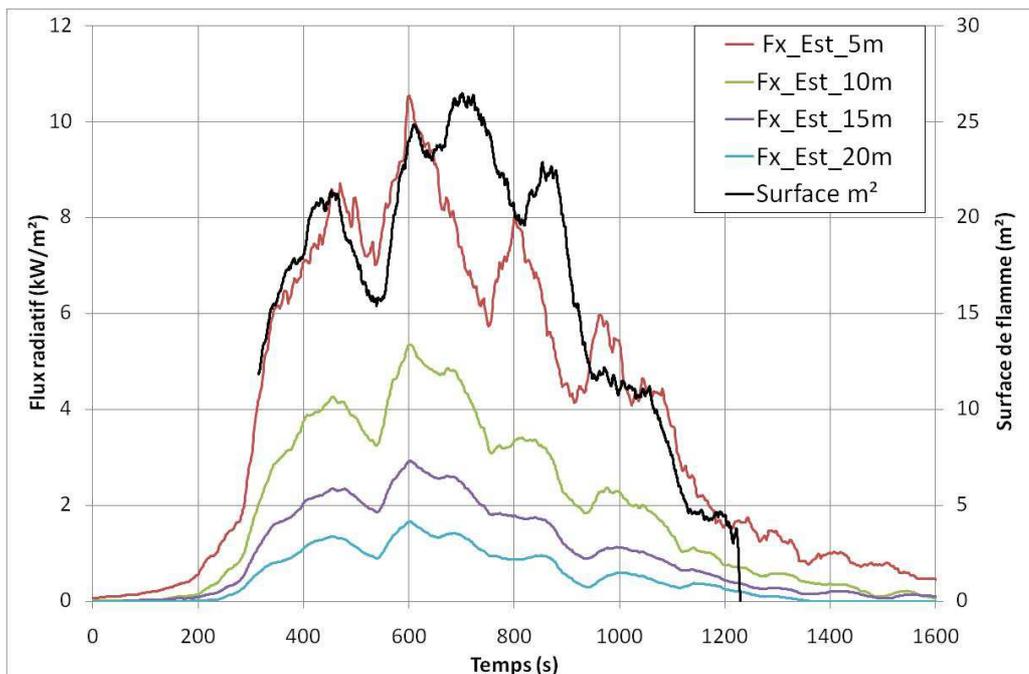


Figure 32 : Evolution du flux radiatif et de la surface de flamme au cours du temps

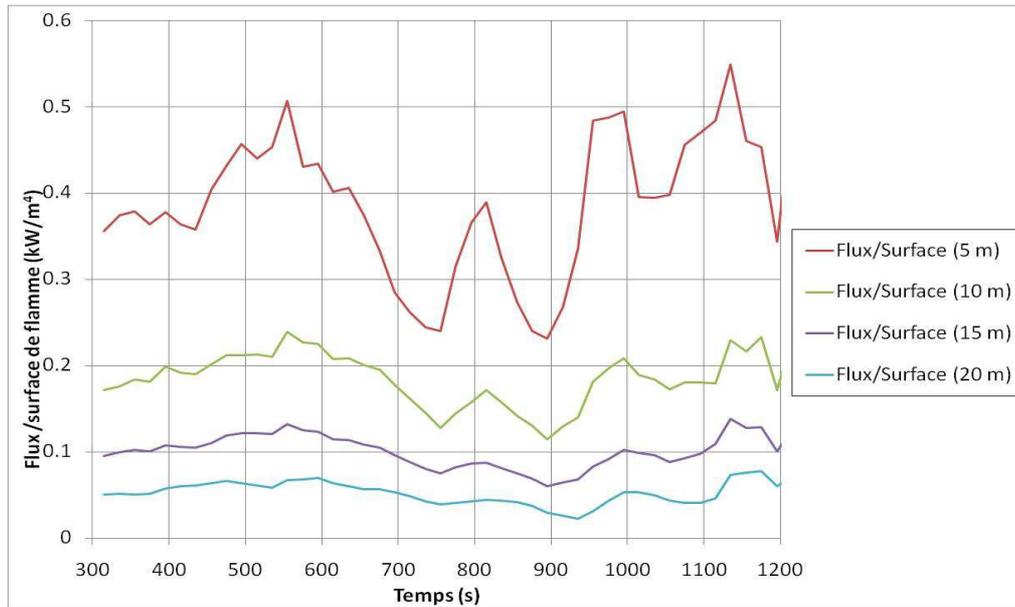


Figure 33 : Rapport Flux/surface de flamme à différentes distances

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  $\phi$  s'écrit :  $\phi = \phi_0 \tau F$

Où  $\tau$  le facteur d'atténuation atmosphérique est constant à une distance donnée,

$F$  le facteur de vue dépend de la surface de flamme,

$\phi_0$  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 m<sup>2</sup>, valeur qui correspondrait au vu des flux mesurés à une émittance moyenne de 110 kW/m<sup>2</sup>. 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.

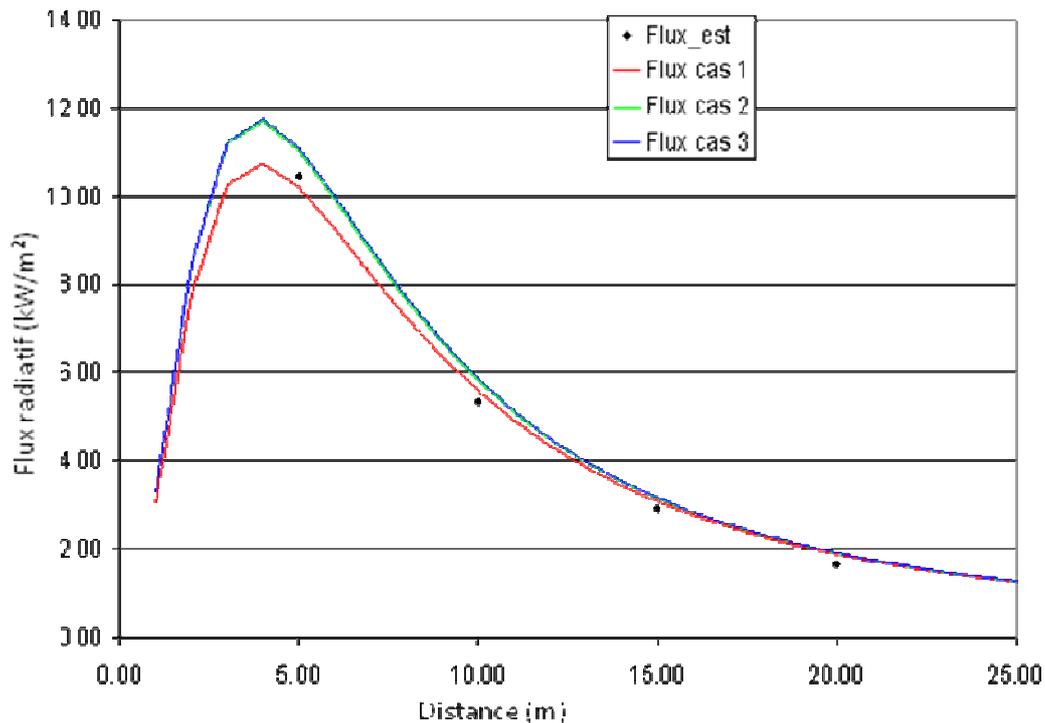


Figure 34 : Evolution des flux radiatifs modélisés pour les 3 configurations de forme de flamme

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/m<sup>2</sup>) 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/m<sup>2</sup>. La hauteur des flammes y est représentée en fonction de la taille de la nappe.

