



Rapport final

04/08/2011

DRA-09-90977-14553A Version 2

FLUMILOG

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

Partie A

FLUMILOG

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

Partie A

Liste des personnes ayant participé à l'étude : INERIS : Stéphane DUPLANTIER, Stéphanie PATEJ, Fabien FOUILLEN, Benjamin TRUCHOT

CTICM : Joel KRUPPA, Bin ZHAO, Christophe THAUVOYE, Patrice RUSSO

CNPP : Armelle MULLER

IRSN : Jean-Marie BLANCHET, Jérôme TAVEAU, Wilfried MINKO

EFFECTIS France : Pascal VANHULLE, Aurélie WYZGOLIK



PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations disponibles au moment de sa rédaction.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement et de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire.

Les partenaires dégagent toute responsabilité pour chaque utilisation de la méthode en dehors de son domaine de validité.

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	8
1. INTRODUCTION	10
1.1 Contexte.....	10
1.2 Organisation du document	10
1.3 Modifications par rapport à la précédente version du rapport DRA-09-90977-14553A (version du 01/02/2010).....	11
1.4 Les partenaires du projet.....	11
2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE.....	12
2.1 Domaine d'application	12
2.2 Les grandes étapes de la méthode	13
3. LES DONNÉES D'ENTRÉE NÉCESSAIRES.....	15
3.1 Données relatives à la cellule.....	15
3.2 Mode de stockage.....	18
3.3 Combustible	20
3.4 Prise en compte de géométries particulières	22
3.4.1 Le cas des cellules de hauteur variable.....	22
3.4.2 Le cas des cellules qui ne sont pas rectangulaires.....	23
3.4.3 Le cas des stockages extérieurs.....	24
4. CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DU COMBUSTIBLE.....	25
4.1 Cas 1 : Palette de composition connue	26
4.1.1 Chaleur de combustion moyenne	27
4.1.2 Vitesse de combustion moyenne surfacique	29
4.1.3 Prise en compte des incombustibles	32
4.1.4 Calcul de la puissance libérée par la palette	34
4.1.4.1 Prise en compte de la compacité dans le calcul de la puissance de l'incendie d'une palette.....	34
4.1.4.2 Durée de combustion de la palette	37
4.2 Cas 2 : Caractéristiques de palette obtenues expérimentalement	39
4.3 Cas 3 : la palette rubrique	39
4.4 Détermination des vitesses de propagation horizontale et verticale.....	42

5. CALCUL DE LA PROPAGATION DANS LA CELLULE.....	44
5.1 Principe de la propagation du front de flamme dans la cellule	44
5.2 Calcul de la puissance au cours du temps de l'incendie	46
5.3 Loi de propagation entre les différents racks.....	47
5.3.1 Propagation par rayonnement	47
5.3.2 Le cas du flash over.....	49
5.4 Propagation au sein d'un rack	51
5.4.1 Propagation au sein d'un rack allumé par rayonnement.....	51
5.4.1.1 Phase de propagation initiale de la flamme	52
5.4.1.2 Phase de propagation dans la longueur du rack	54
5.5 Calcul de la surface de recouvrement du combustible par la toiture	56
5.6 Limitation de la propagation en fonction de la concentration en oxygène ..	58
5.7 Synthèse	61
6. CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DES FLAMMES	62
6.1 Choix de la forme de flamme.....	62
6.2 Hauteur de flammes	65
6.3 Prise en compte de l'effet du vent et Position de la flamme	68
6.4 Fraction radiative et Emittance des flammes.....	70
7. LE CALCUL DES EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT.....	72
7.1 La transmittivité de l'air.....	72
7.2 Le facteur de vue.....	74
7.2.1 Facteur de vue analytique.....	76
7.2.2 Facteur de vue par calcul intégral	77
7.3 La prise en compte d'Ecran thermique	79
7.3.1 Rappel sur le rôle des écrans thermiques.....	79
7.3.2 Evolution des parois.....	80
7.3.2.1 Caractéristiques d'une paroi	80
7.3.2.2 échauffement de la façade et flux thermique induit	81
7.3.2.3 Hauteur de la façade	83
7.3.3 Cas des Ecrans thermiques déportés : Merlons et zone de préparation dont la largeur est supérieure à la hauteur de la paroi.....	87
8. DÉTERMINATION DES FLUX MAXIMUMS.....	88
9. CAS DE LA PROPAGATION À 3 CELLULES.....	90

10. COMPARAISONS AVEC L'EXPÉRIMENTAL	93
11. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	95
12. BIBLIOGRAPHIE	96
LISTE DES ANNEXES	1
A.1. SINISTRE F1	2
B.1. SINISTRE F2	4
C.1. SINISTRE F3	5
C.2. SINISTRE F4	5
D.1. SINISTRE F5	7
D.2. SINISTRE F6	8
D.3. SINISTRE F7	9
D.4. FACE AU RISQUE - 372	11
D.5. FACE AU RISQUE - 387	12
E.1. FACE AU RISQUE - 359	14
E.2. SINISTRE F8	14
E.3. SINISTRE F9	16

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 (-).

ΔH_{comb_i} : Chaleur de combustion de chaque combustible (kJ/kg).

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

$\Delta H_{\phi, incomb_i}$: Chaleur de changement de phase pour l'incombustible i sur la plage de température 20°C – 1000°C

ΔT : Augmentation de température due à l'incendie (K).

$fraction_{résidu}$: 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).

$P_{rack_surfacique}$: 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 (m²),

$S_{feu_dev}(t)$: surface des racks en feu à l'instant t donné (m²).

$S_{feu_plafond}(t)$: Surface du plafond de la cellule atteinte par les flammes (m²),

$S_{sol_palette}$: Surface au sol de la palette (m²).

$t_{comb_palette}$: Durée de combustion de la palette (s).

t_{retard_toit} : Durée pendant laquelle le matériau de toiture soumis aux flammes est censé résister et ne pas s'effondrer (s),

V_{comb_i} : Vitesse de combustion de chaque combustible ($\text{kg/m}^2 \text{ s}$).

$V_{comb_palette}$: Vitesse de combustion moyenne de la palette ($\text{kg/m}^2 \text{ s}$)

$Volume_{comb_i}$: Volume de chaque combustible contenu sur la palette (m^3),

$Volume_{incomb_i}$: Volume de chaque incombustible (m^3),

$Volume_palette$: Volume de la palette (m^3).

$V_{prop_horiz_pal}$: Vitesse de propagation horizontale dans le stockage.

$V_{prop_vert_pal}$: Vitesse de propagation verticale dans le stockage.

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Avant le projet FLUMILOG, les distances d'effets thermiques associées aux incendies d'entrepôt, étaient basées sur des outils de calcul « simples » dont certains fondements reposent essentiellement sur des essais réalisés avec des feux de liquides type hydrocarbures. De fait, les différents experts et bureaux d'études ont développé leurs propres hypothèses pour prendre en compte les différentes caractéristiques des entrepôts dans le calcul des flux rayonnés. Ces hypothèses diffèrent généralement d'un bureau d'études à l'autre et ces différences sont souvent à l'origine de discussions longues et parfois stériles qui constituent un obstacle à l'avancement de l'instruction des dossiers et qui compliquent la définition technique de l'entrepôt.

Par ailleurs le développement durable conduit à une estimation précise des distances d'effet 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 nécessaire à la poursuite des activités modernes.

Les trois centres techniques, parties prenantes de ce projet - CNPP, CTICM, INERIS, auxquels sont venus ensuite s'associer l'IRSN et Efectis France, ont déjà une grande expérience de la modélisation pour la résolution de problèmes thermiques complexes et ont 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 Z1 et Z2). 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 réalisés dans le cadre du projet FLUMILOG.

Ces résultats expérimentaux permettent de compenser le peu de travaux de recherche qui ont été effectués de par le monde sur les feux de solides à grande échelle. Au cours de ce projet, plusieurs essais à moyenne échelle (100 m²) ont été réalisés et un essai à grande échelle (850 m²) a été réalisé, ce qui constitue une première mondiale.

1.2 ORGANISATION DU DOCUMENT

Le présent document est articulé autour des 6 parties principales suivantes :

- Le recensement des paramètres influant
- Le calcul des caractéristiques du combustible
- Le calcul de la propagation de l'incendie dans l'entrepôt

- La définition des caractéristiques des flammes
- Le calcul des effets sur l'environnement
- Validation de la méthode : comparaison avec les essais.

1.3 MODIFICATIONS PAR RAPPORT À LA PRÉCÉDENTE VERSION DU RAPPORT DRA-09-90977-14553A (VERSION DU 01/02/2010)

Cette nouvelle version du rapport propose une description plus détaillée de la méthode FLUMILOG. Celle-ci intègre des compléments relatifs aux éléments théoriques utilisés et à la validation de l'outil nécessaires à la compréhension de chaque développement technique effectué dans la méthode FLUMILOG. En effet, la version antérieure de ce rapport présentait seulement les grandes étapes de la méthode FLUMILOG.

Concernant le stockage en masse, le principe de propagation au sein de ce mode de stockage décrit dans la précédente version de ce document a été retiré ; celui-ci étant limité au traitement de seulement neuf îlots de stockage en masse. En remplacement sur la FAQ du site FLUMILOG, il a été indiqué qu'un stockage en masse peut être assimilé, en conservant la masse de combustibles présents, à un stockage en rack de mêmes dimensions (allées comprises).

1.4 LES PARTENAIRES DU PROJET

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, EFACTIS-France) associé aux professionnels de l'immobilier au travers de 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, Platre Lafarge) ou par les apports financiers (S.C.M.F., Cibex, Michelin, Kuehne&Nagel, Gazeley, Gecina, Gefco, Gicram, Nexity, Panhard, Poudreed, 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.

2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE DÉVELOPPÉE

2.1 DOMAINE D'APPLICATION

La méthode concerne principalement les entrepôts entrant dans les rubriques 1510 ; 1511 ; 1530 ; 2662 et 2663 de la nomenclature ICPE et plus globalement aux rubriques comportant des combustibles solides.

L'application de cette méthode s'inscrit notamment dans le cadre des études de dangers à réaliser pour les installations soumises à autorisation. Dans les entrepôts de matières combustibles (voir rubriques citées ci-avant), l'analyse des risques conduit, en général, à identifier l'incendie généralisé à une cellule comme scénario dimensionnant. Il est toutefois possible 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 :

- D'une part, le rayonnement thermique émis par les flammes et reçu à distance par des cibles potentielles : personnes, installations ou bâtiment tiers.
- D'autre part, 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.

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. En effet, il est considéré 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 elles, 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 8.

Cette méthode de calcul est applicable aux cas des entrepôts à simple rez-de-chaussée ou du dernier niveau d'entrepôts multi-étagés.

2.2 LES GRANDES ÉTAPES DE LA MÉTHODE

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 généralement déterminées en supposant l'incendie instantanément généralisé à une cellule avec un effacement total du toit et un effacement partiel ou total des parois selon les organismes 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) qui 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, 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 son 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 au rayonnement 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 couverture 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.
 - Et 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.

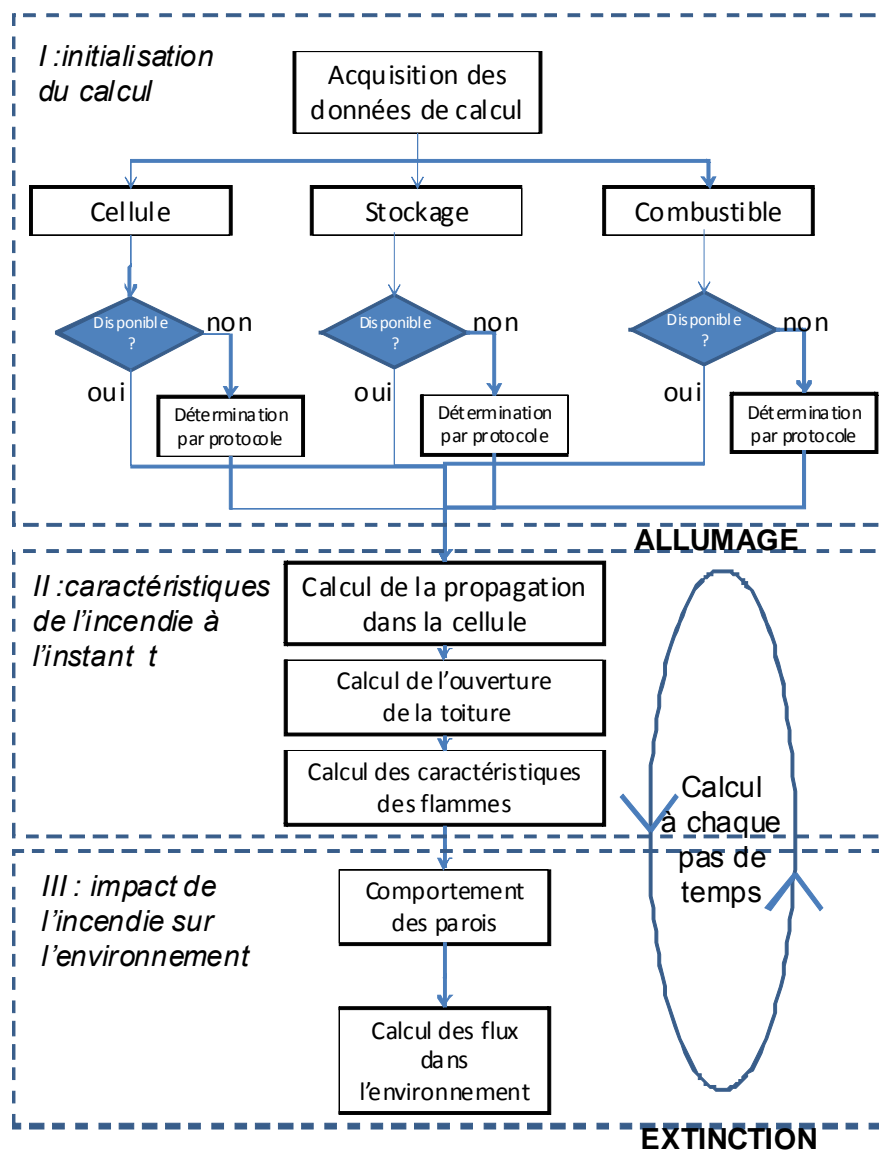


Figure 1 : principe de la méthode

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. Toutefois, 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.

3. LES DONNÉES D'ENTRÉE NÉCESSAIRES

L'objet de ce chapitre est de décrire les paramètres nécessaires pour appliquer la méthode.

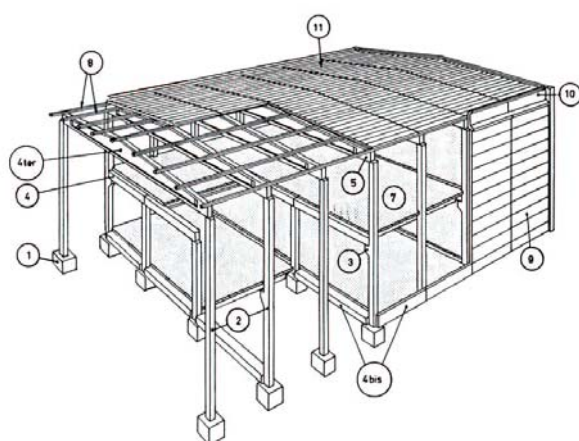
Lorsque certains de ces paramètres ne seront pas connus, des valeurs par défaut seront fournies.

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 « big bags » mais pas de stockage en vrac)

3.1 DONNÉES RELATIVES À LA CELLULE

Les différents éléments sont décrits schématiquement ci-après :



- 4 ter : poutres
2 : poteau
8 : pannes
9 : parois
11 : toiture/couverture

Figure 2 : exemple d'éléments de structure.

Les informations à obtenir pour la cellule sont listées dans le tableau suivant :

Grandeurs	Utilisation/objectif visé
Dimensions intérieures	Positionner l'incendie par rapport à l'environnement et déterminer le volume d'oxygène disponible pour la combustion au démarrage de l'incendie
largeur (m)	Largeur intérieure de la cellule
Longueur ou Profondeur (m)	Longueur intérieure de la cellule (généralement, les zones de préparation se situent aux extrémités de cette dimension)
hauteur moyenne sous-face de couverture (m)	Cette grandeur est utile pour connaître l'oxygène disponible dans la cellule. Il n'est pas utile de connaître les valeurs minimales et maximales, la valeur moyenne est suffisante.
Toiture	Déterminer d'une part la cinétique d'ouverture conduisant au passage des flammes, d'autre part le pouvoir couvrant en cas de chute sur le combustible
Poutres	Le critère R est à préciser (en minutes)
Panne	Le critère R est à préciser (en minutes). Il est supposé que c'est cette durée qui est dimensionnante car les couvertures ont généralement une résistance supérieure à celle des pannes à l'exception du fibrociment.
Couverture	Pour une dalle béton autoportante, considérer la résistance R de la dalle. Pour des panneaux béton, sans pannes, ce sont les poutres qui sont dimensionnantes. Pour les autres produits, ce sont les pannes qui sont dimensionnantes à l'exception du fibrociment qui a une résistance inférieure à celle des pannes.
Surface utile d'exutoires dans la toiture m²	Cette valeur correspond à la surface utile d'exutoires en toiture mais également à toutes les autres surfaces de zones fragiles susceptibles de disparaître
Parois	Connaître leur capacité à jouer le rôle d'écran thermique au cours du temps Pour une paroi monocomposante , Il faut fournir le degré E d'étanchéité de la paroi, le degré I d'isolation thermique de la paroi et le degré Y de résistance au feu de son système d'attache aux poteaux.
Portiques	Poteaux en acier ou béton associés rigidement aux poutres/traverses. C'est la résistance R de la structure qui est à fournir.
poteaux	acier, béton, bois : c'est la résistance R qui est à fournir.
présence d'ouvertures (par exemple portes de quais)	tout type d'ouverture permettant l'arrivée d'air frais et susceptible de laisser passer un rayonnement thermique
nombre d'ouvertures	A répartir de façon simplifiée sur toute la largeur de la paroi concernée (pour une prise en compte des portes de quai)
largeur des portes	Largeur et hauteur moyenne peuvent être remplacées par la surface (pour prendre en compte des fenêtres par exemple)
hauteur des portes	

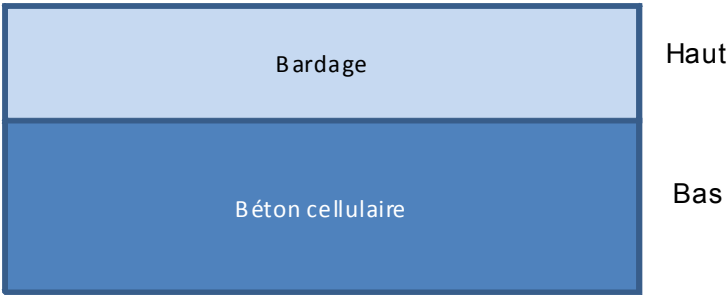
Tableau 1 : Données nécessaire pour chaque cellule

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

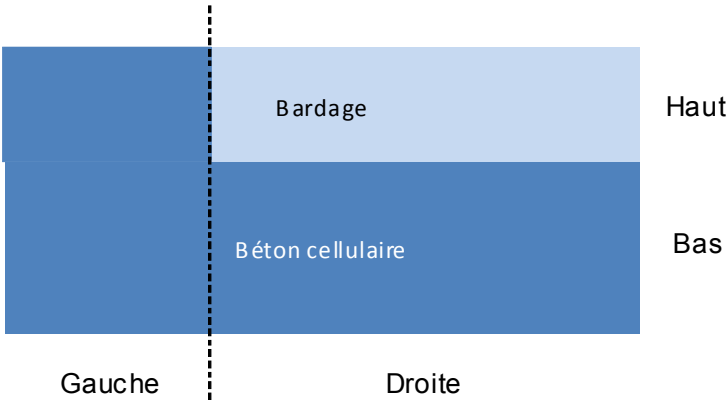


Figure 3 : Exemple de parois multi composants

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

Paroi verticale multi composants	Utilisation de plusieurs natures de matériaux sur la hauteur et sur la longueur afin de prendre en compte la spécificité du site Toutefois, pour des raisons constructives, seuls deux produits différents peuvent être pris en compte
Pour chaque partie	
paroi verticale	De façon générale, il faut connaître le caractère 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 2 : 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.