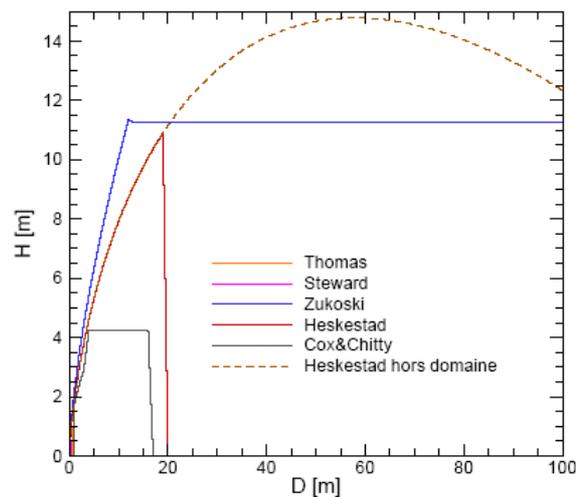


Figure 35 : Hauteurs de flamme fonction du diamètre pour les 5 corrélations étudiées

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  $\text{kW/m}^2$  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.

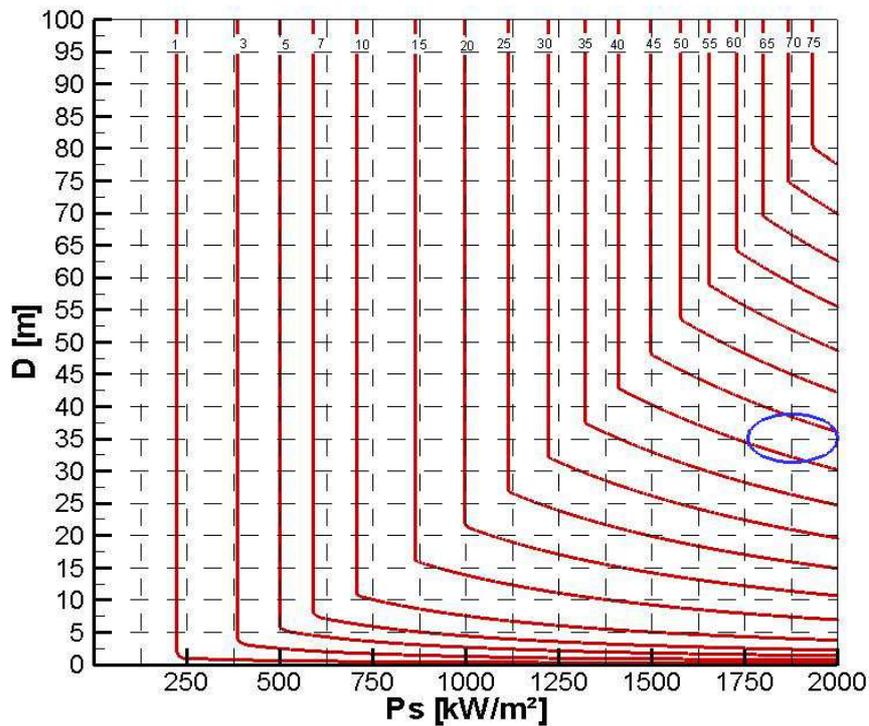


Figure 36 : Hauteur (en mètres) des flammes en fonction du diamètre de la nappe et de la puissance surfacique

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 :

$$H = Hauteur + \min(1.5 \times Hauteur; \min\left[\left(\frac{P_s}{223}\right)^2; 0.026(P_s \cdot D)^{2/3}\right])$$

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,  $\xi$ , d'une flamme en cas de vent est la corrélation de Welker et Sliepceвич (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

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

$\mu_{air}$  : viscosité dynamique de l'air ambiant ( $1.9 \times 10^{-5}$  (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>))

$u_w$  : 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.

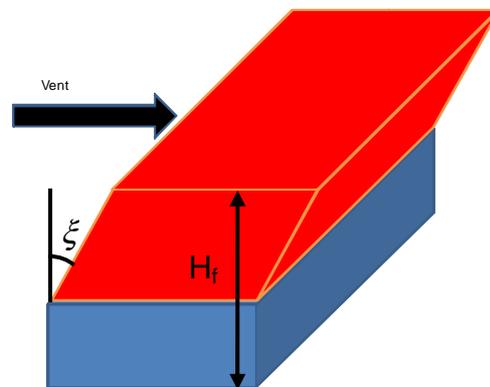


Figure 37 : Schéma de la flamme inclinée par le vent

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).

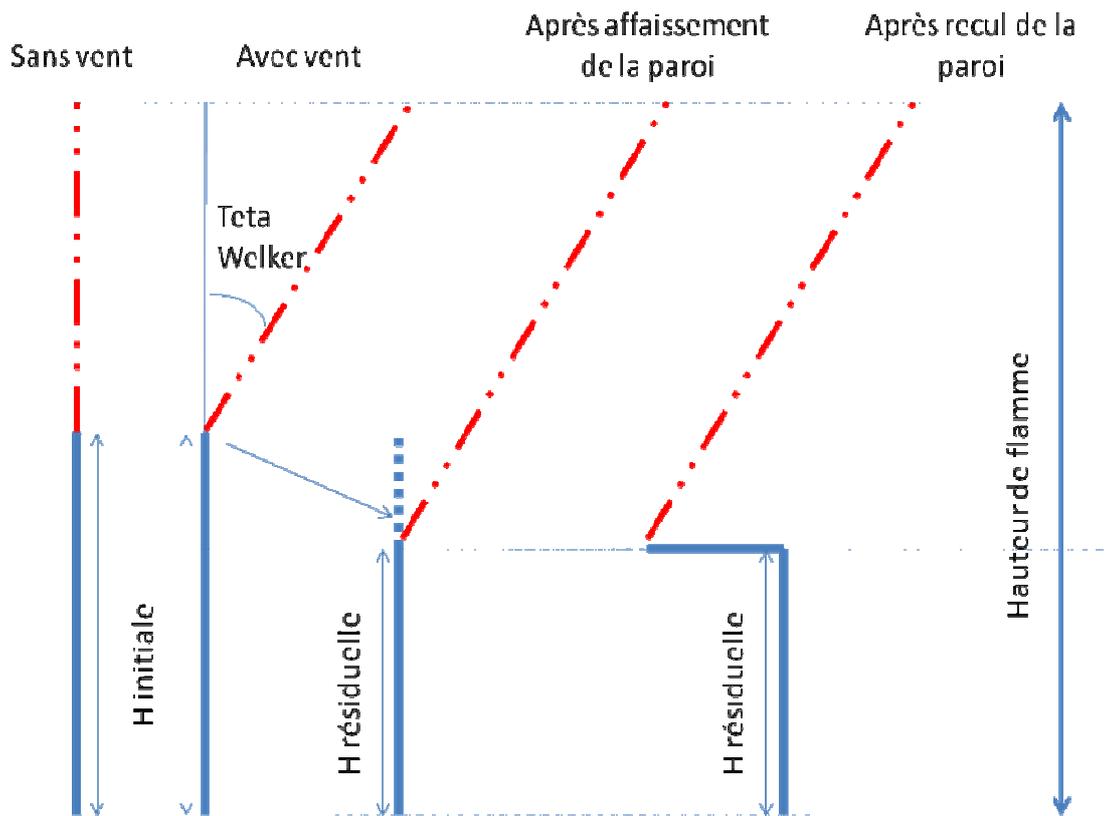


Figure 38 : Flamme soumise à différentes configurations

### 5.3.4 FRACTION RADIATIVE ET ÉMISSIONNE DES FLAMMES

La fraction radiative et l'émissionne 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 injecté ensuite pour calculer la fraction radiative du feu. La fraction radiative s'écrit alors :

$$\sigma_R = \frac{E_{moy} S_{flames}}{\dot{m}'' \Delta H_C}$$

Où la surface enveloppe de flamme  $S_{flames} = \pi D H$  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.

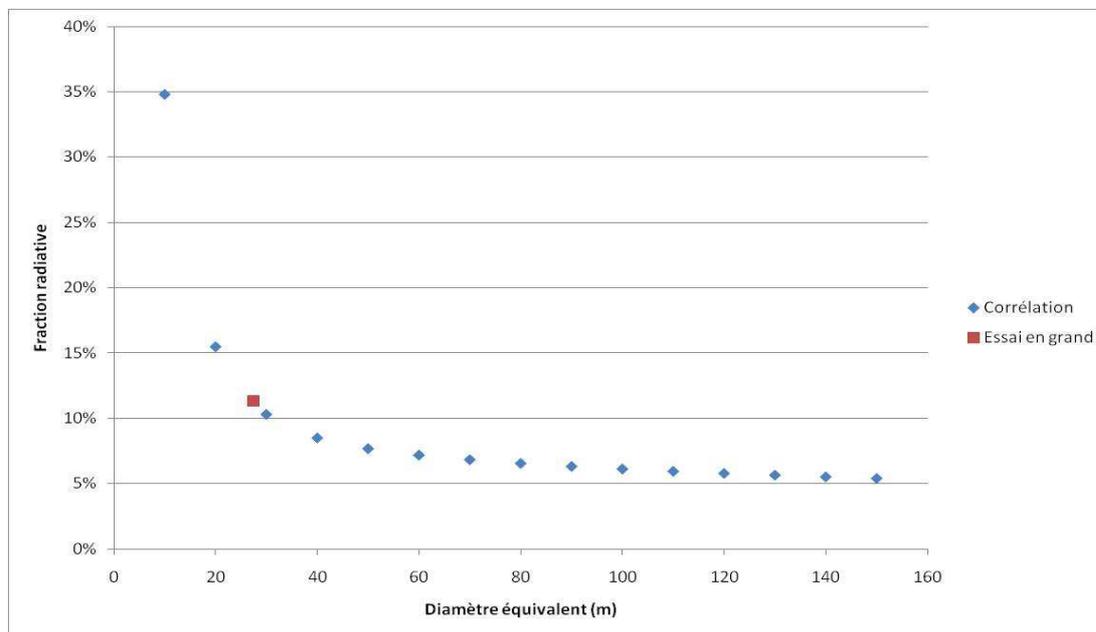


Figure 39 : Evolution de la fraction radiative en fonction du diamètre équivalent

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 :

$$F = \tau . f . E$$

avec :  $\tau$  : 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  $0.5 \text{ m.min}^{-1}$  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  $160^\circ\text{C}$  (soit une émittance de  $2.0 \text{ kW.m}^{-2}$ ) à  $500^\circ\text{C}$  (soit une émittance de  $20 \text{ kW.m}^{-2}$ ) entre I et E minutes. La température de  $155^\circ\text{C}$  correspond au critère d'élévation de température de  $140^\circ\text{C}$  avec une température initiale de  $15^\circ\text{C}$ , conformément à la définition du critère d'isolation thermique lors d'un essai normalisé. La température de  $500^\circ\text{C}$  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.

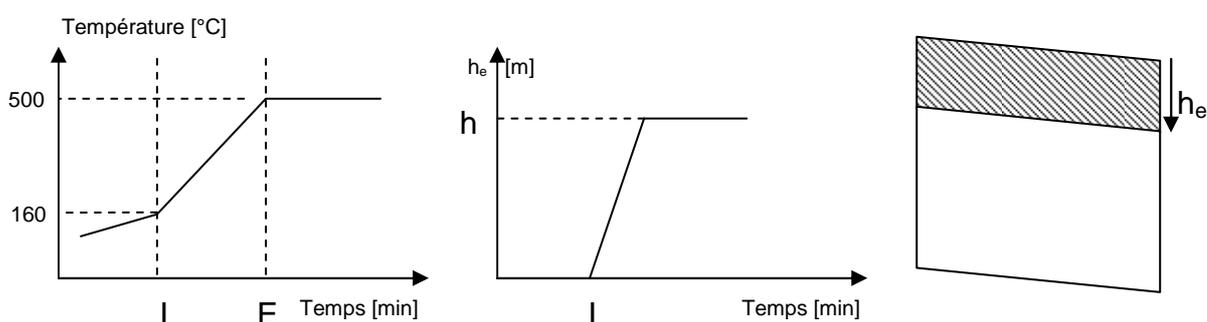


Figure 40 : Schéma descriptif de l'échauffement d'une façade

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.

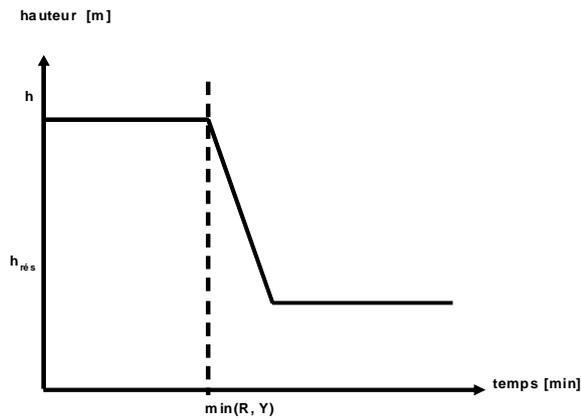


Figure 41 : Hauteur de la paroi au cours du temps

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 > 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 > min [E, Y]	Pas de rayonnement	A partir de MIN [E, Y]	0.3 h	0,05 h <sup>1</sup>	0.15 h	0
Portique acier				0.4 h	0,1 h <sup>1</sup>	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 < min [E, Y]		A partir de E	0.1 h	0.9 h	-	0

<sup>1</sup> : 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		Largeur de recouvrement	
			$h_{min}$	$h_{max}$			
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 <sub>min</sub> h <sub>max</sub>		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 ÉCRANS THERMIQUES DEPORTES : MERLONS ET ZONE DE PRÉPARATION DONT LA LARGEUR EST SUPÉRIEURE À 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  $f = f_e - f_o$ .