3.2 MODE DE STOCKAGE

Le mode de stockage inclut également le principe de stockage adopté par l'exploitant en considérant différemment les zones dites de préparation qui se caractérisent généralement par une hauteur de stockage plus faible que celle employée dans la zone de stockage proprement dite. Une zone est à considérer comme zone de préparation dès lors que le nombre de palettes gerbées n'excède pas 2 (hauteur maximale de 3 m environ). En effet, au-delà de 2 palettes, le stockage doit être assimilé à du stockage en masse.

Stockage	
Sens du stockage	Ceci permet de définir le sens de propagation privilégié de l'incendie dans la cellule
Dimensions	Uniquement de la partie stockage sans tenir compte du mode de stockage qui peut être différent (rack et masse par exemple) au sein d'une même cellule
longueur préparation (A) (m)	Zone située d'un côté de l'entrepôt où les palettes ne sont entreposées que sur une hauteur maximale de 2 palettes gerbées et où elles sont en transit avant mise en racks ou avant expédition
longueur préparation (B) (m)	Le cas échéant zone identique à la précédente mais située de l'autre côté de l'entrepôt
Déport latéral (α) (m)	distance entre une façade et la zone de stockage
Déport latéral (β) (m)	Grandeur identique à la valeur précédente mais pour l'autre face.
hauteur max stockage (m)	hauteur effective du stockage (partie supérieure des palettes sur le dernier niveau en rack ou en masse)

Tableau 3 : données nécessaires pour définir le stockage

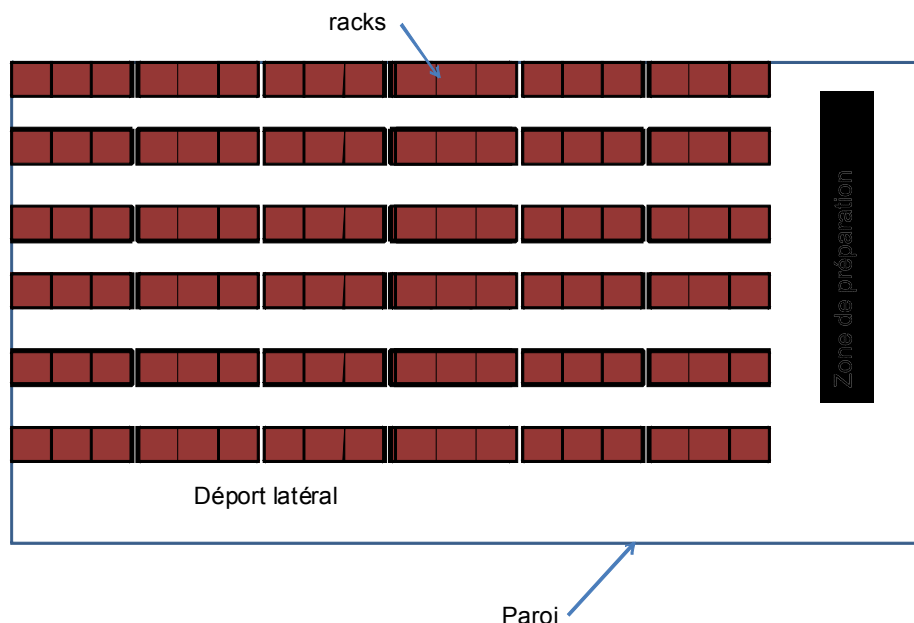


Figure 4 : Exemple d'implantation de la zone de préparation ou des déports latéraux

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.

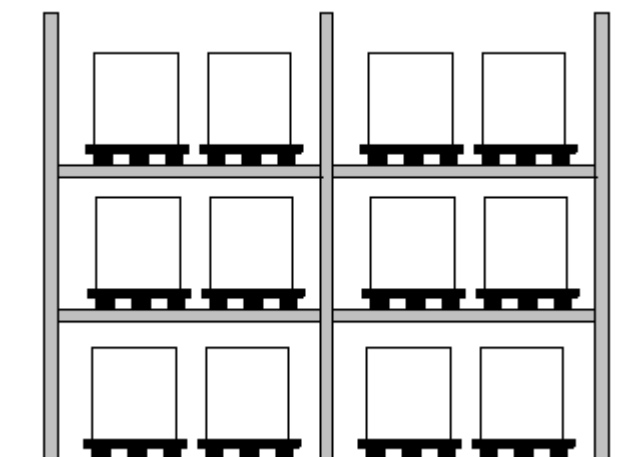


Figure 5 : stockage en racks

Mode de stockage	
Stockage en rack	Deux options sont prises en compte : simple rack ou double rack. Dans l'hypothèse d'un stockage principal par doubles racks, il est supposé que des simples racks sont présents le long des murs sauf si un déport latéral a été identifié préalablement
nombre de double racks	Dans la zone de stockage
largeur d'un double rack	Il sera supposé qu'un écart de 15 cm existe au sein d'un double rack, pour autoriser une détection rapide du feu ainsi qu'une meilleure efficacité de moyens de lutte en cas d'extinction automatique (sprinklage)
nombre de rack simples	Présents sur les bords, dans l'hypothèse où des racks simples sont utilisés dans la zone de stockage, il faut considérer les racks simples comme des doubles en conservant les dimensions enveloppes du rack simple (Nombre max de 2).
largeur d'un rack simple	-
largeur des allées	Elle a une influence notable sur la vitesse de propagation entre racks lors du démarrage de l'incendie. Si cette largeur varie au sein de la cellule, il faut considérer la valeur la plus faible car c'est celle qui favorisera la propagation.

Tableau 4 : 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.

3.3 COMBUSTIBLE

L'objectif de ce paragraphe est de présenter la liste des éléments qu'il faut connaître sur le combustible et donc plus particulièrement sur la composition de la (ou des) palette(s) moyenne(s) stockées dans l'entrepôt.

L'objectif de ces données est d'obtenir une image réaliste du stockage dans la cellule.

Lorsqu'il n'y a pas de procédure particulière de positionnement des palettes au sein du stockage en fonction de la composition des palettes, il est recommandé de définir une composition moyenne. Dans le cas contraire, il peut être utile de faire plusieurs calculs en se basant sur des catégories de produits différentes et d'analyser les différences observées dans les résultats.

Définition d'une palette moyenne : masse de combustibles dans la cellule divisée par le nombre de palettes

Définition d'une palette testée : dans certains cas, il peut être nécessaire de réaliser des essais pour déterminer expérimentalement la puissance dégagée par une palette moyenne, on parlera alors de palette testée.

Palette stockée	<p>2 cas sont à prendre en compte :</p> <p>1^{er} cas : cas le plus fréquent, les données relatives à la combustion d'une palette moyenne ne sont pas connues lors d'essais mais il est possible d'estimer ces valeurs à partir de la composition de cette palette et de sa compacité</p> <p>2^{ème} cas : Les données relatives à la combustion de la palette sont connues à partir d'essais spécifiques, on utilisera alors les résultats obtenus sur la palette testée.</p>
dimensions	
largeur (m)	Largeur visible depuis l'allée c'est une face qui sera supposée pyrolyser.
hauteur (m)	Hauteur totale de la palette, en intégrant le support (palette à proprement parler) en bois ou tout autre matériau
profondeur (m)	Face qui a priori ne pyrolysera pas (espace insuffisant entre les palettes)
CAS 1 : composition connue	
Composition des produits combustibles (kg)	Nature et masse de combustibles présents dans la palette (bois, PE, PVC, caoutchouc, carton,...)
Composition des incombustibles (kg)	Nature et masse d'incombustibles présents dans la palette (acier, eau,...)
masse d'une palette (kg)	Cette valeur permet d'estimer la masse volumique de la palette et d'estimer ainsi son degré de compacité.
CAS 2 : données expérimentales	Cas où les données ont été obtenues en suivant le protocole d'essai FLUMILOG (§ 4.2)
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)	
Puissance surfacique dégagée par une palette (kW/m ²)	Ces valeurs sont déterminées à l'aide de la courbe de puissance mesurée en fonction du temps.
durée de combustion d'une palette (min)	
CAS 3 : Palette Rubrique	Cas où la composition de la palette n'est pas connue (ex : entrepôt en blanc)
Choix de la rubrique de la palette	Rubrique 1510, 1511 ou 2662.

Tableau 5 : 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 6 : 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.

3.4 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.

3.4.1 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 6.

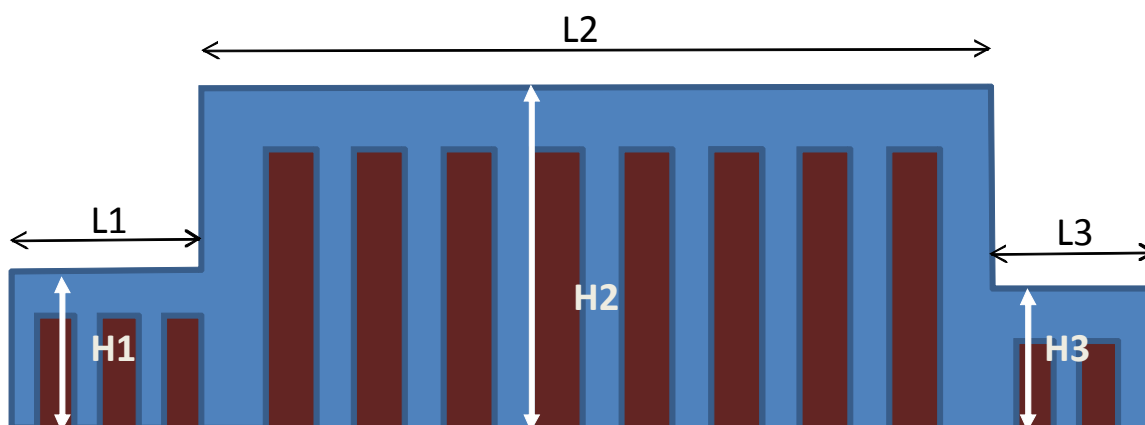


Figure 6 : représentation schématique d'un cas où il y a plusieurs hauteurs de stockage

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.

3.4.2 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.

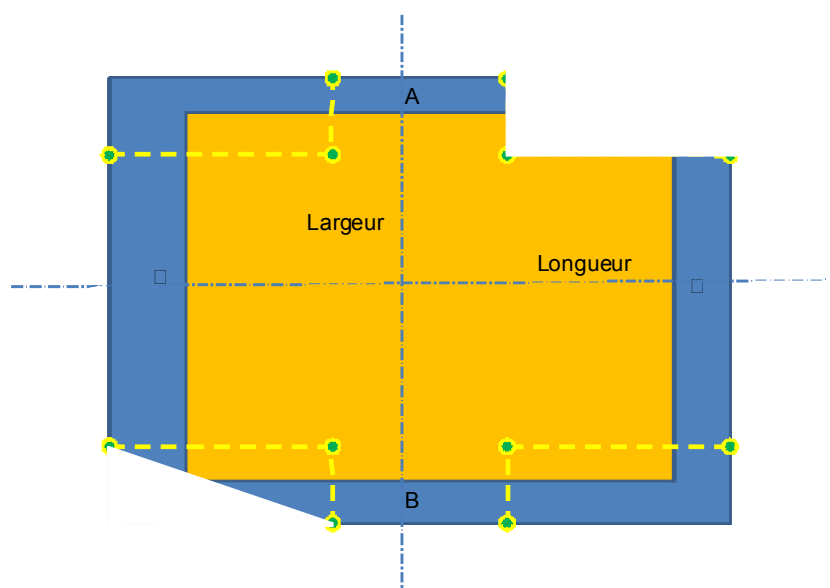


Figure 7 : exemple d'un cas de cellule non rectangulaire

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.

3.4.3 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.

4. CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES 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
- Et à la hauteur de stockage.

La prise en compte de ces derniers paramètres se fera également au niveau du chapitre sur la modélisation de la propagation du feu au sein de la cellule.

La puissance dégagée par la palette $P_{palette}$ est déterminée à partir de la composition de la palette en supposant toujours que la non-compacité favorise la combustion. Pour mémoire, la compacité est définie comme le ratio entre le volume de matière solide ou liquide 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 faudrait 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).

Par ailleurs, la présence d'incombustibles dans la palette est prise en compte via leur capacité à absorber une part de la chaleur dégagée (présence d'eau par exemple). Ce mode de calcul de la puissance palette est décrit au § 4.1.

Compte tenu des hypothèses formulées précédemment ou de l'absence de données relatives à certains produits, il peut être nécessaire de faire 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) et en retenant la valeur la plus sévère. Ce protocole est évoqué au § 4.2 et est mis en ligne sur le site FLUMILOG.

Concernant les palettes rubrique, 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 § 4.3.

4.1 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
- Pour le calcul de la propagation au sein d'une cellule
 - La vitesse de propagation horizontale
 - La vitesse de propagation verticale

Au final, la formule générale pour calculer la puissance d'un incendie de palette est la suivante :

$$P_{palette} = V_{comb_palette} S_{sol_palette} \Delta H_{comb_palette} \eta - Puissance_{absorbée}$$

Où η est le rendement de combustion (pris par défaut 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).

Cette valeur doit toutefois être modulée en fonction des caractéristiques de la palette (compacité, proportion d'incombustibles...). 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.

4.1.1 CHALEUR DE COMBUSTION MOYENNE

La chaleur de combustion moyenne est déterminée pour chaque palette par la moyenne des chaleurs de combustion pondérée par la masse des différents composants.

$$\Delta H_{comb_palette} = \frac{\sum_{comb_i} M_{comb_i} \Delta H_{comb_i}}{\sum_{comb_i} M_{comb_i}}$$

Où ΔH_{comb_i} : Chaleur de combustion de chaque combustible (MJ/kg).

M_{comb_i} : Masse de chaque combustible (kg).

Le Tableau 7 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 telles que :

- 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 oscillant 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 conduisant par exemple comme des liquides inflammables.

Types de produits	Pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg)	Références
Bois et cartons	18	SFPE Handbook 1995 (TEWARSON, 1995)
Matières plastiques		
Polychlorure de vinyle (PVC)	15 à 21,7	Techniques de l'ingénieur (NAUDIN, 1995)
Polyuréthanes (PUR)	23,9 à 31	
Polyamides (PA)	19,3 à 31	
Polystyrène (PS)	31,7 à 41,2	
Polyéthylène (PE)	33,9 à 46	
Textiles		
Viscose coton	18	DRA03 (CARRAU, 2000)
synthétique	30 à 40	
Denrées alimentaires		
<u>Produits gras</u>		Institut International du froid, 1987
Saindoux, huiles végétales et graisses	40	
Beurre	38	
Margarine	31	
Noix	29	
<u>Produits à base de viande</u>		
Bacon	27	
Viande	25	
<u>Produits secs</u>		
Céréales en grains, riz	17	
Plantes séchées et fruits secs	15	
Confiture, miel	14	
Fromage	13	
Pain	10	

Tableau 7 : Pouvoir calorifique supérieur de produits susceptibles d'être stockés en entrepôt.

4.1.2 VITESSE DE COMBUSTION MOYENNE SURFACIQUE

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,...). Cette valeur 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} : Vitesse de combustion de chaque combustible (kg/m² s).

Les vitesses de combustion sont celles obtenues pour un faible état de division. Cette remarque est très importante car il est nécessaire de s'assurer que la compacité n'est pas prise en compte 2 fois. Par exemple, plusieurs valeurs sont disponibles pour le bois :

- sous forme compacte, il est généralement trouvé 17 g/m²/s,
- sous forme divisée, des valeurs de l'ordre de 60 g/m²/s pour une palette sont généralement rencontrées.

Pour tout nouveau combustible solide intégré dans la méthode, il sera nécessaire de connaître toutes les propriétés décrites dans le tableau suivant :

Nom	Chaleur de combustion – PCI (MJ/kg)	Vitesse de combustion à l'état non divisé (kg/m ² /s)	Masse volumique (kg/m ³)
bois	18	0,017	550
PE	40	0,015	925
carton	18	0,017	900
PVC	18	0,015	750
PS	40	0,015	20
PUR	26	0,021	30
Caoutchouc	30	0,007	900
Pneu	30	0,035	900
Coton	20	0,0155	95
Synthétique	38	0,0135	90

Tableau 8 : propriétés des produits à l'état non divisé.

Les propriétés présentées dans le Tableau 8 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 8). En effet, un très bon aérage des bûchettes (organisation des bûchettes sous forme de bûchers de bois) permettait de tripler la puissance maximale de 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 $0,051 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$.