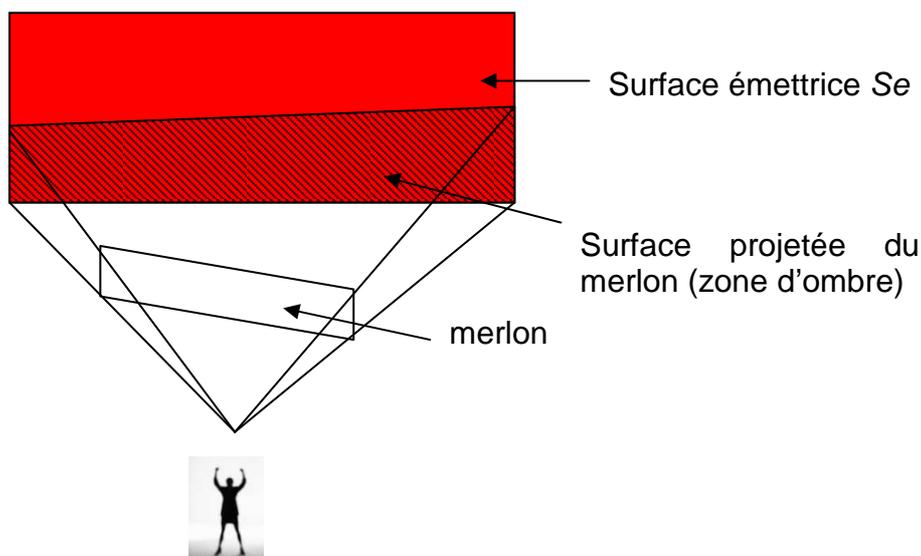


Figure 42 : schéma descriptif de l'influence d'un écran thermique

#### Cas particuliers des murs accolés à une zone de préparation :

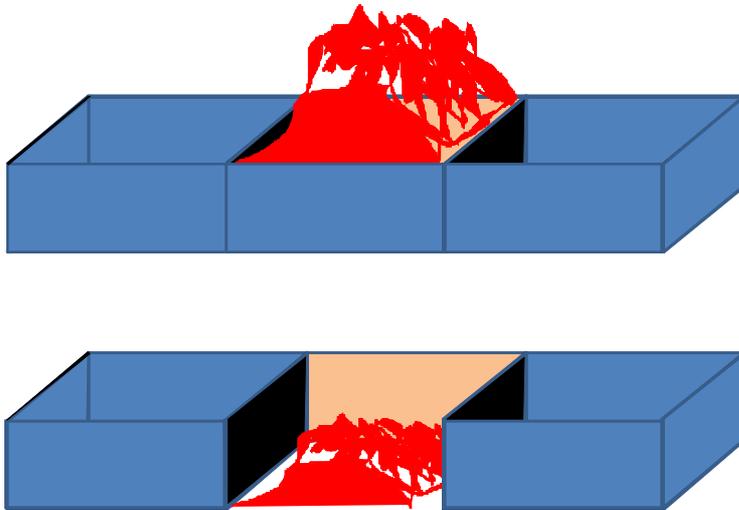
Dans le cas où la zone de préparation a une largeur supérieure à la hauteur du mur où elle y est accolée, alors on considère que celui-ci reste en place pendant toute la durée de l'incendie. En effet, ce mur est suffisamment éloigné pour que les sollicitations thermiques soient atténuées et ne compromettent 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 :

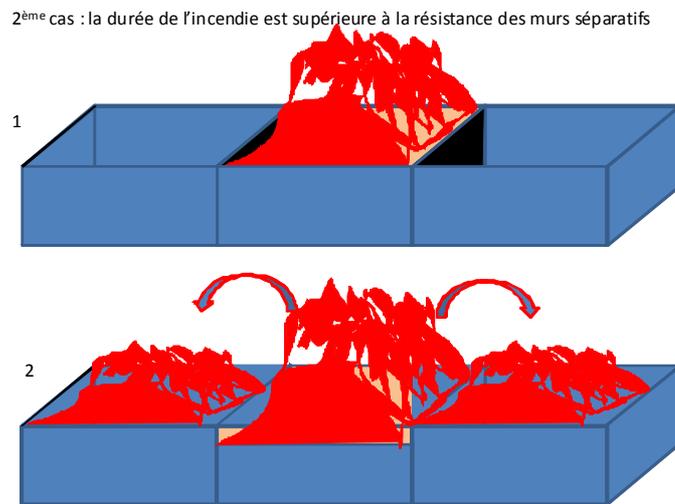
1<sup>er</sup> cas : la durée de l'incendie dans la cellule initiale est inférieure à la résistance des parois séparatrices. Dans ce cas, il n'y a pas à considérer de propagation aux cellules voisines, ceci est illustré sur la Figure 43.

1<sup>er</sup> 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<sup>ème</sup> 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.



*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)*

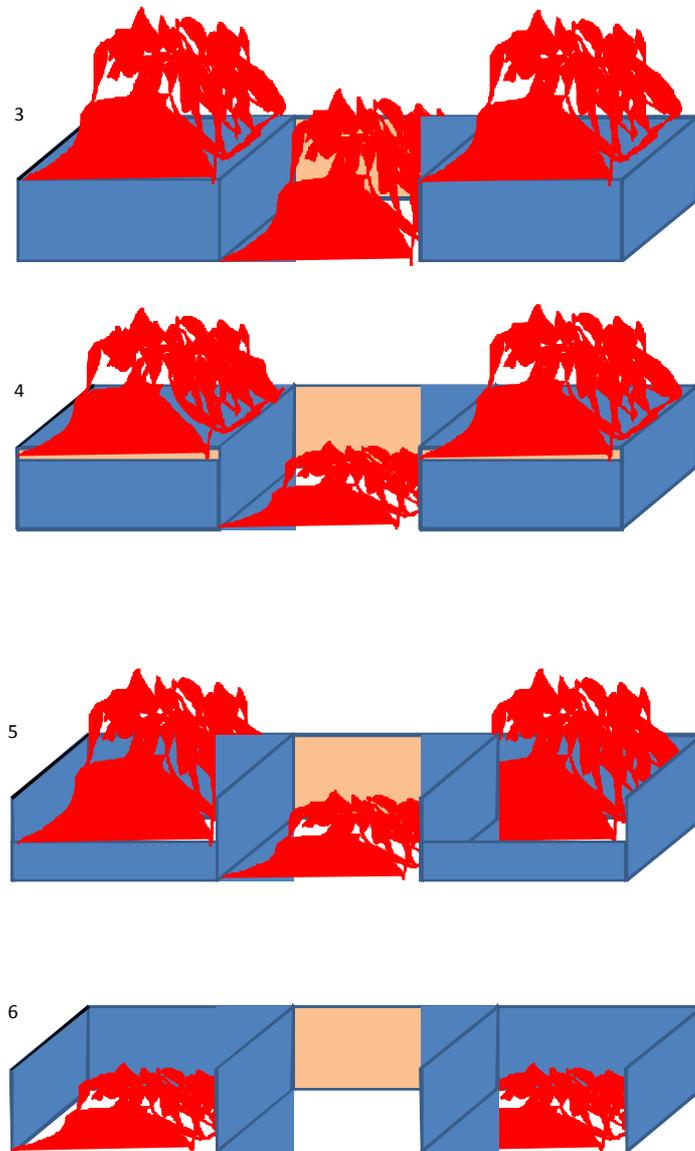


Figure 45 : schéma de propagation d'un incendie d'une cellule à ses voisines

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.

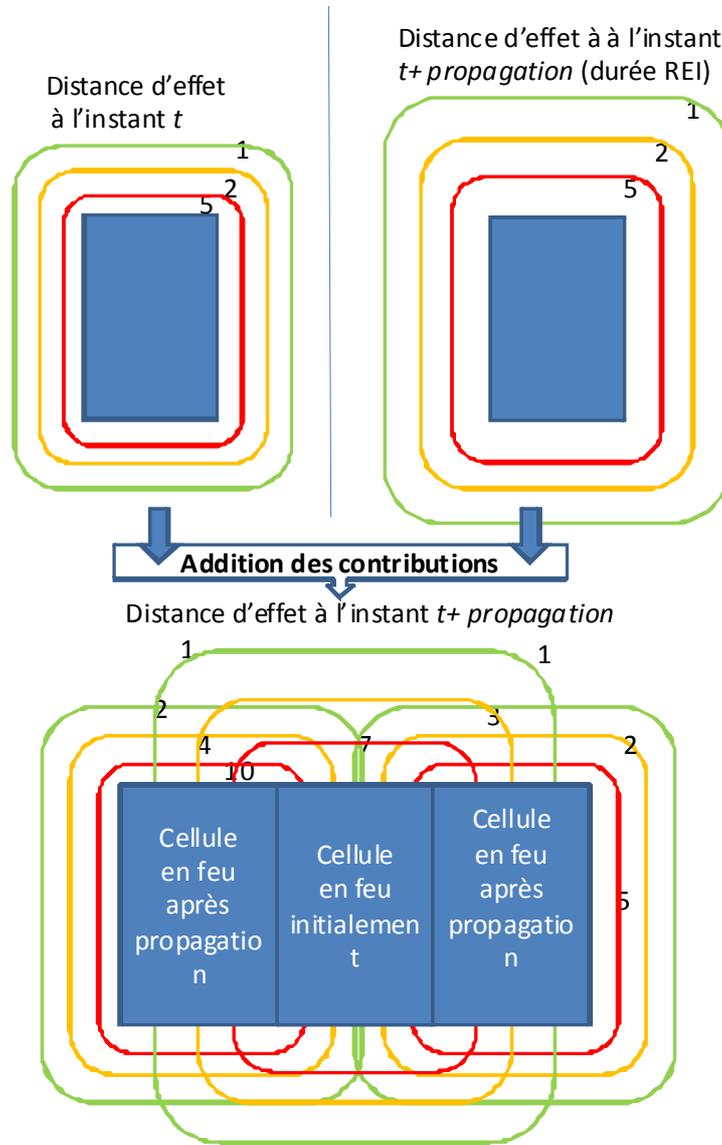


Figure 46 : Calcul pratique des conséquences d'une propagation d'un incendie – étape 1

## **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.

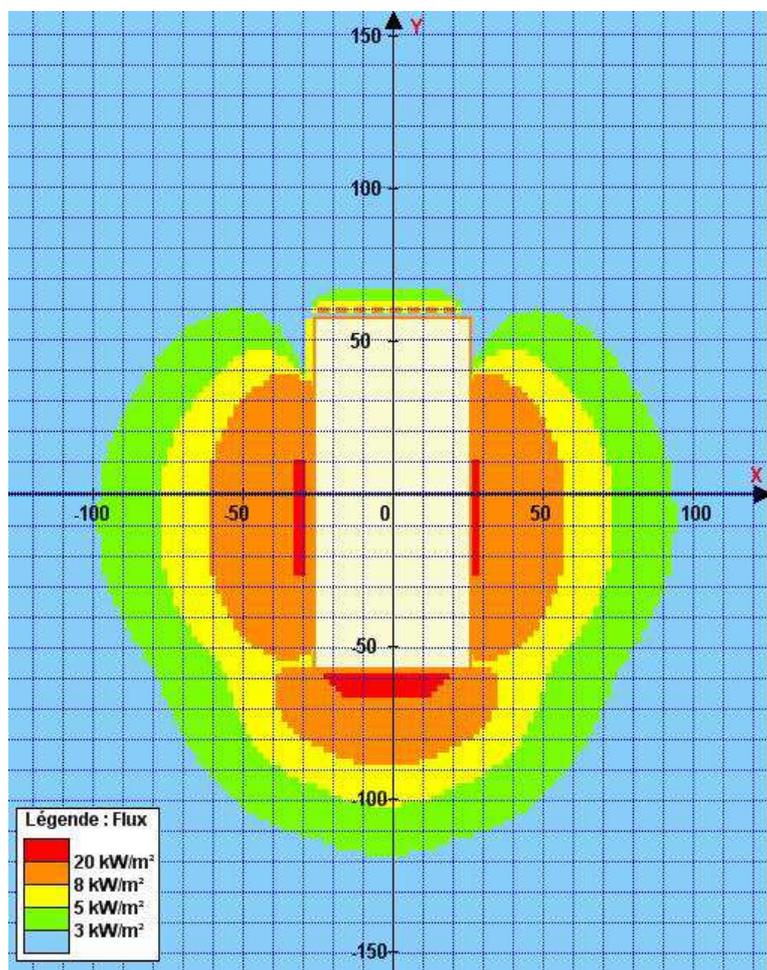


Figure 47 : Exemple de cartographie de flux obtenue avec l'outil FLUMILOG



## **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 m<sup>2</sup> 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.