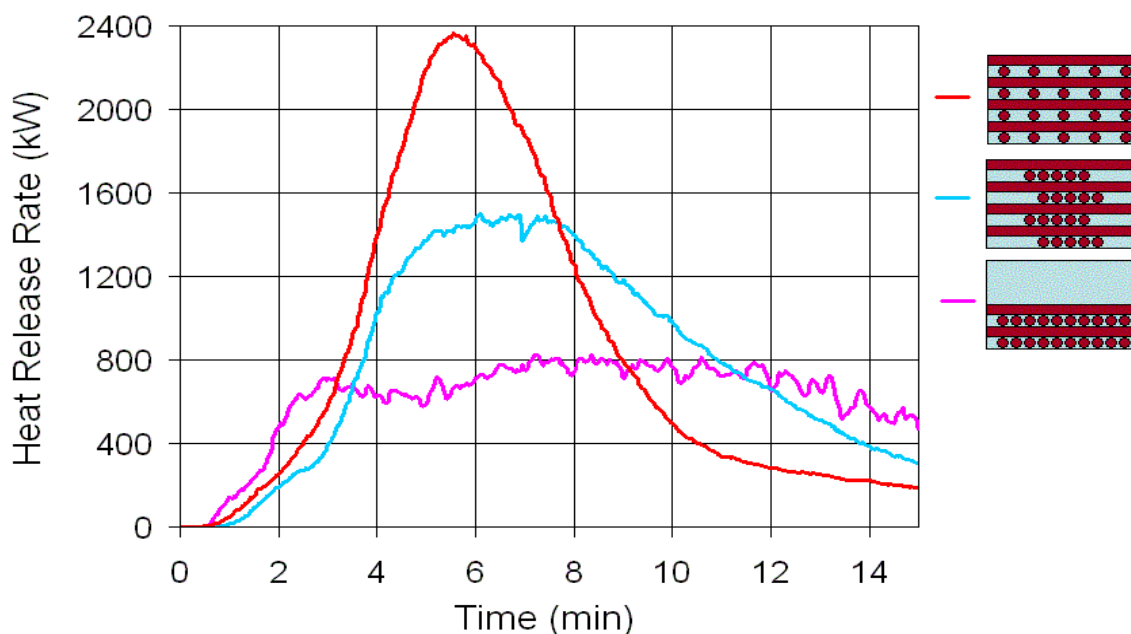


Figure 8 : Evolution de la puissance en fonction de l'arrangement des bûchettes.

De plus, les essais à moyenne échelle ont permis de tirer quelques enseignements pour l'élaboration de la méthode. La Figure 9 présente l'évolution de la vitesse de combustion maximale en fonction de la charge combustible de la palette pour chaque essai.

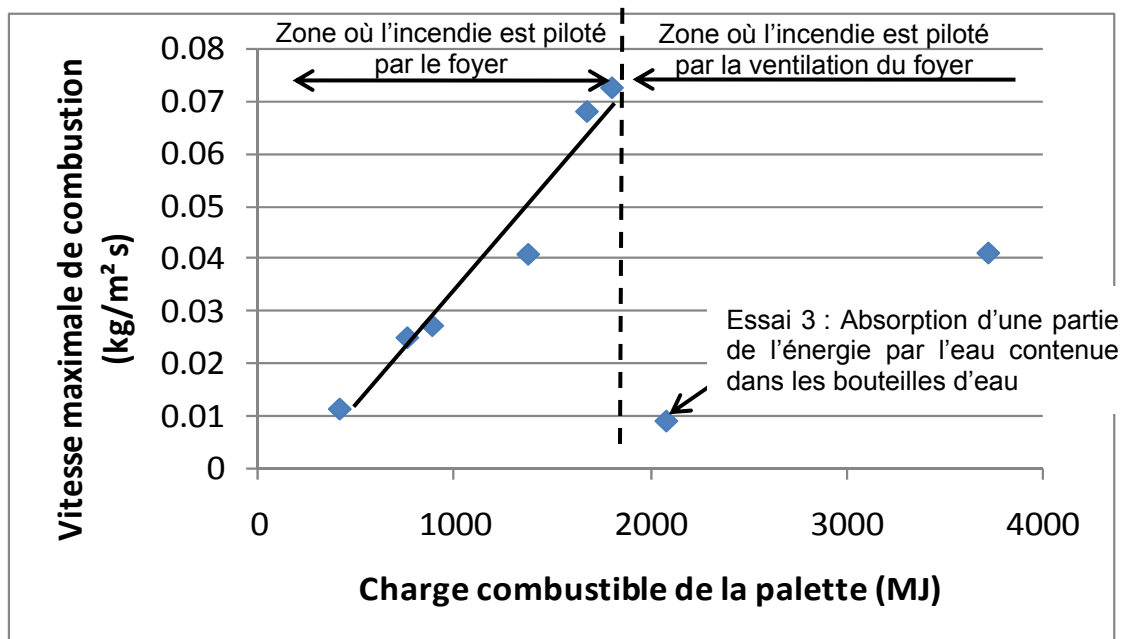


Figure 9 : Evolution de la vitesse de combustion suivant la charge combustible de la palette pour les essais à moyenne échelle.

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 § 5.6). 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 soit 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 § 4.1.3).

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 § 4.1.4.1). En effet, un combustible peu compact va avoir tendance à bien brûler en raison de la bonne ventilation du foyer si toutefois les produits incombustibles présents sur la palette ne viennent pas empêcher cette alimentation en air. Il est donc important dans le calcul de la puissance de considérer à la fois le volume de combustible et d'incombustible tel que :

$$Ratio_{comb_volume} = \frac{\sum_{comb_i} Volume_{comb_i}}{Volume_palette}$$

$$Ratio_{incomb_volume} = \frac{\sum_{comb_i} Volume_{incomb_i}}{Volume_palette}$$

Où $Volume_{comb_i}$: Volume de chaque combustible contenu sur la palette (m³),

$Volume_{incomb_i}$: Volume de chaque incombustible (m³),

$Volume_palette$: Volume de la palette (m³).

4.1.3 PRISE EN COMPTE DES INCOMBUSTIBLES

Les incombustibles contenus dans les palettes sont pris en compte dans le calcul de la puissance de la palette en considérant l'énergie absorbée par ces derniers telle que :

$$Energie_{absorbée} = \left(\sum_{incomb_i} M_{incomb_i} C_{incomb_i} \Delta T + \sum_{incomb_i} M_{incomb_i} \Delta H_{\varphi;incomb_i} \right) Coef_{absorption}$$

Où C_{incomb_i} : Capacité calorifique des incombustibles (kJ/kg K),

ΔT : Augmentation de température due à l'incendie (K). ΔT représente 1000°C s'il n'y a pas de changement de phase et $T_{ebullition} - T_{amb}$ s'il y a un changement de phase,

$\Delta H_{\varphi;incomb_i}$: Chaleur de changement de phase pour l'incombustible i sur la plage de température 20°C – 1000°C ; elle peut être nulle lorsqu'il n'y a pas de changement de phase sur cette plage de température (par exemple pour l'acier), cela peut être la chaleur latente de vaporisation (par exemple, pour l'eau) ou la chaleur de fusion (par exemple, pour l'aluminium).

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

L'essai 3 à moyenne échelle réalisé avec des palettes de bouteilles d'eau a montré que la quantité d'eau contenue dans les bouteilles était réellement capable d'absorber une certaine partie de cette énergie (Figure 9). 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 des combustibles et de l'énergie absorbable par les incombustibles.

Le mode de calcul est issu des réflexions suivantes (Figure 10) :

- L'énergie absorbée correspond à une partie de l'énergie disponible telle que : $E_{absorbée} = \beta \cdot E_{dispo}$;

- L'énergie absorbée est égale à une partie de l'énergie absorbable, cette partie correspond au coef d'absorption telle que : $E_{\text{absorbée}} = \alpha * E_{\text{absorbable}}$;
- Un 3^{ème} ratio « gamma » est introduit comme suit : $\text{gamma} = E_{\text{dispo}} / E_{\text{absorbable}}$;
- $E_{\text{finale}} = E_{\text{dispo}} - E_{\text{absorbée}}$ d'où $\text{gamma} = \alpha / \beta$.

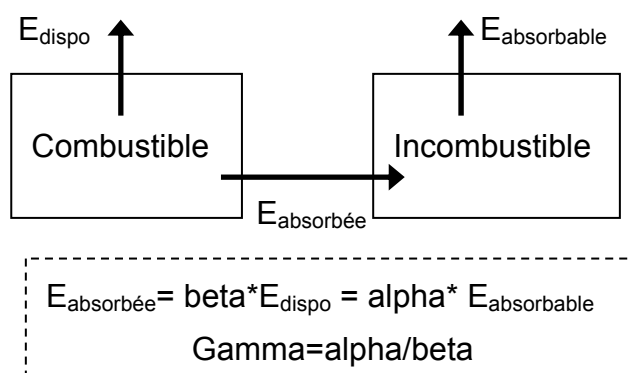


Figure 10 : Schéma explicatif du bilan énergétique sur la palette.

Ensuite, les postulats sont les suivants :

- Lorsque $E_{\text{dispo}} \ll E_{\text{absorbable}}$, $\text{gamma} \ll 1$ alors on a supposé que $\alpha = 0$;
- Lorsque $E_{\text{dispo}} = E_{\text{absorbable}}$, $\text{gamma} = 1$ alors on a supposé que $\alpha = 0,5$;
- Lorsque $E_{\text{dispo}} \gg E_{\text{absorbable}}$, $\text{gamma} \gg 1$ alors on a supposé que $\alpha = 1$.

Entre ces différentes bornes, les valeurs de α c'est-à-dire du coefficient d'absorption sont interpolées.

Quatre incombustibles ont été retenus dans la méthode, les propriétés à connaître pour le calcul de l'énergie absorbée sont regroupées dans le Tableau 9 :

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 9 : 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.

4.1.4 CALCUL DE LA PUISSANCE LIBÉRÉE PAR LA PALETTE

4.1.4.1 PRISE EN COMPTE DE LA COMPACITÉ 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 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 moyenne échelle et 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 10 montre qu'il existe un ratio (dénommé « *ratio_pyro* ») entre la puissance théorique $P_{palette}$ (produits compacts) et la puissance de la palette trouvée expérimentalement P_{exp} qui est directement lié 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 10 : Ratio entre la puissance théorique et expérimentale de la palette.

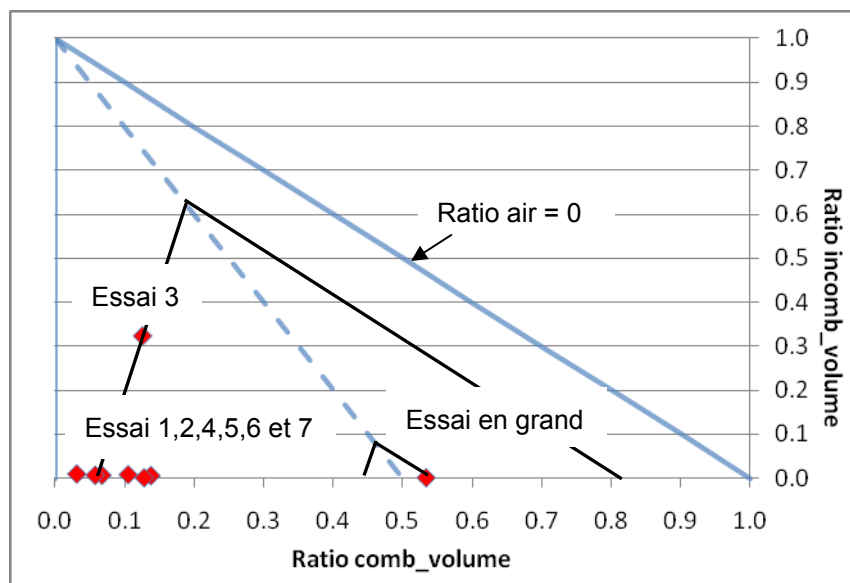


Figure 11 : Représentation des essais à moyenne et grande échelle en fonction de la fraction volumique de combustible et d'incombustible.

Sur la Figure 11, les caractéristiques des différents essais ont été reportées afin de trouver une loi de calcul du *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 doivent 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 $x < 0.783$

$$\text{ratio_pyro} = -28.7 (x+y)^2 + 29.796 (x+y) - 4.729$$

si $y < -2x+1$ et $x > 0.115$

$$\text{ratio_pyro} = -15.533 (x-y/5.565)^2 + 14.727 (x-y/5.565) - 0.487$$

sinon $ratio_pyro = 1$

Ces relations sont représentées sur la Figure 12.

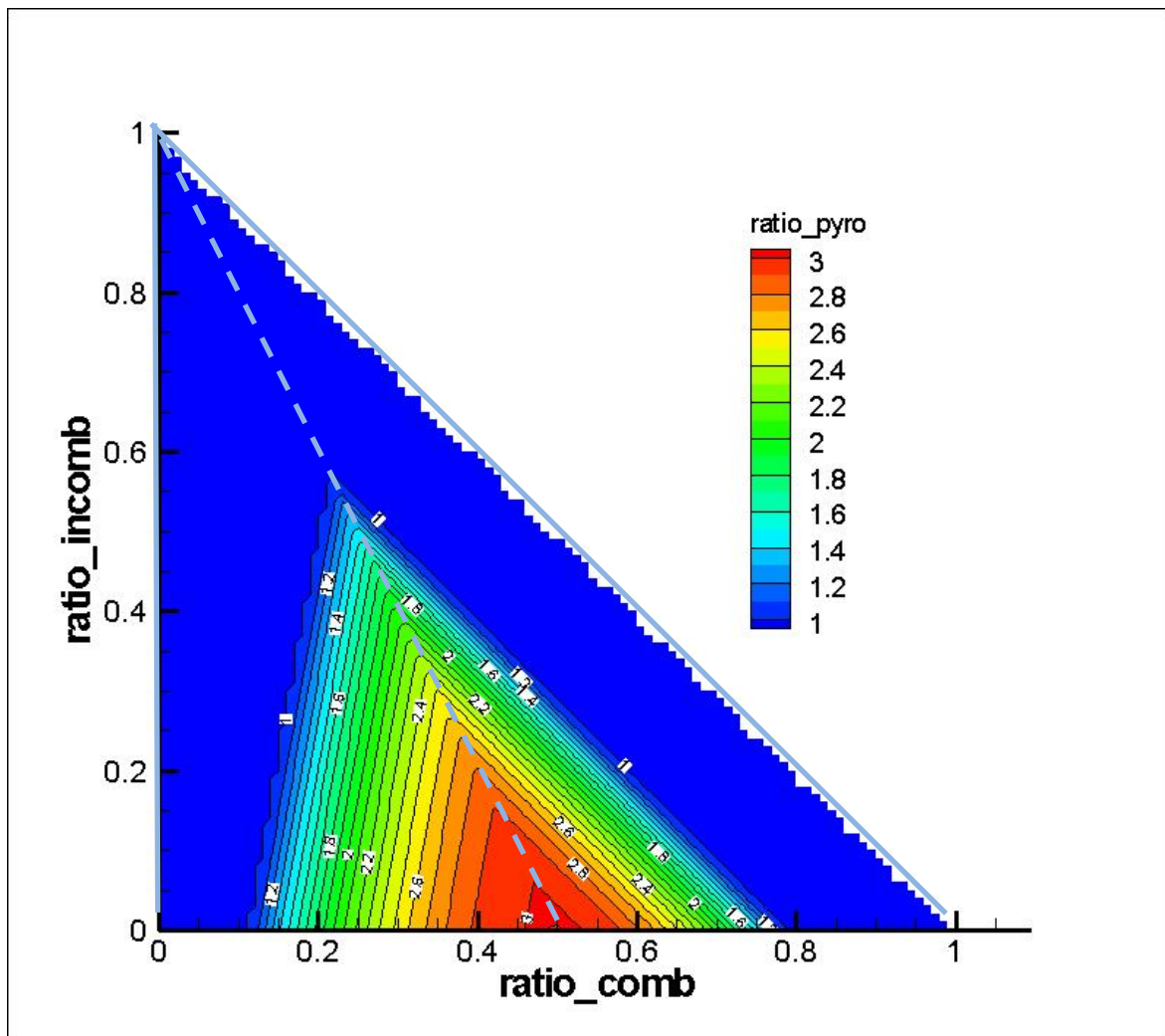


Figure 12 : Représentation du $ratio_pyro$.

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

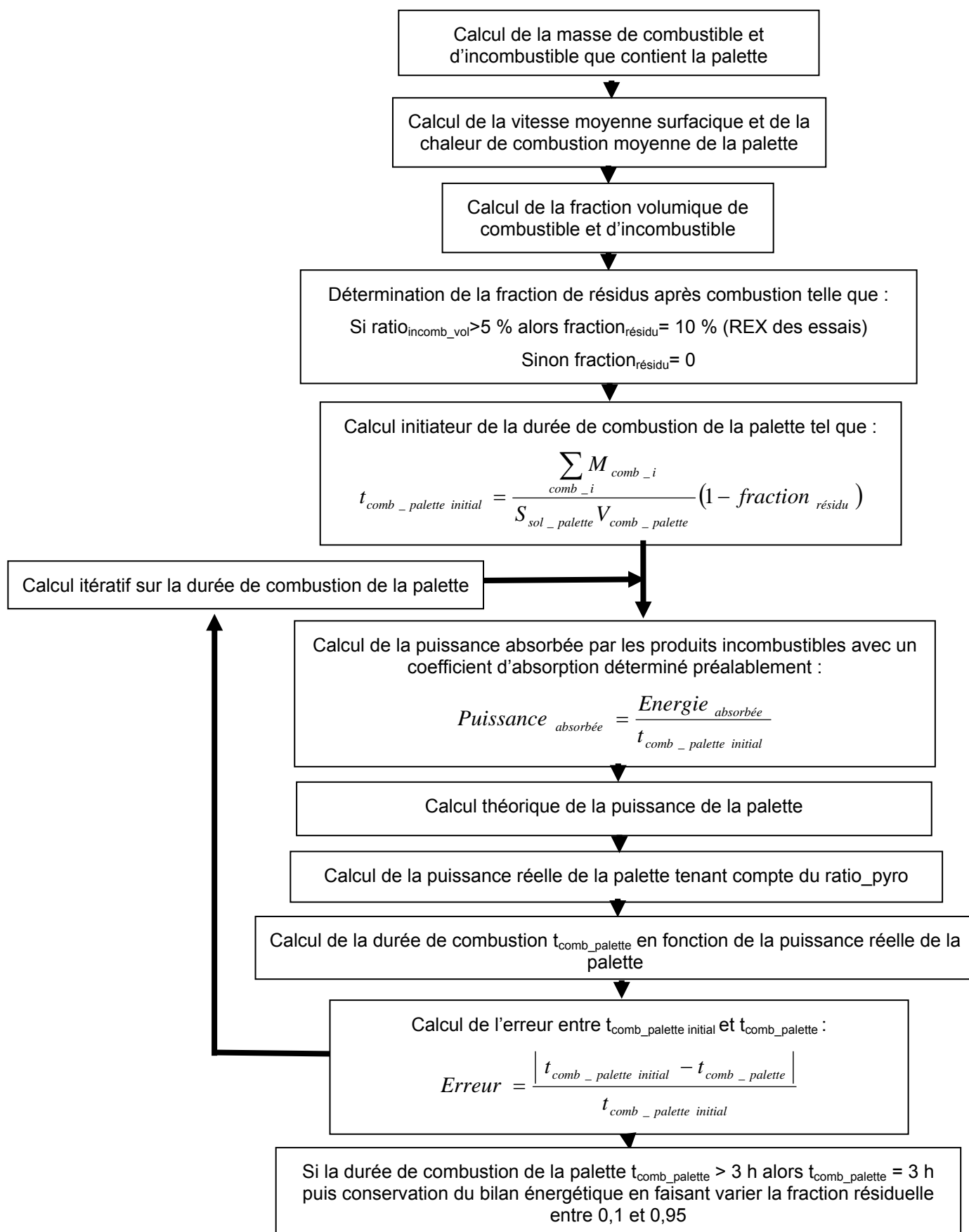
$$P_{\text{palette réelle}} = ratio_pyro * P_{\text{palette}}$$

Cette puissance est ensuite convertie en puissance surfacique par rapport à la surface développée des racks (5 faces) pour pouvoir être utilisée dans le cadre de la propagation de l'incendie.