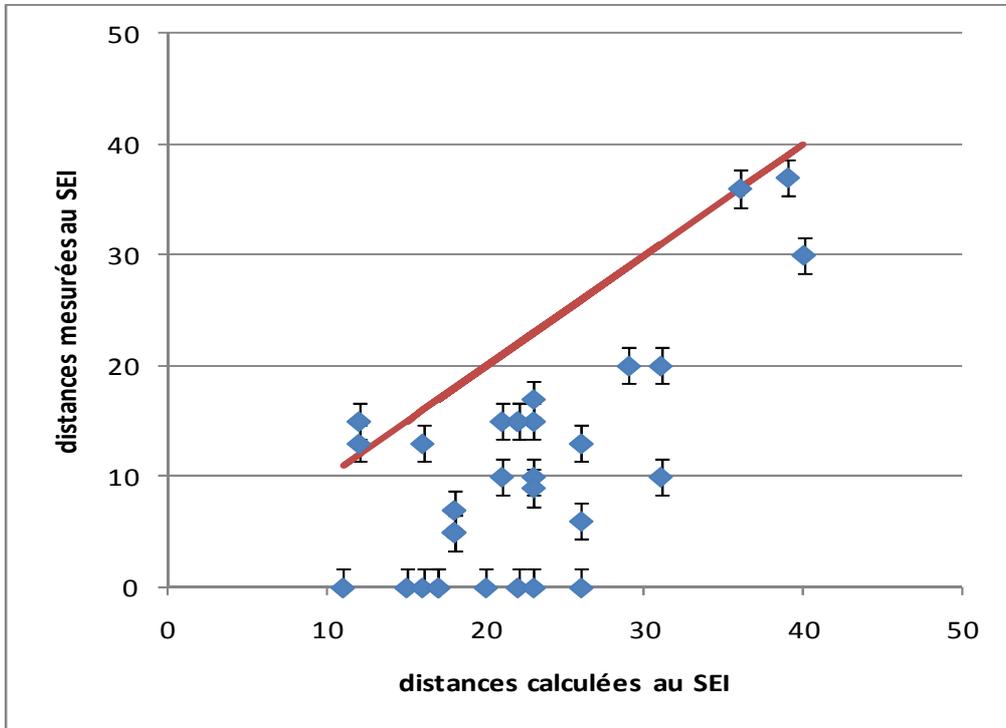


Figure 48 : Courbes dans le cas des effets irréversibles

Les courbes de la Figure 49 sont relatives aux effets létaux.

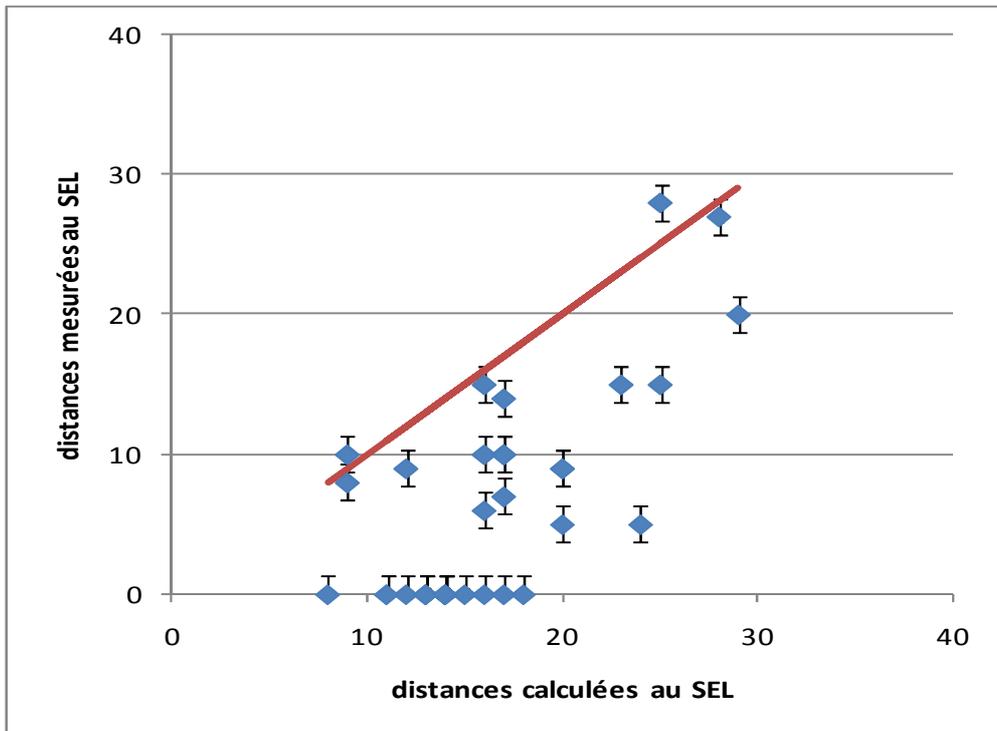


Figure 49 : Courbes dans le cas des effets létaux

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),

$Coef_{absorption}$  : Part d'énergie qui est réellement absorbée par les incombustibles.

$Coef\_toit$  : Taux de recouvrement du combustible par les éléments effondrés de toiture (-).

$Coef_{ventil}$  : coefficient réducteur dépendant de la ventilation (-).

$\Delta H_{comb\_i}$  : Chaleur de combustion de chaque combustible (kJ/kg).

$\Delta H_{comb\_palette}$  : Chaleur de combustion moyenne de la palette (kJ/kg).

$\Delta H_{\varphi;incomb\_i}$  : Chaleur de changement de phase pour l'incombustible i sur la plage de température 20°C – 1000°C

$\Delta T$  : Augmentation de température due à l'incendie (K).

$fraction_{résidu}$  : 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).

$P_{rack\_surfique}$  : puissance libérée par unité de surface enveloppante des racks (kW)

$Puissance_{absorbée}$  : Puissance absorbée par les produits incombustibles présents sur la palette (kW).

$Ratio_{comb\_volume}$  : fraction volumique de combustibles sur la palette (-).

$Ratio_{incomb\_volume}$  : fraction volumique de produits incombustibles sur la palette (-).

$Ratio_{pyro}$  : Rapport entre la puissance théorique et la puissance expérimentale de la palette (-).

$S_{chute\_toit}(t)$  : Surface couverte par des éléments de toit au cours du temps (m<sup>2</sup>),

$S_{feu\_dev}(t)$  : surface des racks en feu à l'instant t donné (m<sup>2</sup>).

$S_{feu\_plafond}(t)$  : Surface du plafond de la cellule atteinte par les flammes (m<sup>2</sup>),

$S_{sol\_palette}$  : Surface au sol de la palette (m<sup>2</sup>).

$t_{comb\_palette}$  : 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/m<sup>2</sup> s).

$V_{comb\_palette}$  : Vitesse de combustion moyenne de la palette (kg/m<sup>2</sup> s)

$Volume_{comb\_i}$  : Volume de chaque combustible contenu sur la palette (m<sup>3</sup>),

$Volume_{incomb\_i}$  : Volume de chaque incombustible (m<sup>3</sup>),

$Volume\_palette$  : Volume de la palette (m<sup>3</sup>).

$V_{prop\_horiz\_pal}$  : Vitesse de propagation horizontale dans le stockage.

$V_{prop\_vert\_pal}$  : 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, 2<sup>nd</sup> 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](http://www.safetynet.de/activities/35.htm), 2001.

INGASON H., MODELING OF A TWO DIMENSIONAL RACK STORAGE, Fire Safety Science, Proceedings of the 4<sup>th</sup> 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

<b>Repère</b>	<b>Désignation précise</b>	<b>Nb pages</b>
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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup> au sol et 600 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 cm<sup>3</sup> 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<sup>ème</sup> (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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup> de l'installation, 1 500 m<sup>2</sup> sont détruits, une partie importante des 200 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>). 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 m<sup>3</sup> d'eau, 1 000 m<sup>3</sup> de résidus solides et 2 000 m<sup>3</sup> 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, ammoniacque, 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup> 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-entretenu 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>. 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup>. 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.

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 m<sup>2</sup> (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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>2</sup> (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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>. Ce dernier abrite les activités de montage et de peinture de petits matériels divers (appareils de soudage, bombonnes 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 m<sup>3</sup> et 11 cigare de 150 m<sup>3</sup>). De très gros moyens sont déployés par les services de secours : 20 véhicules d'intervention, 3 grandes échelles, 14 lances de 60 m<sup>3</sup>/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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup>. Un 2ème bâtiment de 15 000 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> en 17 mn (panneaux sandwich combustibles) et une fumée abondante est émise.

Malgré les renforts qui affluent progressivement, les 15 000 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> du bâtiment d'exploitation et les unités de réfrigération (R22) sont détruits en moins de 2 h. Au plus fort de l'incendie, 450 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>. 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 m<sup>2</sup> et 14 m de haut (5 niveaux de stockage d'archives accessibles par des passerelles) et l'autre de 1 838 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 m<sup>3</sup>. Deux cellules de stockage de produits finis de 6 000 m<sup>2</sup> 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.

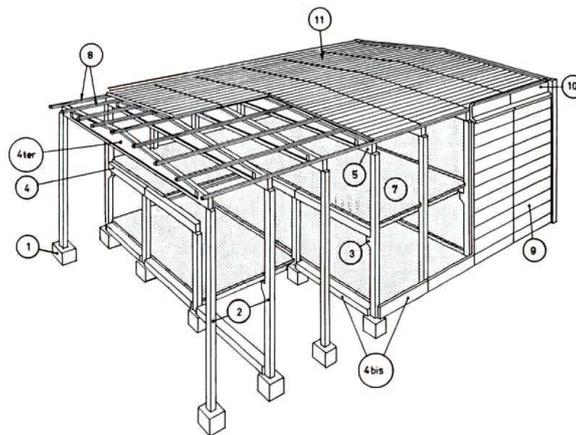
Lorsque certains de ces paramètres ne seront pas connus, des valeurs par défaut seront fournies.

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 :

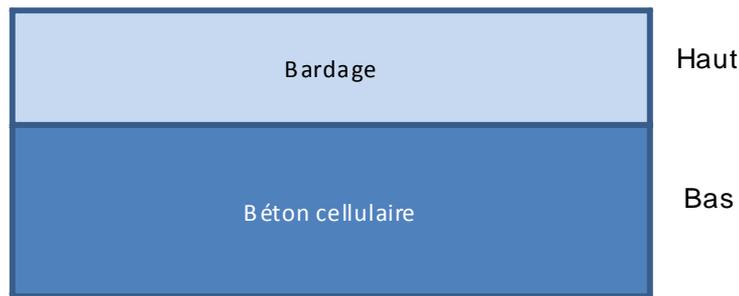
Grandeurs	Utilisation/objectif visé
<b>Dimensions intérieures</b>	<b>Positionner l'incendie par rapport à l'environnement et déterminer le volume d'oxygène disponible pour la combustion au démarrage de l'incendie</b>
largeur (m)	Largeur intérieure de la cellule
Longueur ou Profondeur (m)	Longueur intérieure 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.
<b>Toiture</b>	<b>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</b>
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 <sup>2</sup>	Cette valeur correspond à la surface utile d'exutoires en toiture mais également à toutes les autres surfaces de zones fragiles susceptibles de disparaître
<b>Parois</b>	<b>Connaître leur capacité à jouer le rôle d'écran thermique au cours du temps</b> <b>Pour une paroi monocomposante</b> , 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.
<b>présence d'ouvertures (par exemple portes de quais)</b>	<b>tout type d'ouverture permettant l'arrivée d'air frais et susceptible de laisser passer un rayonnement thermique</b>
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

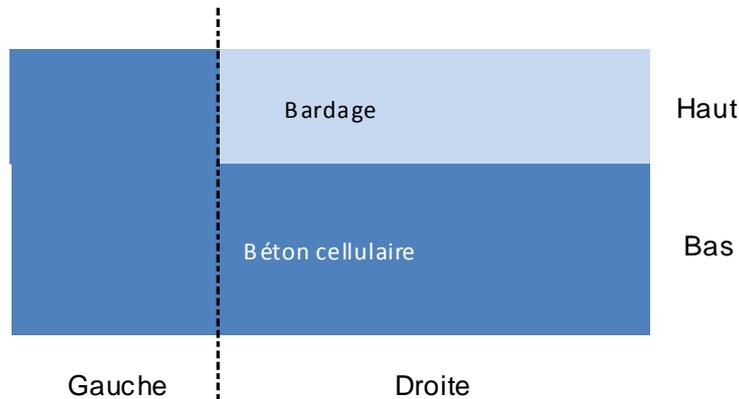


Figure 51 : Exemple de parois multi composants

Il est alors nécessaire de préciser les caractéristiques de chacune des composantes de la paroi.

<b>Paroi verticale multi composants</b>	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
<b>Pour chaque partie</b>	
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.

<b>Stockage</b>	
Sens du stockage	Ceci permet de définir le sens de propagation privilégié de l'incendie dans la cellule
<b>Dimensions</b>	<b>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</b>
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*

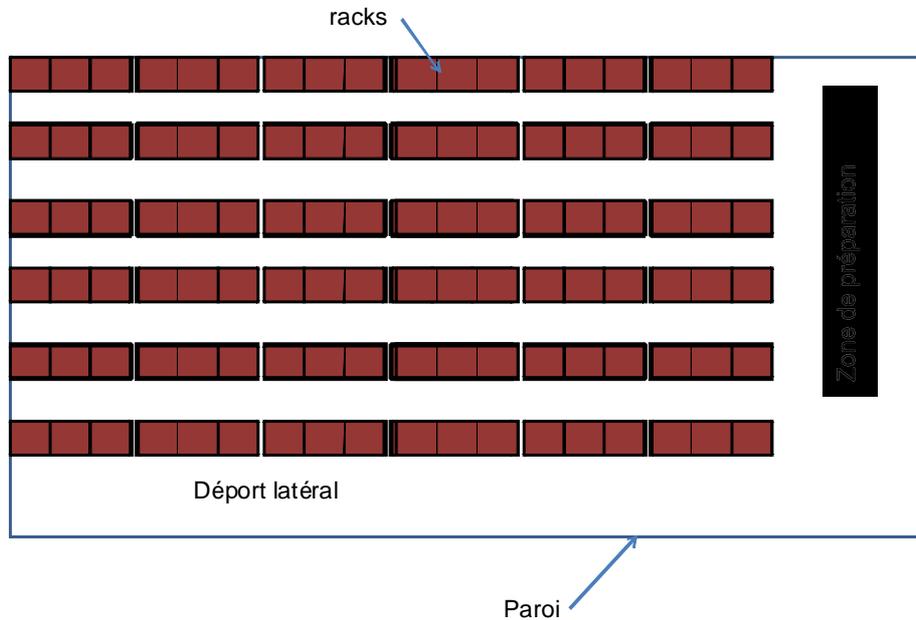


Figure 52 : Exemple d'implantation de la zone de préparation ou des déports latéraux

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.