4.1.4.2 DURÉE 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 tout 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.



4.2 CAS 2 : CARACTÉRISTIQUES DE PALETTE OBTENUES EXPÉRIMENTALEMENT

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 (§ 4.3).

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 éléments à renseigner dans l'outil FLUMILOG sont les suivants :

- Dimensions de la palette,
- Composition massique de la palette,
- Puissance dégagée par la palette et sa durée de combustion.

4.3 CAS 3 : LA PALETTE RUBRIQUE

Pour chaque rubrique, 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 100kg et 1200kg. 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 2kg 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 – 2663, par défaut, une masse de 25 kg de bois de palette est incluse. A ceci s'ajoute la masse du PE (avec 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 § 4.1.

L'étude de ces 30000 compositions a permis de définir pour chacune des rubriques une courbe enveloppe de la puissance palette. La Figure 13 donne une représentation de cette courbe pour 90 à 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 13) 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 2662-2663.

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.

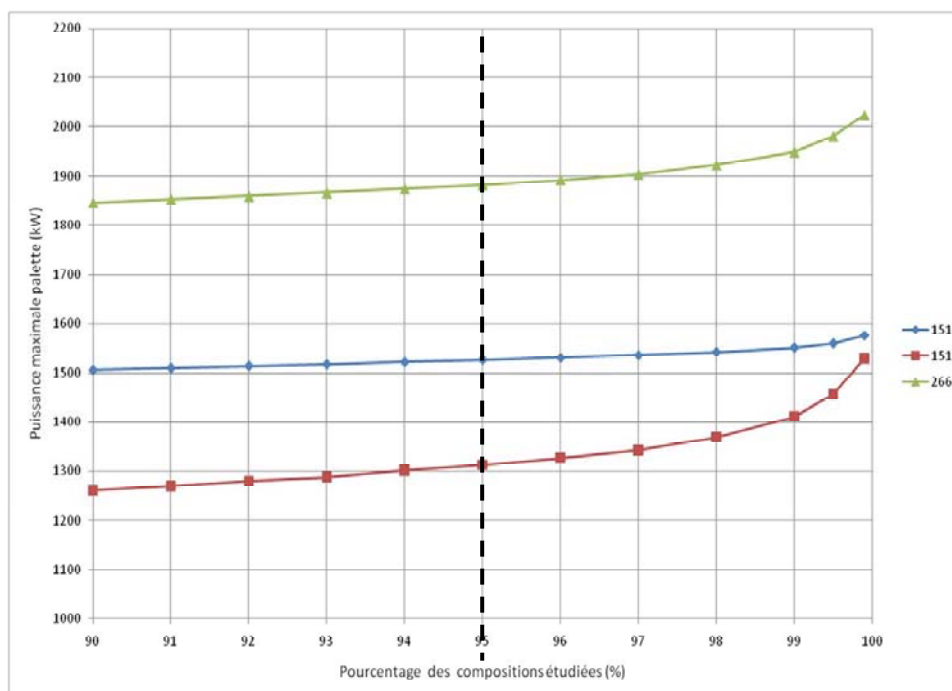


Figure 13 : Evolution de la puissance maximale de palette correspondant à un pourcentage élevé des 30000 compositions étudiées.

La Figure 14 représente plus précisément les résultats obtenus pour les 30000 compositions s'apparentant 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.

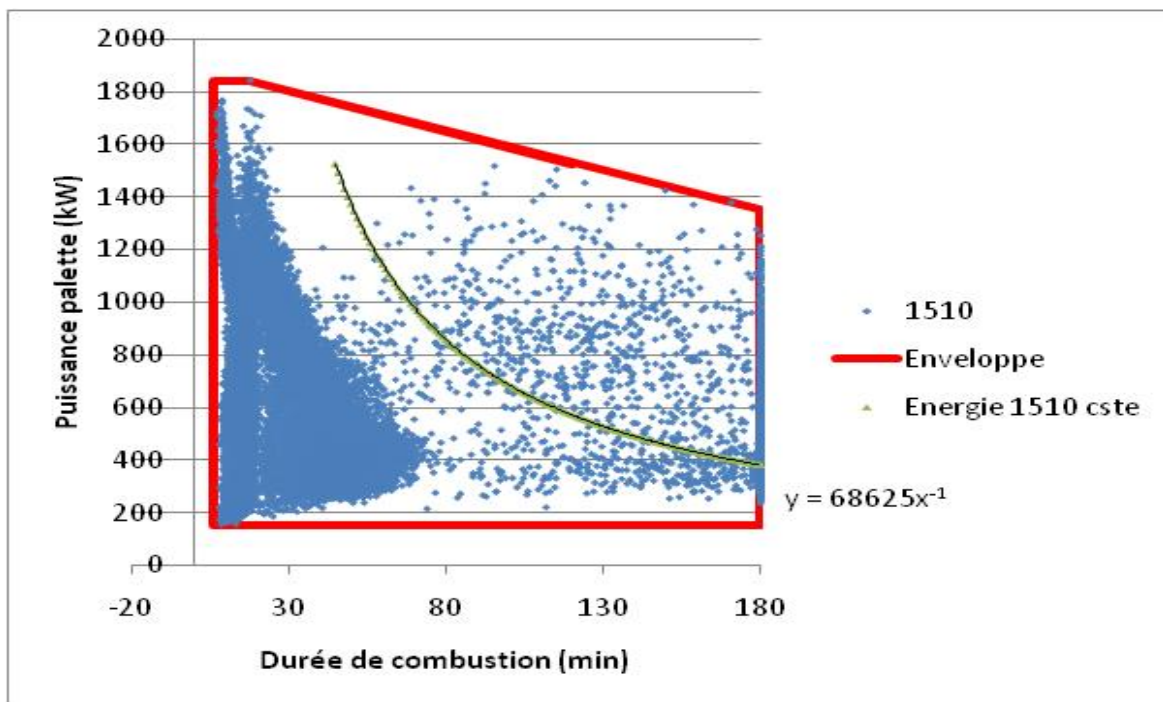


Figure 14 : Répartition de la puissance de la palette pour les 30000 compositions testées pour la rubrique 1510.

4.4 DÉTERMINATION DES VITESSES DE PROPAGATION HORIZONTALE ET VERTICALE

Il est difficile de trouver dans la littérature des vitesses de propagation sur les palettes. L'essai à grande échelle a permis de déterminer pour les palettes bois les valeurs des vitesses de propagation horizontale $V_{prop_horiz_pal}$ et verticale $V_{prop_vert_pal}$ telles que :

$$V_{prop_horiz_pal} = 3 \text{ m/min}$$

$$V_{prop_vert_pal} = 0,7 \text{ m/min}$$

Etant donné la rapidité de propagation et la violence de l'incendie lors de l'essai en grand, ces valeurs de vitesse sont considérées comme maximales et dites « de référence ». Rappelons que le stockage de palette bois était très aéré et donc de faible compacité.

Pour une puissance de palette inférieure à celle de l'essai à échelle 1 (soit 2000 kW), 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, 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, 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 deux 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.

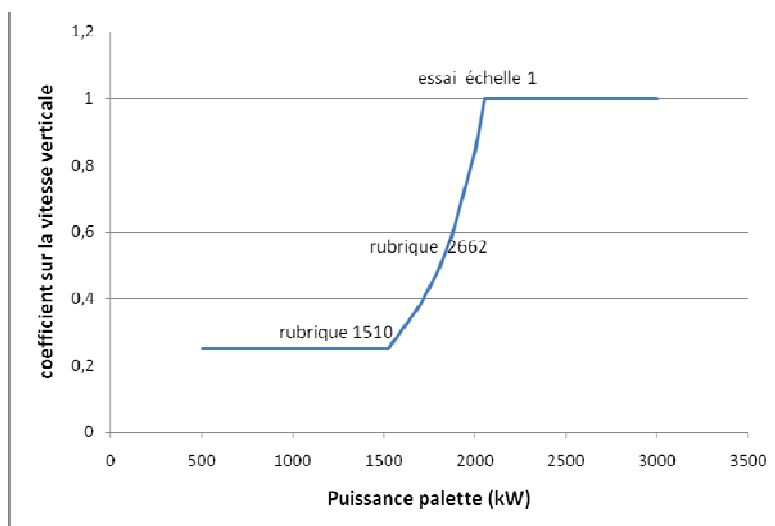


Figure 15 : Coefficient réducteur de la vitesse de propagation verticale fonction de la puissance de la palette.

5. CALCUL DE LA PROPAGATION DANS LA CELLULE

5.1 PRINCIPE DE LA PROPAGATION DU FRONT DE FLAMME DANS LA CELLULE

L'inflammation initiale se porte 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 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 16).

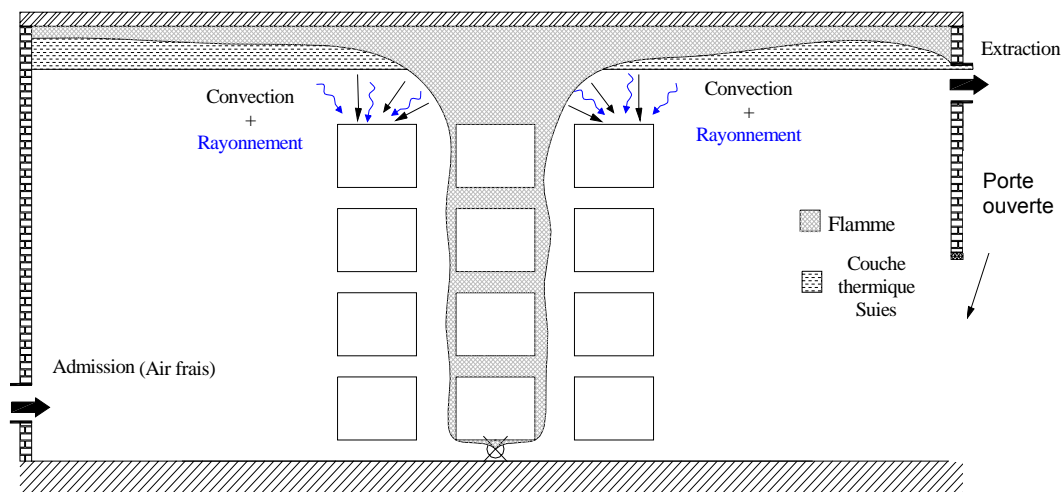


Figure 16 : Apparition de la couche chaude, influence du rayonnement et de la convection naturelle sur les racks voisins.

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 assez de 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 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 17), 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.

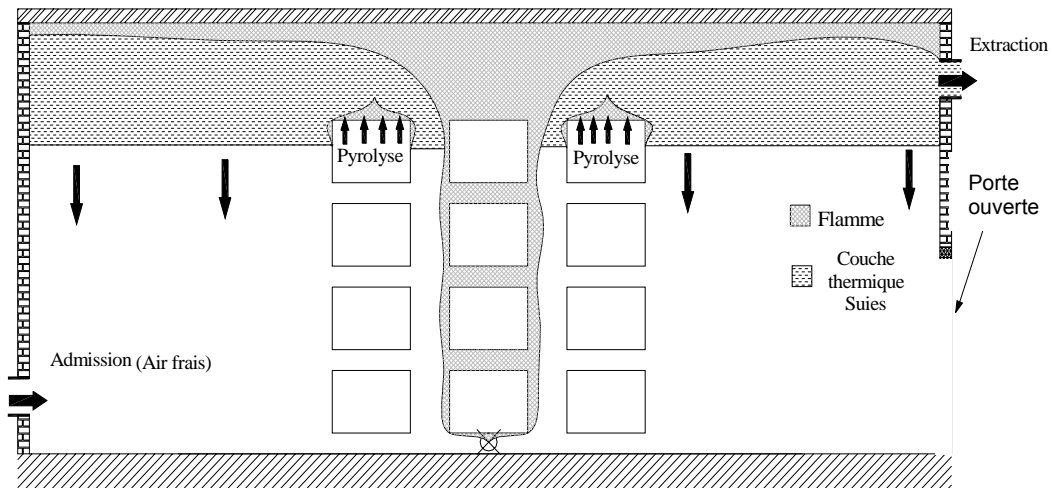


Figure 17 : Descente de la couche chaude, pyrolyse et inflammation des produits au-dessus des racks voisins

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 18).

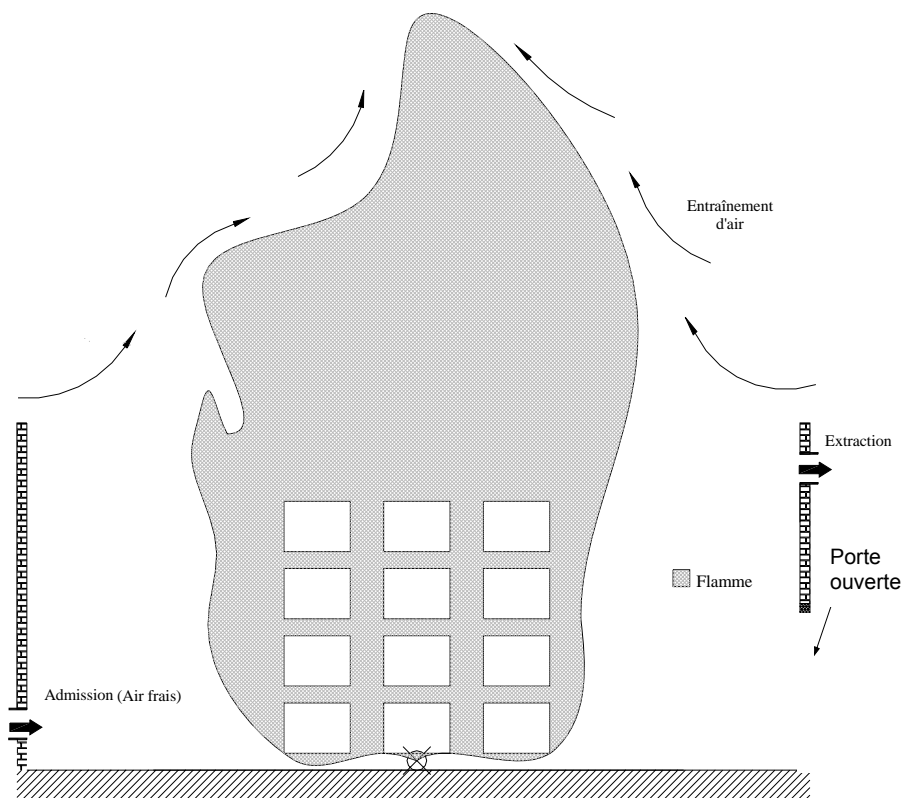


Figure 18 : Après effondrement de la toiture, feu bien ventilé.

5.2 CALCUL DE LA PUISSANCE AU COURS DU TEMPS DE L'INCENDIE

Le calcul de la puissance instantanée produite par l'incendie se fait selon la relation suivante

$$P(t) = \eta \times S_{\text{feu_dev}}(t) \times P_{\text{rack_surfacique}} \times \text{Coef}_{\text{ventil}} + P_{\text{ini}}$$

Où :

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

$P_{\text{rack_surfacique}}$ est la puissance libérée par unité de surface enveloppante des racks

$S_{\text{feu_dev}}(t)$ est la surface en feu à l'instant t donné. Cette valeur dépend de la vitesse de propagation du feu mais également de la quantité d'oxygène apporté à chaque instant. En cas d'apport insuffisant, la surface en feu peut augmenter moins que prévu voire stagner et puis reprendre sa croissance dès que des ouvertures au niveau de la toiture se sont formées. La surface en feu peut également diminuer à partir du moment où les premières palettes commencent à s'éteindre.

$\text{Coef}_{\text{ventil}}$ est un coefficient réducteur dépendant de la ventilation. De la même manière que l'alimentation en air joue sur la surface en feu, ce coefficient influe sur la puissance libérée par une palette et par extension sur la durée de combustion de celle-ci.

P_{ini} est la puissance dégagée lors des tous premiers instants de l'incendie depuis le départ de feu au sol jusqu'à ce que les flammes atteignent le haut du rack.

La Figure 19 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.

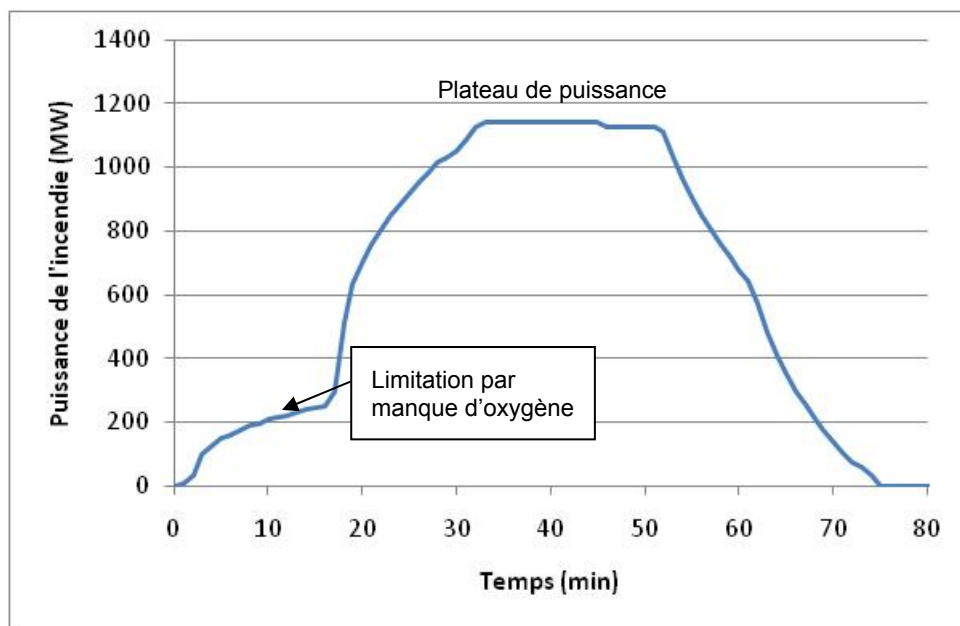


Figure 19 : Evolution calculée de la puissance pour l'essai en grand.