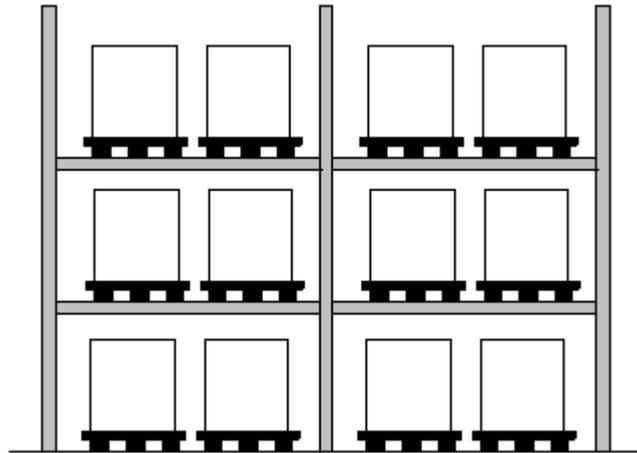


Figure 53 : stockage en racks

Mode de stockage	
<b>Stockage en rack</b>	<b>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</b>
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.

<b>Palette stockée</b>	<b>2 cas sont à prendre en compte :</b> <b>1<sup>er</sup> 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</b> <b>2<sup>ème</sup> 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.</b>
<b>dimensions</b>	
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)
<b>CAS 1 : composition connue</b>	
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.

<b>CAS 2 : données expérimentales</b>	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	
Puissance surfacique dégagée par une palette (kW/m²)	Ces valeurs sont déterminées à l'aide de la courbe de puissance mesurée en fonction du temps.
durée de combustion d'une palette (min)	
<b>CAS 3 : Palette Rubrique</b>	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*

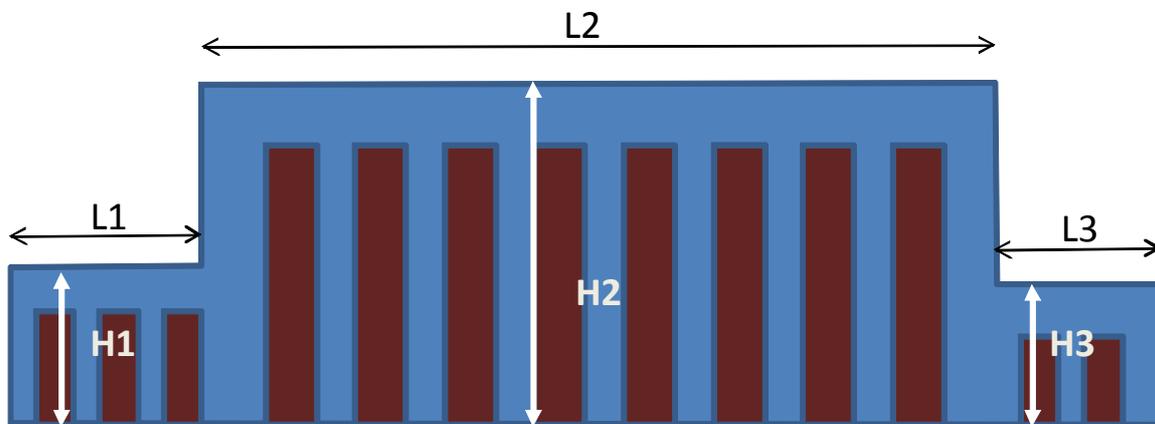
Les caractéristiques retenues pour chacun de ces produits seront précisées au paragraphe relatif au calcul de la puissance dégagée par l'incendie d'une palette. D'autres produits peuvent être intégrés dans la méthode dès lors que les propriétés de base de ces produits sont connues.

### **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.

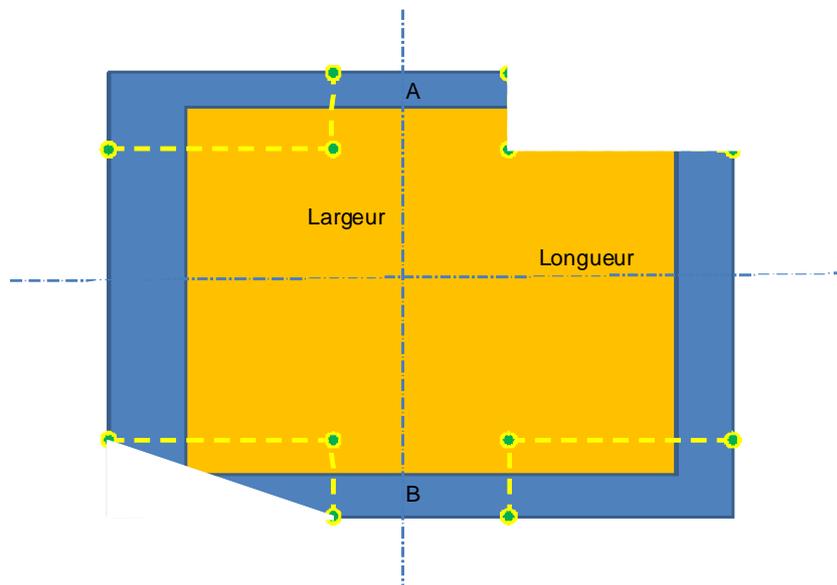
Les limites de ce mode de calcul sont rappelées ci-après :

- 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.



Ω-2 : FEUX INDUSTRIELS

---



## Annexe B : Structure béton - paroi béton

### B.1.Sinistre F2

- Surface de l'entrepôt : 2000 m<sup>2</sup>
- Structure : béton
- Surface sinistrée : 2 000m<sup>2</sup>
- 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 m<sup>2</sup>
- Structure : métallique avec remplissage par parpaings
- Surface sinistrée : 800 m<sup>2</sup>
- 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

## Ω-2 : FEUX INDUSTRIELS

---

- 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

Constations :

- 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.

Ω-2 : FEUX INDUSTRIELS

---



## **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 m<sup>2</sup>
- Structure : métallique, bardage en périphérie, toiture avec poutres treillis
- Surface sinistrée : 12000 m<sup>2</sup>
- 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.



**Ω-2 : FEUX INDUSTRIELS**

---



#### D.4.Face au risque - 372

- Surface de l'entrepôt : 6000 m<sup>2</sup>
- Structure : acier + bardage
- Surface sinistrée : 6000 m<sup>2</sup>
- 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 m<sup>2</sup>
  - Structure : acier + bardage
  - Surface sinistrée : 4000 m<sup>2</sup>
  - 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 m<sup>2</sup>
- Structure : métallique + bardage double peau
- Surface sinistrée : 3000 m<sup>2</sup>
- 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



**Ω-2 : FEUX INDUSTRIELS**

---



### 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 :



**Ω-2 : FEUX INDUSTRIELS**

---