5.3 LOI DE PROPAGATION ENTRE LES DIFFÉRENTS 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)

5.3.1 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 20). 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 21).

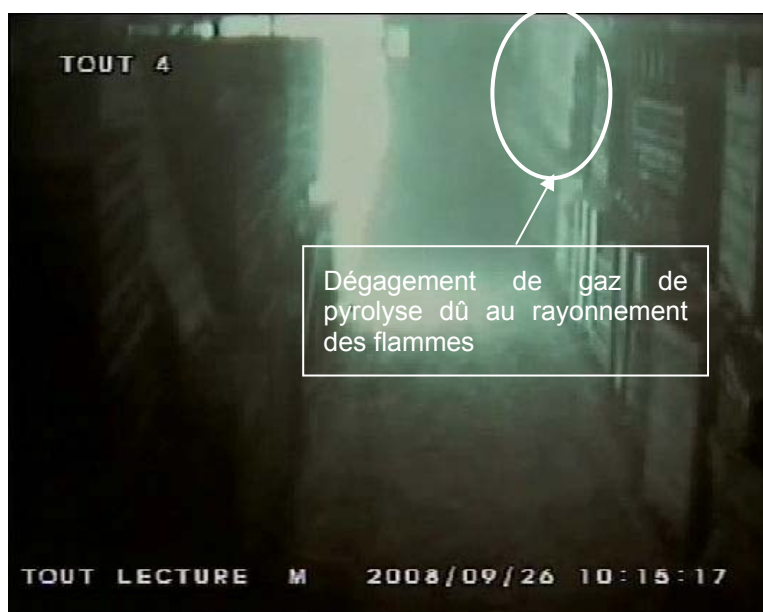


Figure 20 : Pyrolyse des palettes appartenant au rack mitoyen au rack central



Figure 21 : 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 22).

La propagation est supposée se dérouler dans ce cas sous l'effet du flux reçu sur le rack voisin.

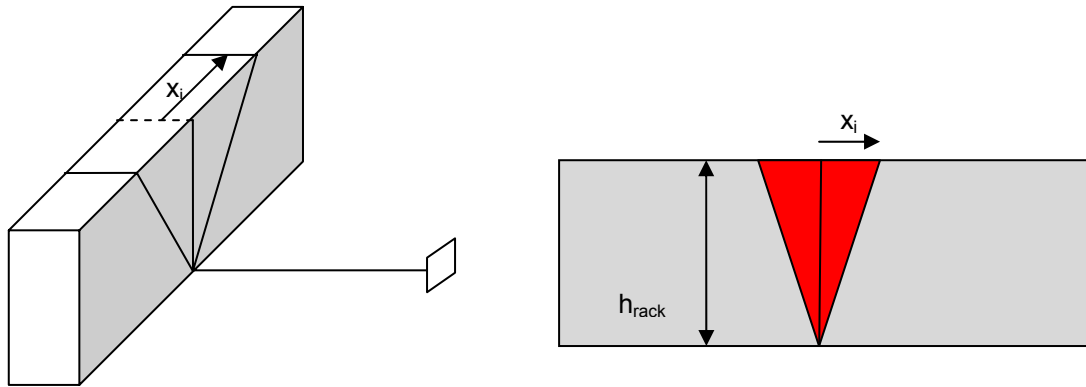


Figure 22 : représentation schématique de la propagation par rayonnement entre rack

Ce flux est calculé en considérant une surface en feu de forme triangulaire d'une émittance de 100 kW/m². Cette surface en feu se situe à une distance à la cible égale à la largeur de l'allée. Il est supposé qu'il y a propagation au rack voisin dès que le flux incident atteint la valeur de 8 kW/m².

Le facteur de forme pour une surface en feu de forme triangulaire est donné par l'expression visible en Figure 23.

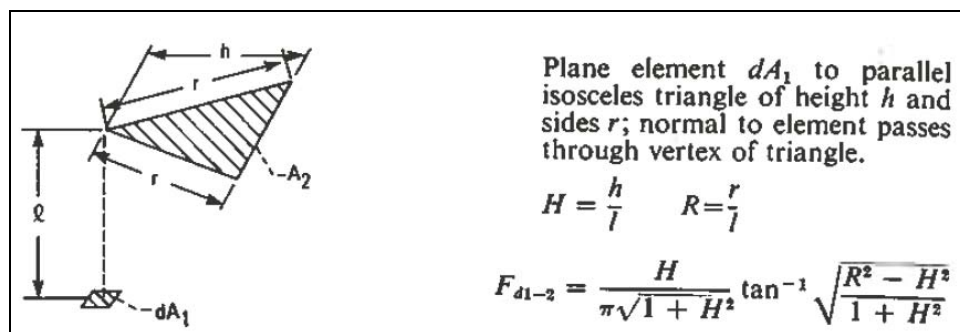


Figure 23 : Expression du facteur de vue pour une surface en feu de forme triangulaire (extrait du *Thermal Radiation Heat Transfer* (R. SIEGEL, J.R. HOWELL)).

Le calcul est fait pour chaque allée dans la méthode et à chaque instant pour s'assurer s'il y a propagation ou non.

5.3.2 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 ouvertures (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 derniers niveaux de stockage (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 (§ 5.5) ou dans le cas de grande surface d'exutoire ou de couverture thermo fusible.

Remarque :

Pour la méthode, le critère de propagation par flash-over retenu est de 250°C car cela constitue une des températures d'inflammation les plus basses identifiées parmi les produits susceptibles d'être stockés (Tableau 11).

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 11 : Température d'inflammation de quelques solides courants.

5.4 PROPAGATION AU SEIN D'UN RACK

5.4.1 PROPAGATION AU SEIN D'UN RACK ALLUMÉ PAR RAYONNEMENT

La propagation a été établie à partir d'observations réalisées lors de différents essais, ceux réalisés lors du projet FLUMILOG ou 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 24 présente les 5 grandes phases de cette propagation :

1. **L'apparition des premières flammes** se situe sur les arrêtes verticales des cartons au niveau de la zone centrale. La propagation du feu s'effectue via le carton et n'a pour le moment lieu que dans cette zone centrale. L'intensité de feu est déjà plus importante aux niveaux 2 et 3 qu'au niveau 1 (le niveau inférieur).
2. **La phase de croissance ascendante** se termine avec la présence de la flamme au sommet et au-dessus du rack. Les faces inférieures des cartons commencent à brûler au niveau de l'axe central. Ce dernier est, à ce stade, le principal vecteur de propagation en jouant le rôle d'une cheminée.
3. **La phase de propagation horizontale** commence par la partie supérieure du stockage. Cette étape dans la propagation du feu amène à la mise en place d'un feu formant un V.
4. **La phase de propagation descendante** est caractérisée par la progression vers les niveaux inférieurs du feu. Celui-ci conserve une forme de V.
5. **L'embrasement complet** est obtenu une fois que la phase descendante est terminée.

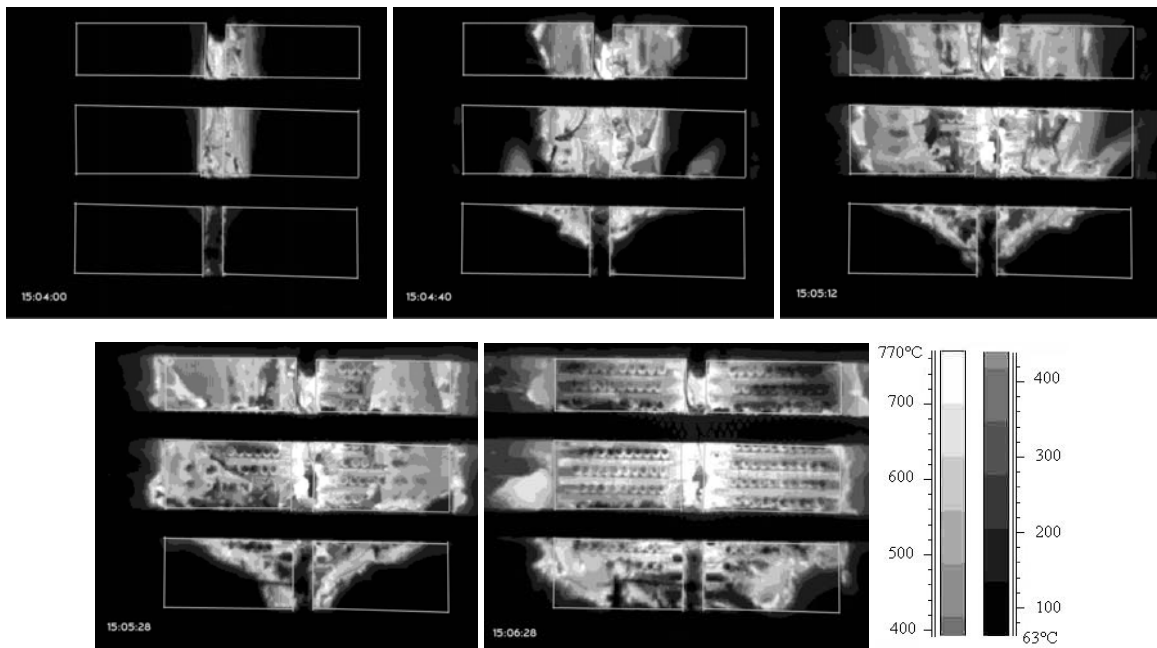


Figure 24 : Les 5 grandes phases de la propagation du feu au sein d'un rack illustrées par des images infrarouge.

Ces différentes phases de propagation au sein d'un rack sont présentées sur les schémas visibles ci-après.

5.4.1.1 PHASE DE PROPAGATION INITIALE DE LA FLAMME

Cette phase de propagation 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 24).

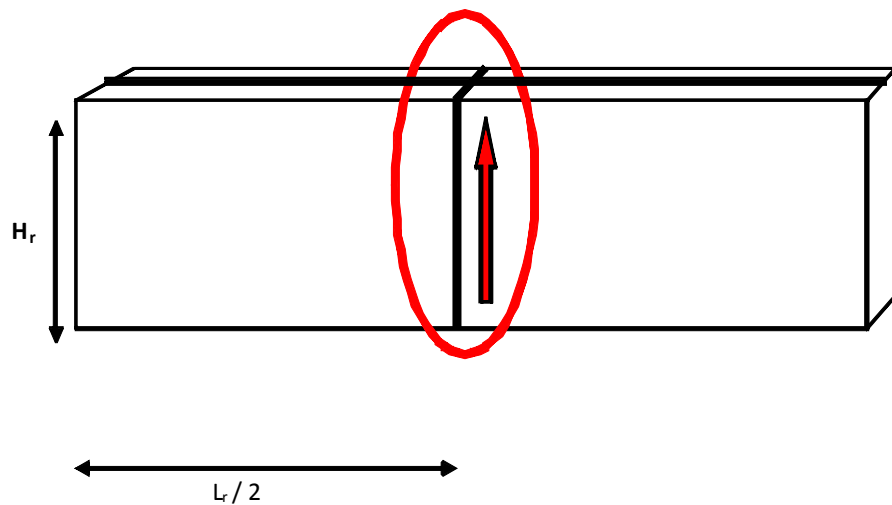


Figure 25 : première phase de propagation dans un rack

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 26 et voir également 3^{ème} image IR de la Figure 24).

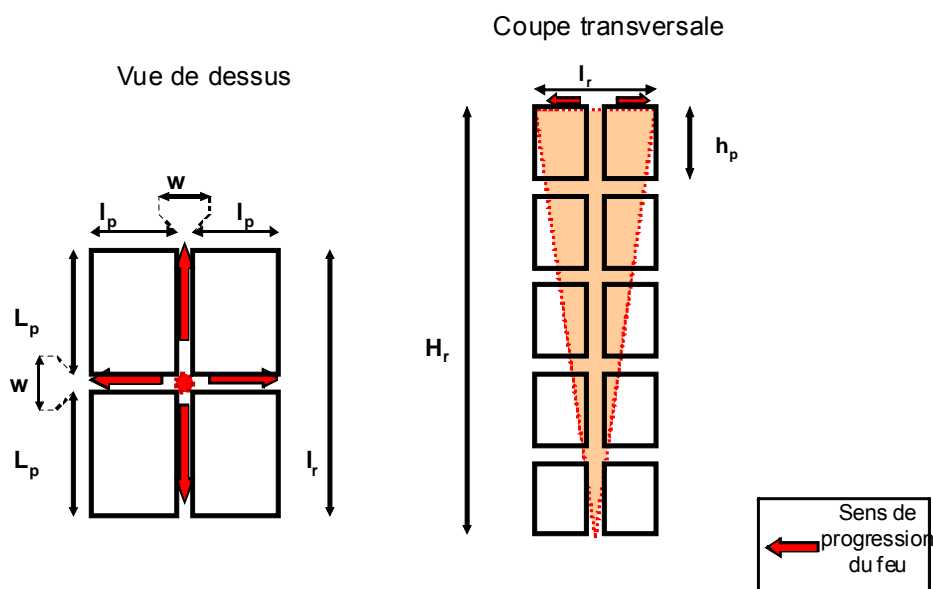


Figure 26 : propagation en largeur dans le rack

5.4.1.2 PHASE DE PROPAGATION DANS LA LONGUEUR DU RACK

Des simulations réalisées avec le logiciel FDS présentent les mêmes phases de propagation dans la longueur de rack que celles observées dans la largeur du rack lors des essais du projet « Caractérisation des feux industriels » (Carrau, 2004). Tout d'abord, une montée rapide de la flamme par effet cheminée (Figure 27) puis, la propagation s'effectue en formant un « V » jusqu'au bout de la rangée de rack (Figure 28) puis le feu descend vers le sol (Figure 29). Le schéma de la Figure 30 illustre également ces différentes phases.

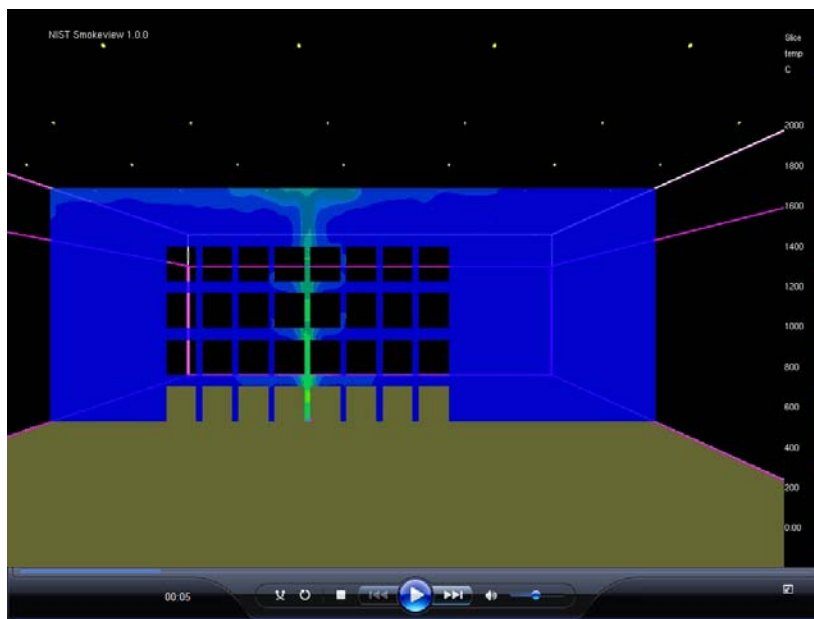


Figure 27 : effet cheminée.

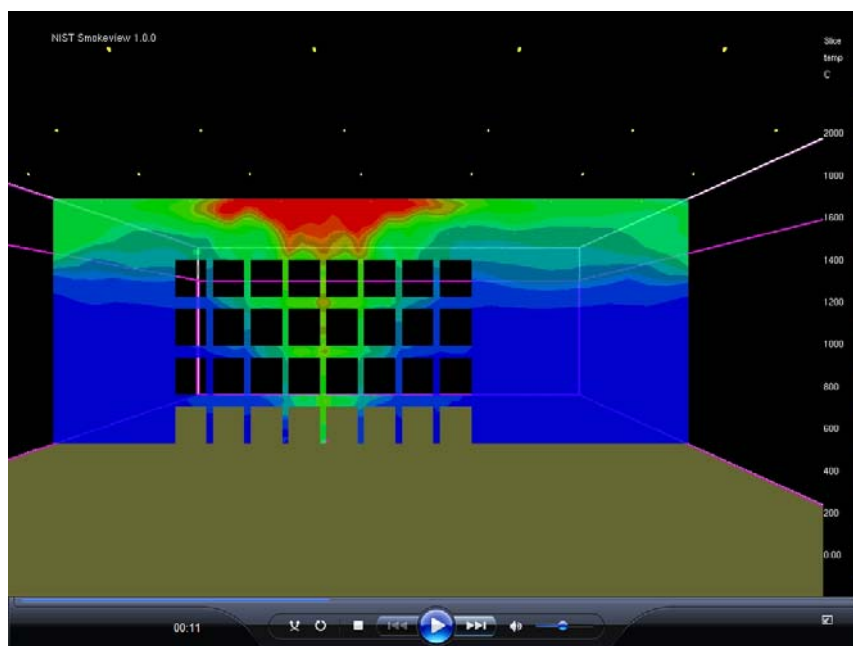


Figure 28 : Propagation en « V ».

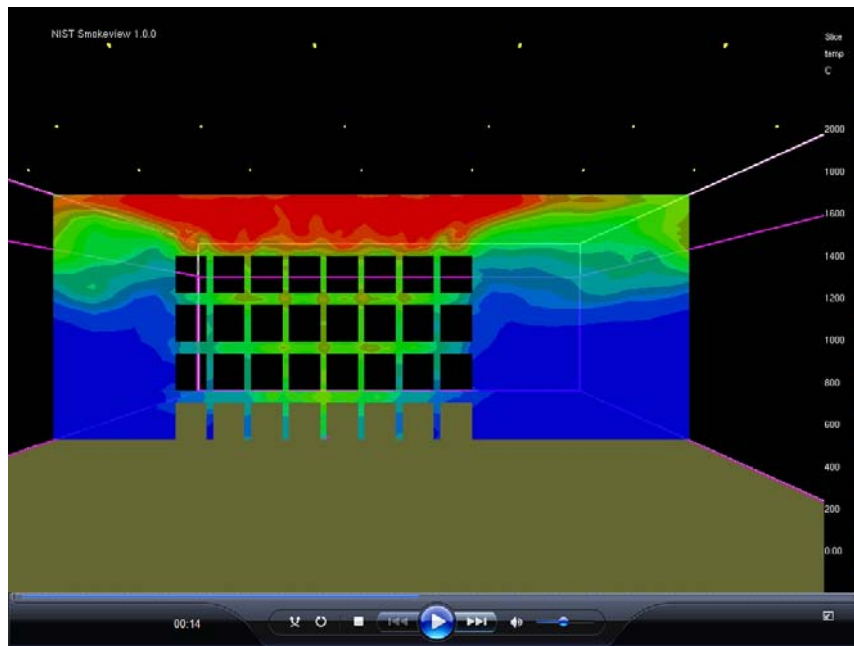


Figure 29 : Descente du feu vers le sol.

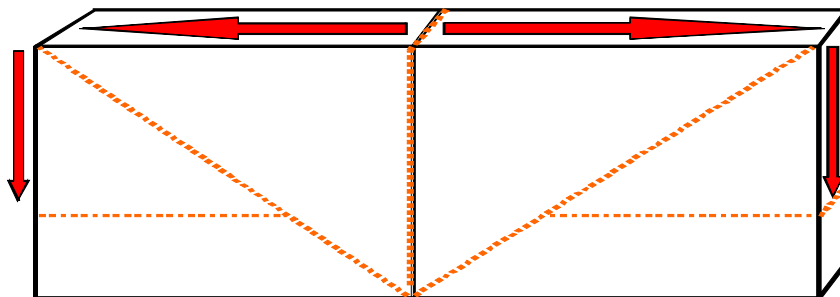


Figure 30 : schéma de propagation dans un rack.

Allumage en partie supérieure

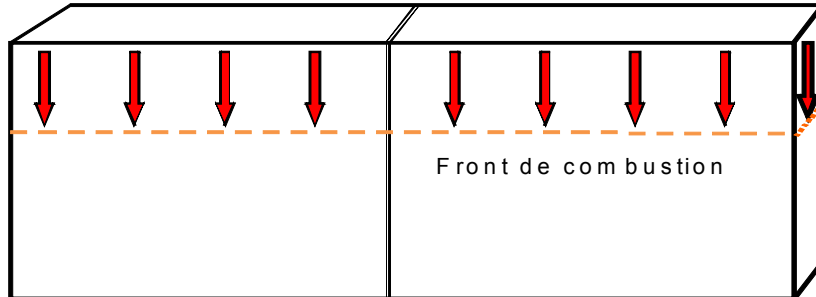


Figure 31 : schéma de propagation dans le cas d'une propagation par flash-over

5.5 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 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 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 12) 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.

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 12 : Influence de la nature de la toiture sur la cinétique d'effondrement.

5.6 LIMITATION DE LA PROPAGATION EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN OXYGÈNE

L'objectif de ce calcul est de limiter la vitesse de propagation dès lors qu'il n'y a pas assez d'oxygène au niveau du foyer. Cette réduction peut également se traduire par un allongement localisé de la durée de combustion d'une palette.

Le principe du calcul est le suivant : la vitesse de propagation ne dépend que du combustible (température d'inflammation et chaleur de combustion) dès lors qu'il y a suffisamment d'oxygène. Si cette hypothèse est facilement vérifiée au début de l'incendie, elle peut ne plus l'être dès que la surface en feu a augmenté.

Dès lors que la propagation du feu dépendra de la quantité d'air susceptible d'être présente au niveau du foyer, le principe du calcul est le suivant à chaque pas de temps :

- Détermination de l'accroissement maximal de la surface de flamme en faisant l'hypothèse d'une quantité d'oxygène suffisante,
- Calcul de la quantité d'oxygène disponible
- Bilan des quantités entrantes et sortantes de la cellule en fonction de la quantité de fumées produites par cet accroissement de surface en feu (air entrant par les ouvertures des faces latérales, fumées sortant par les exutoires ou en raison de l'ouverture du toit)
- Si la quantité d'oxygène est insuffisante, la propagation est réduite jusqu'à ce que la surface en feu soit compatible avec la quantité d'oxygène apportée. La nouvelle position du front de flamme est recalculée et le calcul peut être poursuivi pour ce pas de temps.

Les différentes étapes sont schématisées sur la figure suivante :

- A l'enveloppe est encore intègre,
- B l'enveloppe de la cellule présente des ouvertures : exutoires ouverts, toit qui commence à s'effondrer.

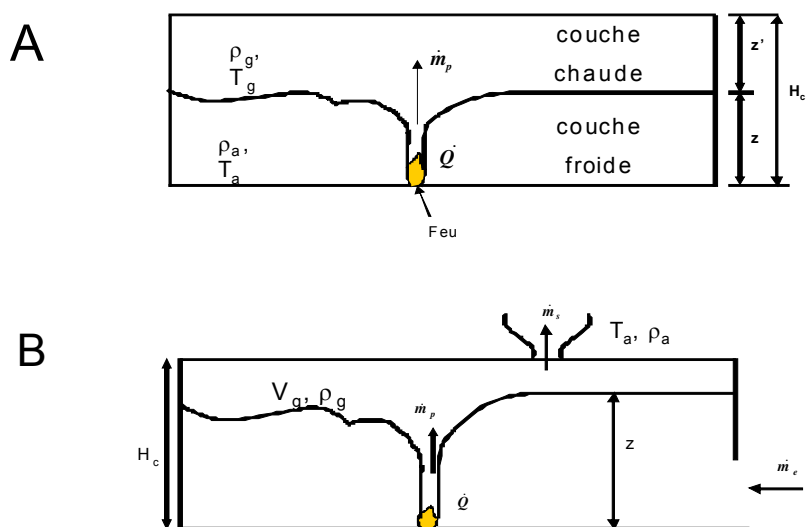


Figure 32 : Principe de combustion suivant l'intégrité de l'enveloppe.

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 33 et logigramme en Figure 34).

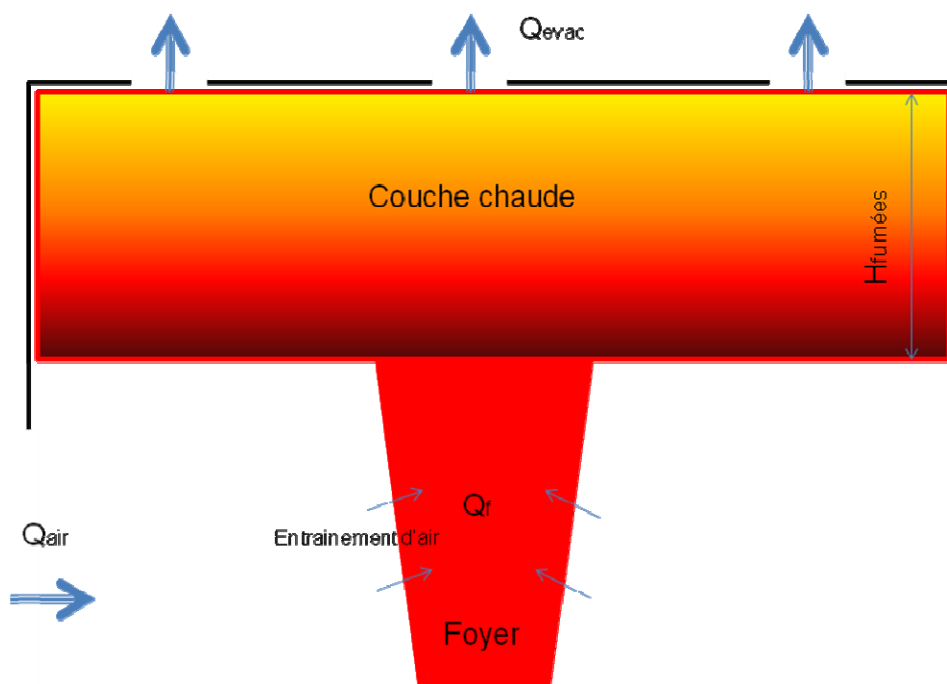


Figure 33 : Schéma du bilan sur la couche chaude.

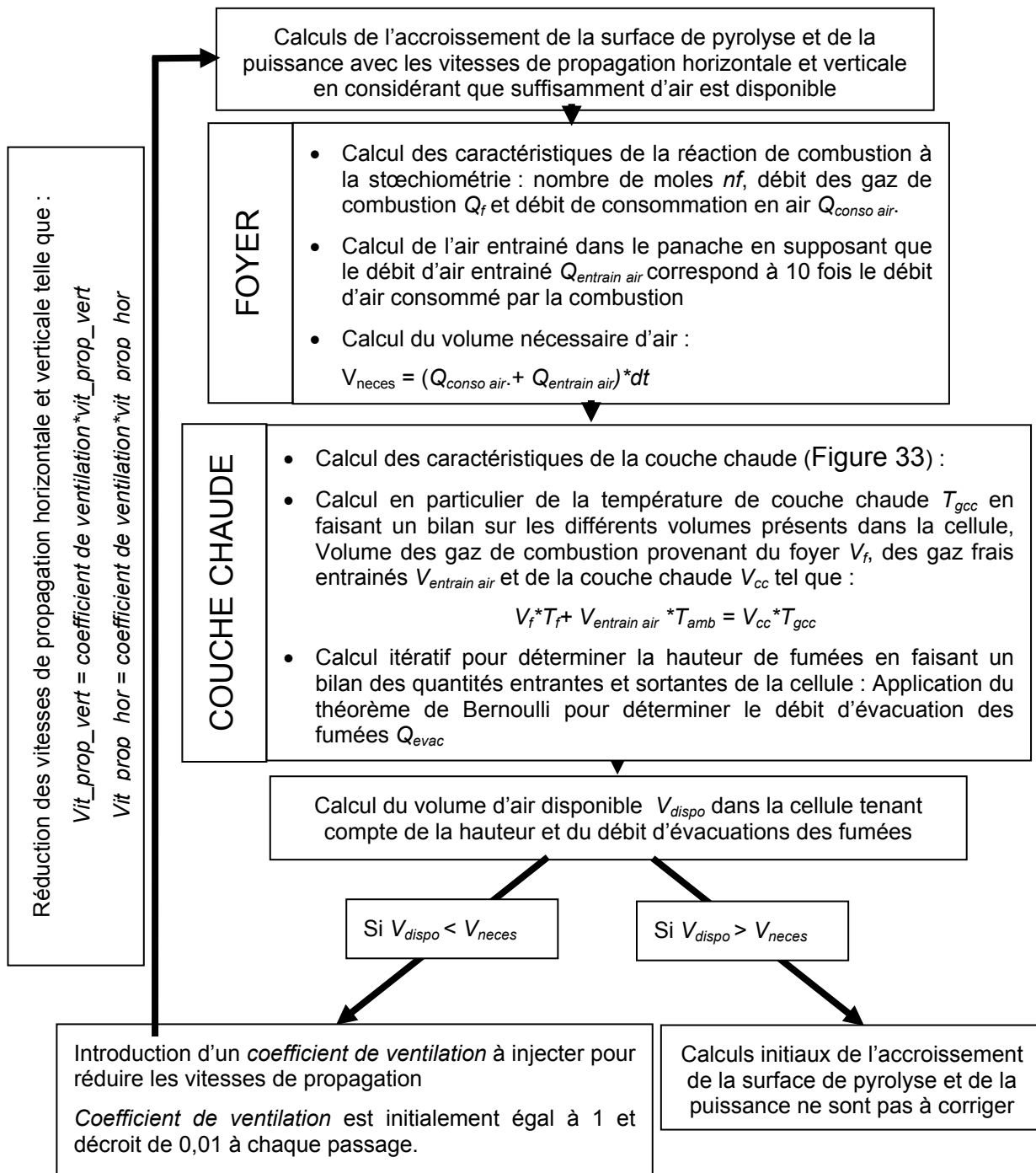


Figure 34 : Logigramme du calcul de limitation de la propagation de l'incendie en raison du manque d'oxygène.

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 4.1.4.2 ($P_{réf}$, $T_{comb_pal_réf}$). 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 une loi d'ordre deux (Figure 36). 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 :

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

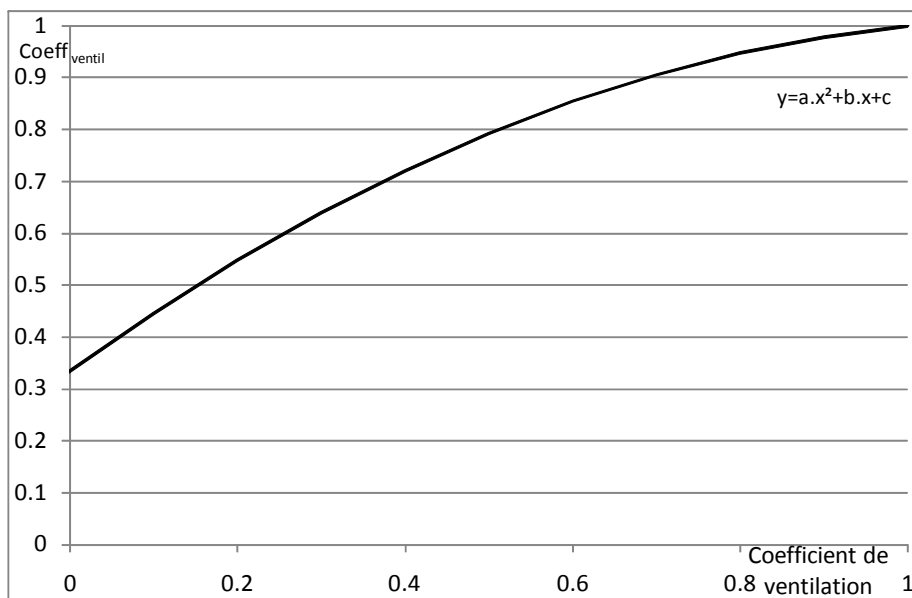


Figure 35 : Evolution du coefficient de pondération en fonction du coefficient de ventilation

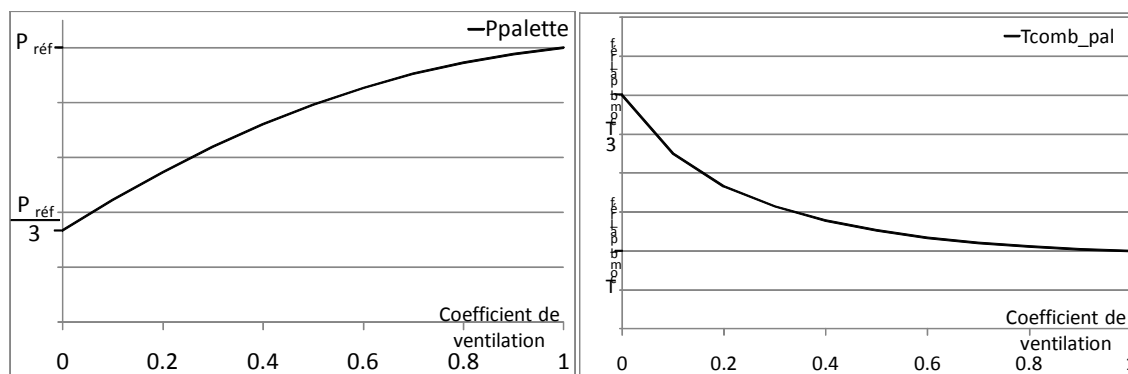


Figure 36 : puissance libérée et temps de combustion d'une palette

5.7 SYNTHÈSE

A ce stade de la méthode, la position du front de flamme est connue. Il est alors possible de connaître la puissance de l'incendie ainsi que la surface de toiture ouverte qui est susceptible de laisser passer les flammes.

L'objet du chapitre suivant est de calculer les caractéristiques des flammes à partir de ces données et ensuite d'en évaluer les flux thermiques sur les cibles.

6. CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DES FLAMMES

Pour pouvoir calculer les effets sur l'environnement dus aux flammes, il est nécessaire de définir certaines propriétés des flammes. Le parti a été pris de retenir le modèle de flamme solide, pour utiliser ce modèle, il faut connaître :

- Leur forme,
- Leur hauteur,
- Leur position,
- Leur émittance.

Les paragraphes suivants précisent les hypothèses retenues pour la détermination de toutes ces grandeurs.

6.1 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 37 reproduisant les images de l'essai 2 à moyenne échelle.





Figure 37 : Formes et surfaces des flammes lors de l'essai 2 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 des essais de la surface de flamme apparente sur chaque face de la cellule. La Figure 38 présente pour l'essai 2 l'évolution de la surface de flamme S_f côté Est ainsi que le flux radiatif à différentes distances de la cellule. Un rapport flux/surface de flamme a ensuite été calculé pour chaque distance de mesures de flux (Figure 39).

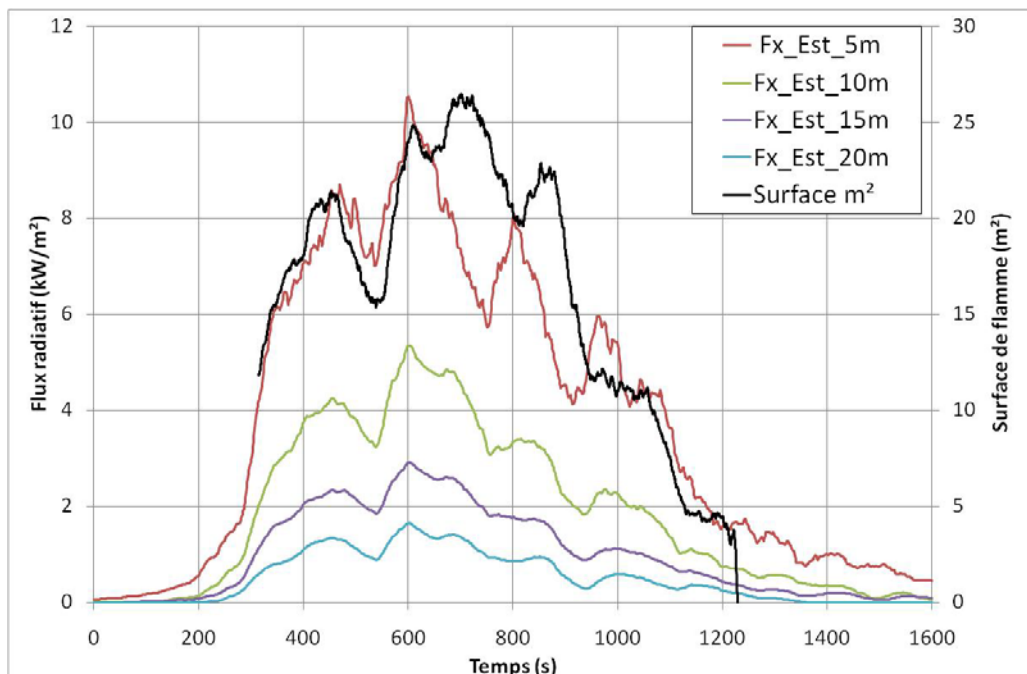


Figure 38 : Evolution du flux radiatif et de la surface de flamme au cours du temps.

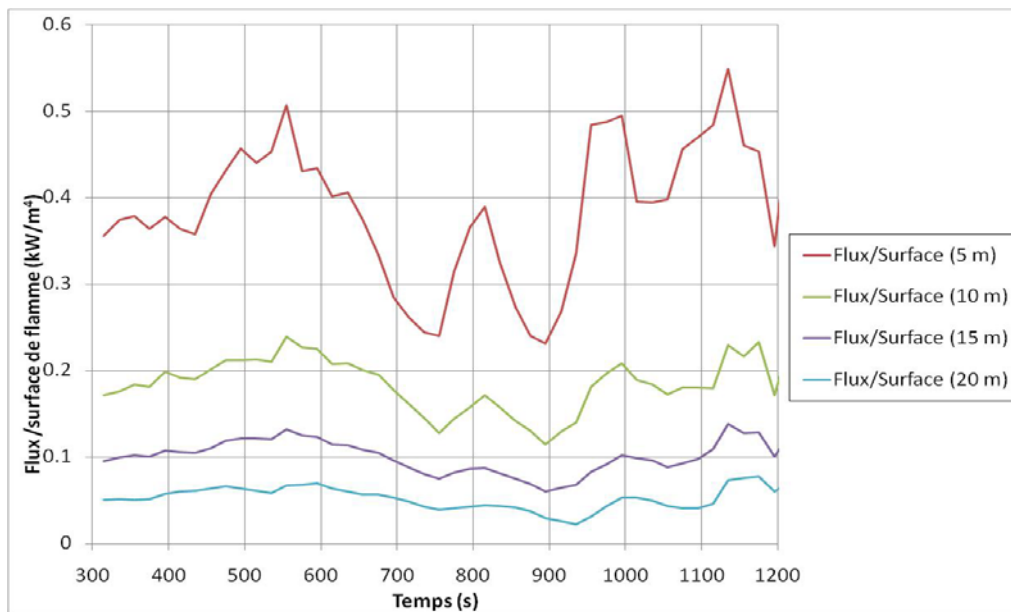


Figure 39 : Rapport Flux/surface de flamme à différentes distances.

Après analyse des résultats, il s'avère que ce rapport flux/surface de flamme est quasi-constant à une distance donnée dans le champ moyen et lointain.

Pour mémoire, le flux radiatif ϕ s'écrit : $\phi = \phi_0 \tau F$

Où τ le facteur d'atténuation atmosphérique est constant à une distance donnée,

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

ϕ_0 l'émittance dépend du combustible (puissance dégagée).

Si le rapport flux/surface de flamme est constant, alors il en est de même du ratio $\frac{\phi_0 F}{S_f}$. Il est donc important que les valeurs des deux paramètres, émittance et

surface de flamme soient en concordance. Pour l'essai 2, côté Est, la surface de flamme estimée est de 24 m², valeur qui correspondrait au vu des flux mesurés à une émittance moyenne de 110 kW/m². L'émittance étant déterminée, différentes formes de flamme ont ensuite été testées afin de déterminer si ce paramètre possédait une influence ou non.

A surface de flamme identique, la flamme a été considérée de 3 façons :

- Cas 1 : flamme de forme carrée,
- Cas 2 : flamme de forme rectangulaire couvrant toute la largeur de la face,
- Cas 3 : flamme de forme rectangulaire dont la hauteur apparente est fixe et égale à la hauteur de la cellule.

La Figure 40 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.

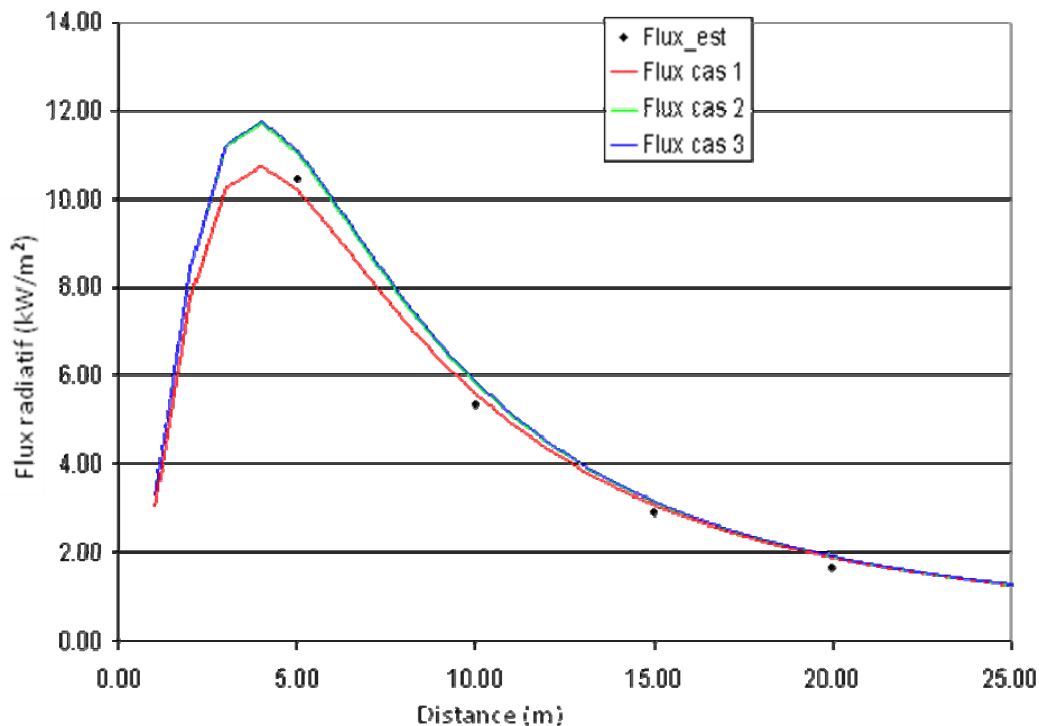


Figure 40 : Evolution des flux radiatifs modélisés pour les 3 configurations de forme de flamme.

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 6.2.

6.2 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 13.

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 13 : Corrélations étudiées, classées par ordre chronologique.

Elles sont exploitées en utilisant l'hypothèse d'un débit calorifique surfacique indépendant de la taille de la nappe. La puissance adimensionnée Q^* peut se mettre sous la forme :

$$Q^* = P_s \cdot \frac{\pi}{4 \times 1110 \sqrt{D}} \simeq \frac{P_s}{1413 \sqrt{D}}$$

Où P_s : Puissance surfacique (kW/m²) est égale à la puissance de l'incendie à l'instant t divisée par la surface en feu au sol à cet instant.

Cette expression est alors introduite dans les corrélations étudiées afin d'exprimer la hauteur H des flammes en fonction du diamètre D de la nappe telle que :

$$\frac{H}{D} = f(Q^*) \Leftrightarrow H = D \times f\left(\frac{P_s}{1413 \sqrt{D}}\right)$$

Pour les corrélations en Q^{*2} , ceci implique que la hauteur de flamme ne dépend pas du diamètre de la nappe. Ainsi, pour la corrélation de Zukoski par exemple, la hauteur des flammes devient indépendante de la taille de la nappe lorsque celle-ci atteint une certaine valeur. La Figure 41 montre un exemple d'application de la méthode pour une puissance surfacique de 750 kW/m². La hauteur des flammes y est représentée en fonction de la taille de la nappe.

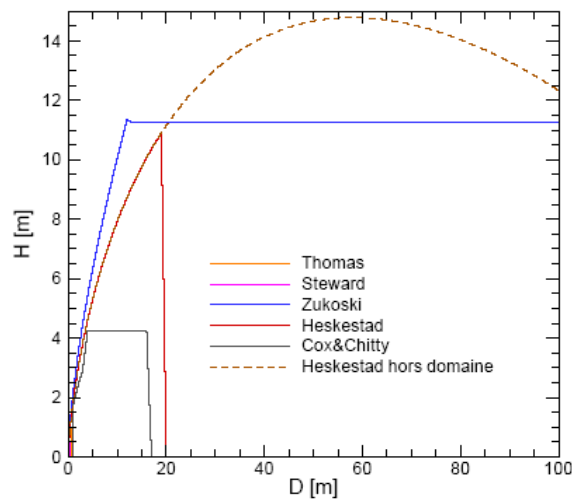


Figure 41 : Hauteurs de flamme fonction du diamètre pour les 5 corrélations étudiées.

La corrélation de Zukoski couvre l'ensemble du domaine de valeur de Q^* typiquement rencontré lors d'un feu d'entrepôt, ce qui n'est pas le cas, par exemple, de la corrélation d'Heskestad.

En se basant sur cette corrélation, il est donc possible de donner une formule très simple pour estimer la hauteur des flammes issues d'un feu d'entrepôt. Lorsque la puissance Q^* est inférieure à 0.15, la hauteur de flamme est indépendante de la taille de la nappe. Lorsque Q^* est supérieure à 0.15, le rapport H/D varie comme $Q^{*2/3}$. Il est considéré que cette approche est valide même pour $Q^* > 1$, afin d'obtenir une valeur proche de la corrélation de Thomas pour les valeurs de Q^* jusqu'à environ 10. Une valeur supérieure à 10 est jugée non représentative d'un feu d'entrepôt.

$$H = \min \left[\left(\frac{P_S}{223} \right)^2 ; 0.026(P_S D)^{2/3} \right] \quad \text{avec} \quad P_S < 14130\sqrt{D}$$

Dans cette expression, P_S désigne la puissance surfacique en kW/m² 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 42 donne une représentation de cette formule.

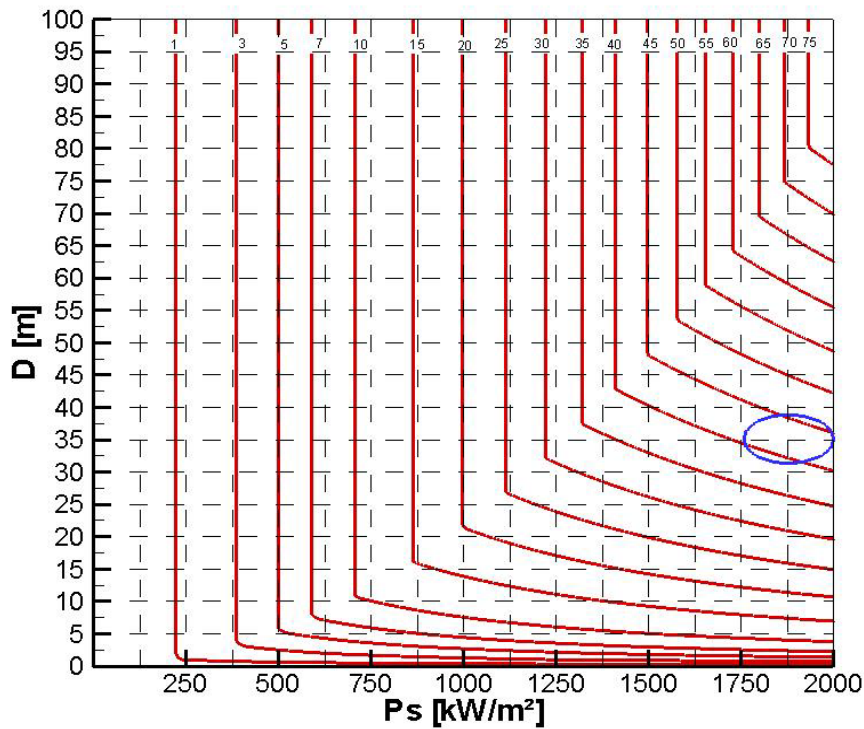


Figure 42 : Hauteur (en mètres) des flammes en fonction du diamètre de la nappe et de la puissance surfacique

Cette formule a ensuite été bornée par l'essai à échelle 1 pour lequel les flammes ne s'élevaient pas au-dessus du stockage à plus de 1,5 fois la hauteur de stockage. Au final, la hauteur globale de la flamme se définit de la façon suivante :

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

Où *Hauteur* : Hauteur de stockage (m).

6.3 PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DU VENT ET POSITION DE LA FLAMME

La corrélation permettant de déterminer l'angle d'inclinaison ξ d'une flamme en cas de vent est la corrélation de Welker et Sliepcevic, présentée ci-dessous :

$$\frac{\tan \xi}{\cos \xi} = 3,3 \times (Fr)^{0,8} \times (Re)^{0,07} \times (2,2)^{-0,6}$$

Avec *Fr*: Nombre de Froude

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

Re: Nombre de Reynolds

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

μ_{air} : viscosité dynamique de l'air ambiant ($1.9 \times 10^{-5} \text{ (kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1})$)

u_w : Vitesse du vent (m/s).

Le choix a été fait de ne pas raccourcir artificiellement la hauteur de flamme en cas de vent comme ceci est fait pour la corrélation de Thomas (avec vent). C'est-à-dire qu'avec ou sans vent, la valeur de la hauteur de flamme sera toujours la même. La Figure 43 représente le schéma de la flamme inclinée.

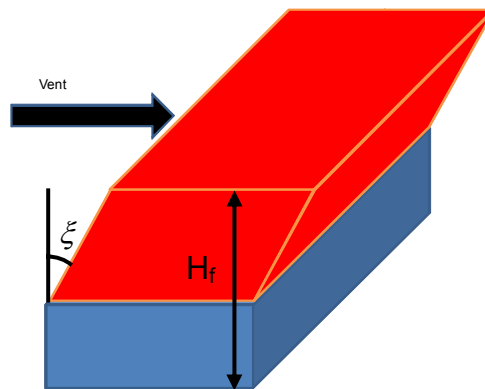


Figure 43 : Schéma de la flamme inclinée par le vent.

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 44 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 7.3.2).

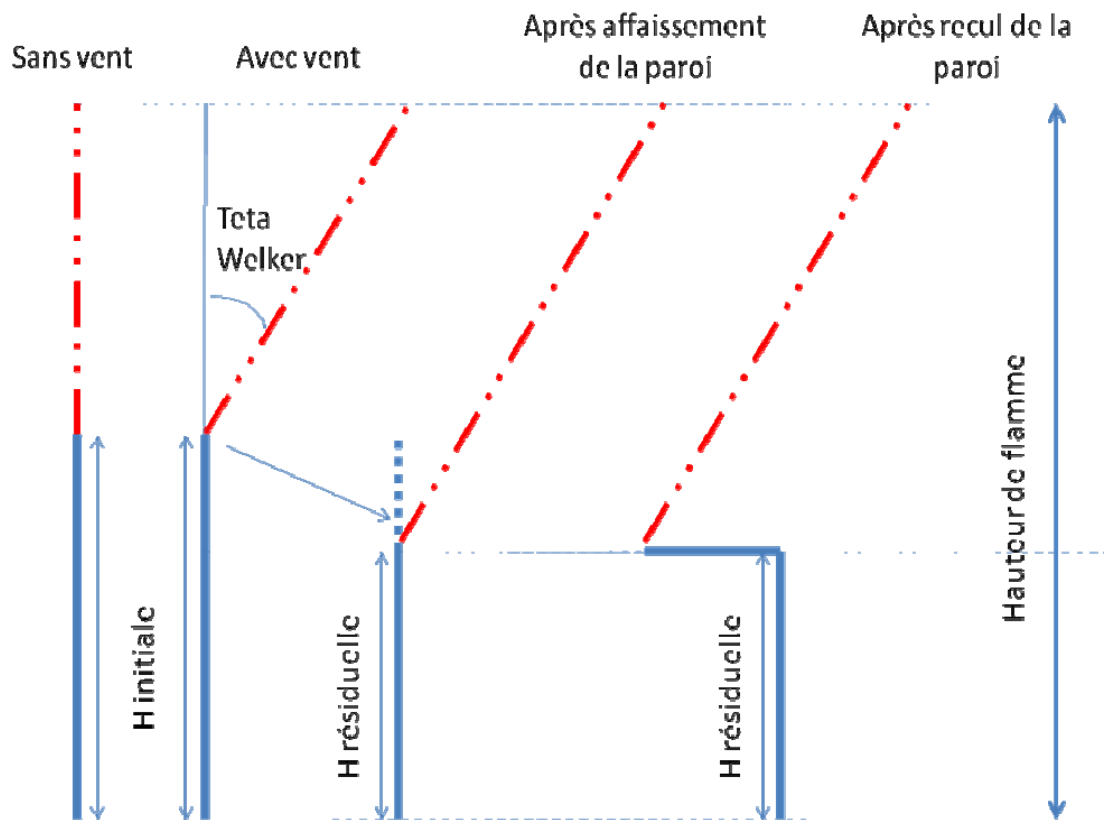


Figure 44 : Flamme soumise à différentes configurations.

6.4 FRACTION RADIATIVE ET ÉMITTANCE DES FLAMMES

La fraction radiative et l'émittance 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 pour le pouvoir émissif :

$$E_{moy} = 140.e^{-0.12D} + 20.(1 - e^{-0.12D})$$

et la corrélation de Thomas pour la hauteur de flamme par exemple si on souhaite calculer la fraction radiative du feu. La fraction radiative s'écrit telle que :

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

Où la surface enveloppe de flamme $S_{flamme} = \pi D H$ avec $H = 42 D \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0.61}$

Le calcul intermédiaire donne :

$$\sigma_R = \frac{168 (140.e^{-0.12D} + 20.(1 - e^{-0.12D}))}{\dot{m}''^{0.39} \Delta H_C D^{0.305} (\rho_{air} \sqrt{g})^{0.61}}$$

Le calage de la fraction radiative a été fait à l'aide des résultats de l'essai FLUMILOG à grande échelle et, en recherchant le coefficient à appliquer dans la relation précédente. On obtient la relation suivante qui est utilisée pour les feux de solides :

$$\sigma_R = \frac{0.01251732 (140.e^{-0.12D} + 20.(1 - e^{-0.12D}))}{D^{0.305}}$$

La Figure 45 présente la courbe d'évolution de la fraction radiative en fonction du diamètre équivalent intégrant le point de raccordement de l'essai en grand.

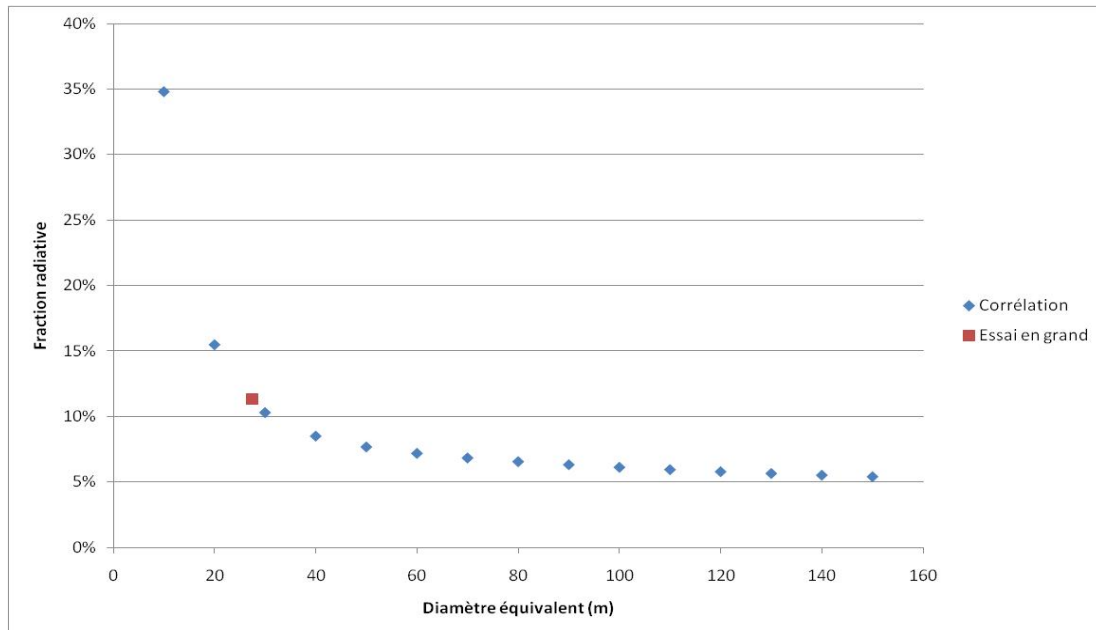


Figure 45 : Evolution de la fraction radiative en fonction du diamètre équivalent.

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.

7. LE CALCUL DES EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT

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. Rappelons la relation qui permet de calculer le flux radiatif :

$$F = \tau \cdot f \cdot E \quad \text{où}$$

τ : atténuation atmosphérique

f : facteur de forme

E : émittance

Le facteur de forme f dépendant de la distance, le flux thermique F dépend donc également de la distance entre la cible et la flamme.

Les grandeurs qui n'ont pas été calculées jusqu'à présent sont le facteur de forme et la transmittivité de l'atmosphère. Les paragraphes suivants détaillent le mode de calcul de ces paramètres.

7.1 LA TRANSMITTIVITÉ DE L'AIR

Au cours du GT liquides inflammables, une étude comparative des différentes corrélations de transmittivité a été réalisée. Le lecteur pourra idéalement se reporter à la note technique annexée à la Circulaire du 31/01/2007 dont les conclusions sont brièvement reprises ici.

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

- Corrélation de Brzustowski et Sommer :

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

- Corrélation de Bagster :

$$\Gamma(r) = 2,02 \cdot (P_{\text{VAP}(H_2O)} \cdot r)^{-0,09}$$

- Corrélation de Lannoy

$$\Gamma(r) = 0,33 + 0,67 \exp(-0,0002 \cdot w \cdot r)$$

- Corrélation de Wayne

$$\begin{aligned} \Gamma(r) = & 1.006 - 0.017 \log X(H_2O) - 0.2368 (\log X(H_2O))^2 \\ & - 0.03188 \log X(CO_2) + 0.001164 (\log X(CO_2))^2 \end{aligned}$$

Où : $X(H_2O) = r \cdot HR \cdot P_{\text{VAP}(H_2O)} \cdot (288.73/T)$

$$X(CO_2) = r \cdot 273 \cdot t$$

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

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

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

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

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

Pour une humidité et une température donnée, la Figure 46 présente les écarts existants entre les différentes corrélations.

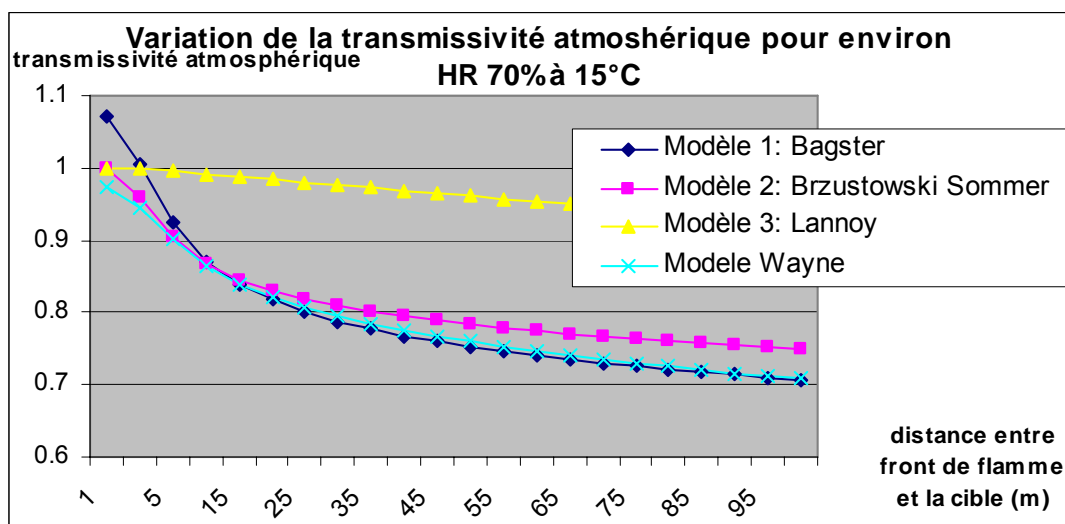


Figure 46 : Graphique comparatif des corrélations de transmissivité.

Rappelons qu'en champ proche (pour des distances inférieures à 10 m), ces modèles ne sont pas valides. Comme le montre la Figure 46, les écarts entre les corrélations à humidité et température données sont peu significatifs hormis pour la corrélation de Lannoy, utilisée dans les formules réglementaires de l'IT 89, qui donne les valeurs de transmissivité les plus importantes.

Finalement, le choix s'est porté sur la corrélation de Bagster qui est intégrée dans la feuille de calcul « effets thermiques » annexée à la Circulaire du 31/01/2007 et, utilisée, entre autres, par le TNO, DNV (Phast) et l'UFIP.

7.2 LE FACTEUR DE VUE

L'approche communément retenue avant FLUMILOG consistait à considérer deux cibles élémentaires : l'une horizontale et l'autre verticale. Ce choix découle du fait qu'une cible humaine (sa tête) se compose de surfaces approximativement horizontales et verticales. Deux flux sont donc calculés et une norme est ensuite appliquée pour obtenir une valeur unique. Cette valeur correspond dimensionnellement à un flux mais n'en est pas un physiquement.

A titre d'exemple, soit la configuration ci-dessous :

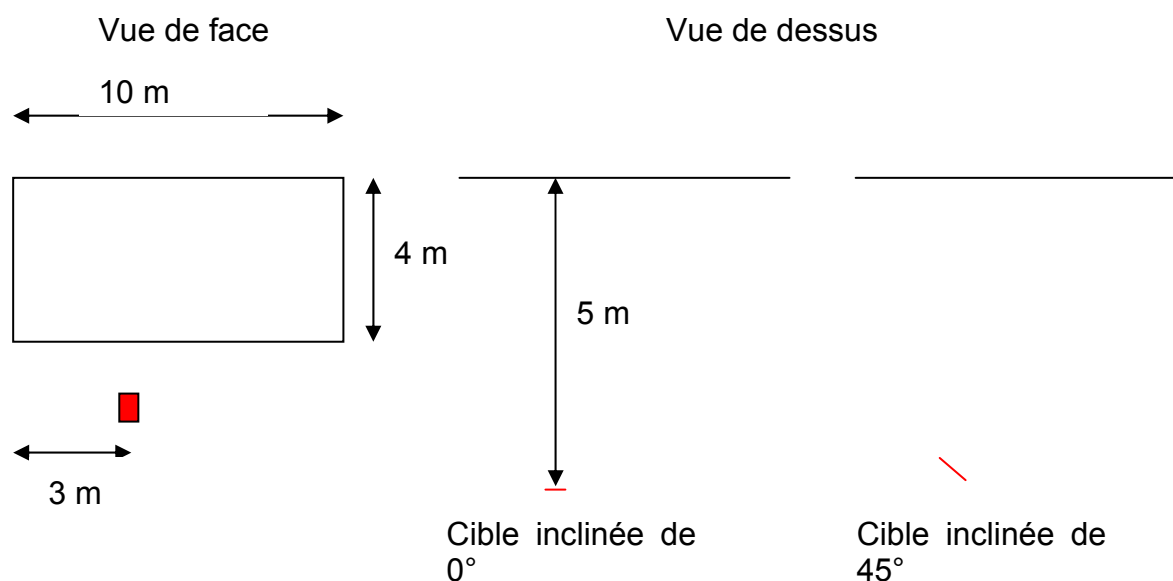


Figure 47 : schéma d'une surface émettrice verticale et d'une cible.

Le carré rouge représente la cible élémentaire. Le facteur de forme varie en fonction de l'angle de la cible et donne la courbe de la Figure 48. Le maximum est obtenu pour un angle de 11° et vaut 0,235. Cette valeur est différente de celle obtenue en prenant la norme des cas à 0° et à 90° .

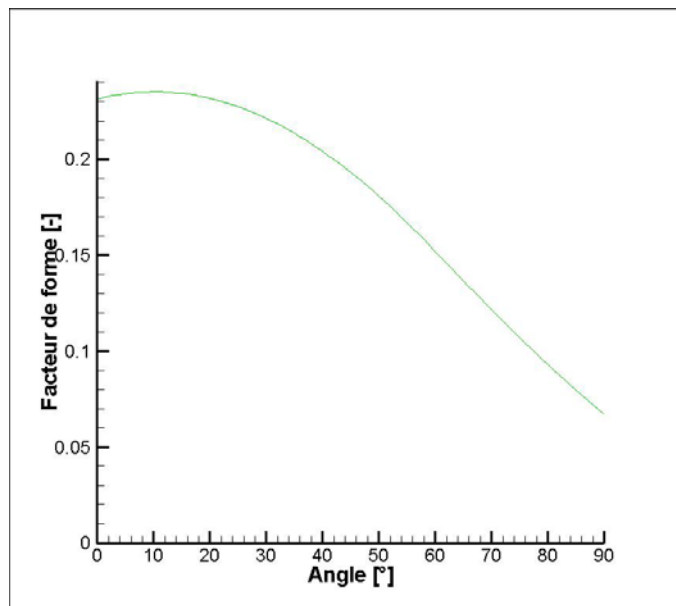


Figure 48 : facteur de forme en fonction de l'angle d'inclinaison

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

- la flamme est inclinée par rapport à la verticale,
- l'entrepôt comporte des parois obliques (entrepôt non rectangulaire),
- l'ensemble cible verticale – cible horizontale voit plusieurs surfaces émettrices (Figure 49).

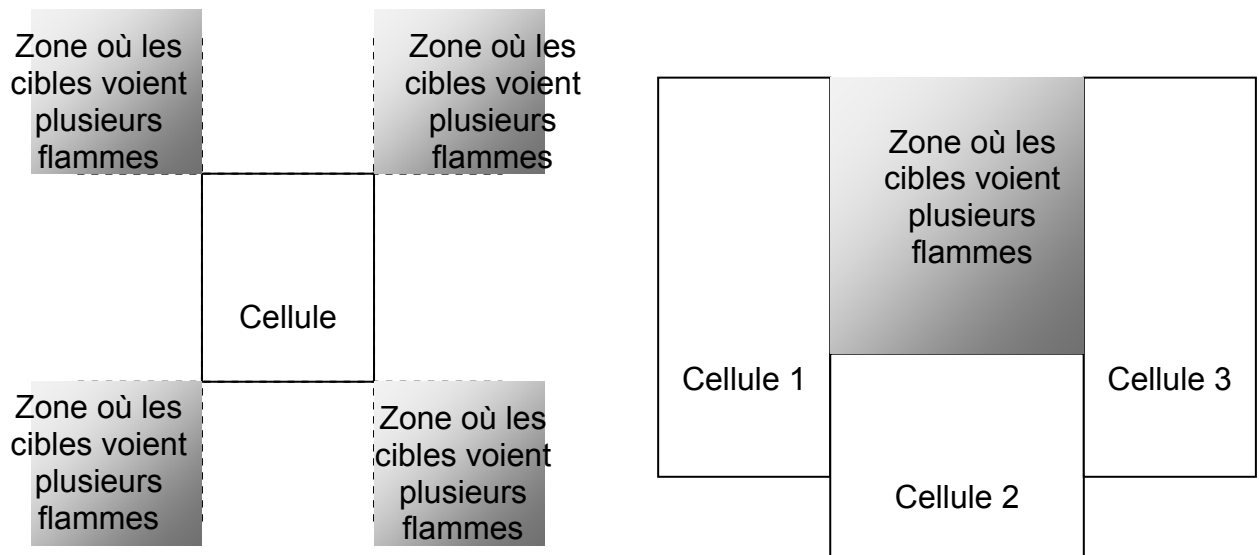


Figure 49 : exemples de configuration

La multitude des configurations envisageables nous a donc amené à étendre l'approche précédente et à considérer une cible élémentaire de type cube. Ainsi, quelle que soit la position de la cible et des cellules, elle est toujours capable de voir les surfaces émettrices. Le calcul du flux reçu se fait donc de la manière suivante :

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

De plus, le facteur de vue est calculé soit par une formule analytique soit à partir d'une intégrale double réalisée sur tout le domaine de la flamme. Le mode de calcul par intégrale double est choisi notamment dans le cas d'écrans thermiques déportés tels que les merlons ou encore les déports dus à la zone de préparation.

7.2.1 FACTEUR DE VUE ANALYTIQUE

Cette formule de facteur de vue est générique et permet de traiter les cas avec et sans vent pour plusieurs positions de cibles possibles (notamment, verticale, horizontale et latérale).

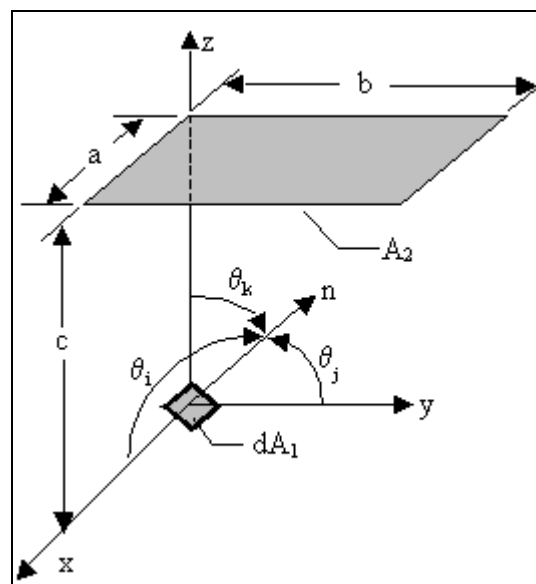


Figure 50 : Schéma pour le calcul analytique du facteur de vue.

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

Où $A=a/c$; $B=b/c$

Cette formule ne peut pas être utilisée lorsque le plan formé par la cible coupe la flamme. Si tel est le cas, le facteur de vue est déterminé par intégrale double.

7.2.2 FACTEUR DE VUE PAR CALCUL INTÉGRAL

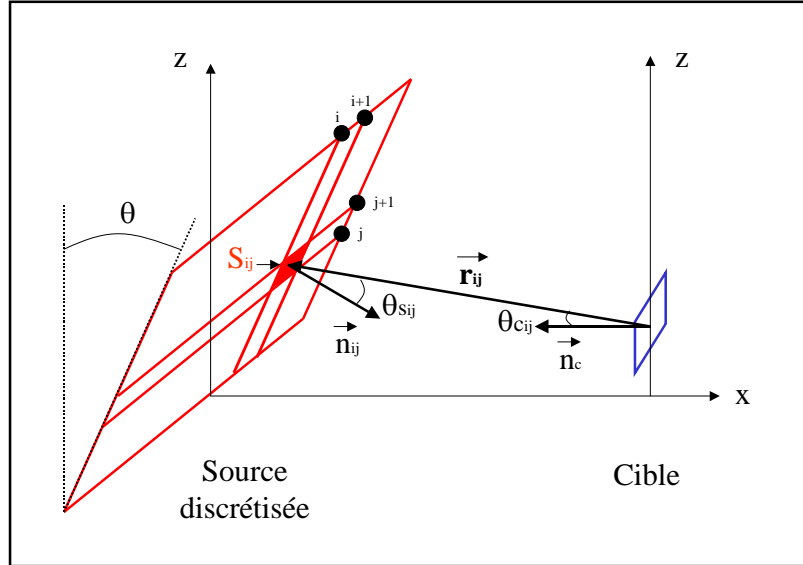


Figure 51 : Schéma pour le calcul intégral du facteur de vue avec la cible verticale.

Pour déterminer le facteur de vue par un calcul d'intégrales, les positions des surfaces planes représentant le front de flamme et la cible, sont totalement déterminées par les paramètres suivants :

- Inclinaison du front de flamme par rapport à la verticale,
- Distance horizontale de la cible par rapport à la base du front de flamme,
- Hauteur et abscisse de la cible par rapport à la base du front de flamme.

La surface source (flamme) est discrétisée en $n \times m$ surfaces élémentaires, puis un Facteur de Vue (cible verticale) est calculé sur chacune de ces surfaces. Le Facteur de Vue (cible verticale) final recherché correspond à la somme de ces derniers telle que :

$$F_{S \rightarrow C}^V = \sum_{ij} F_{S_{ij} \rightarrow C}^V = \sum_{ij} \frac{\cos \theta_{S_{ij}} \cdot \cos \theta_{C_{ij}} dS_{ij}}{\pi \cdot r_{ij}^2}$$

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

En procédant de même pour déterminer le facteur de vue avec une cible horizontale et latérale, on obtient respectivement $F_{S \rightarrow C}^H$ et $F_{S \rightarrow C}^L$.

Quelle que soit la méthode utilisée, analytique ou intégrale, la cible élémentaire est matérialisée par 5 faces susceptibles de recevoir un flux : 2 faces latérales (1 et 1'), 2 verticales (2 et 2') et 1 horizontale (3) (Figure 52).

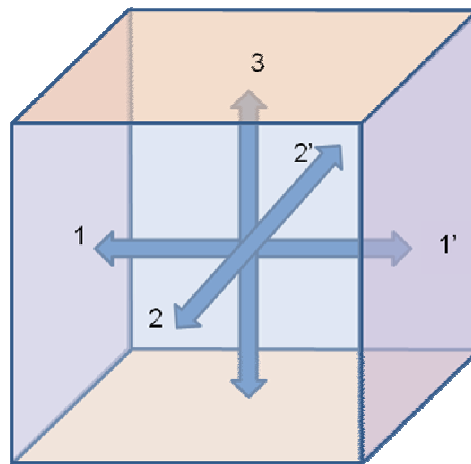


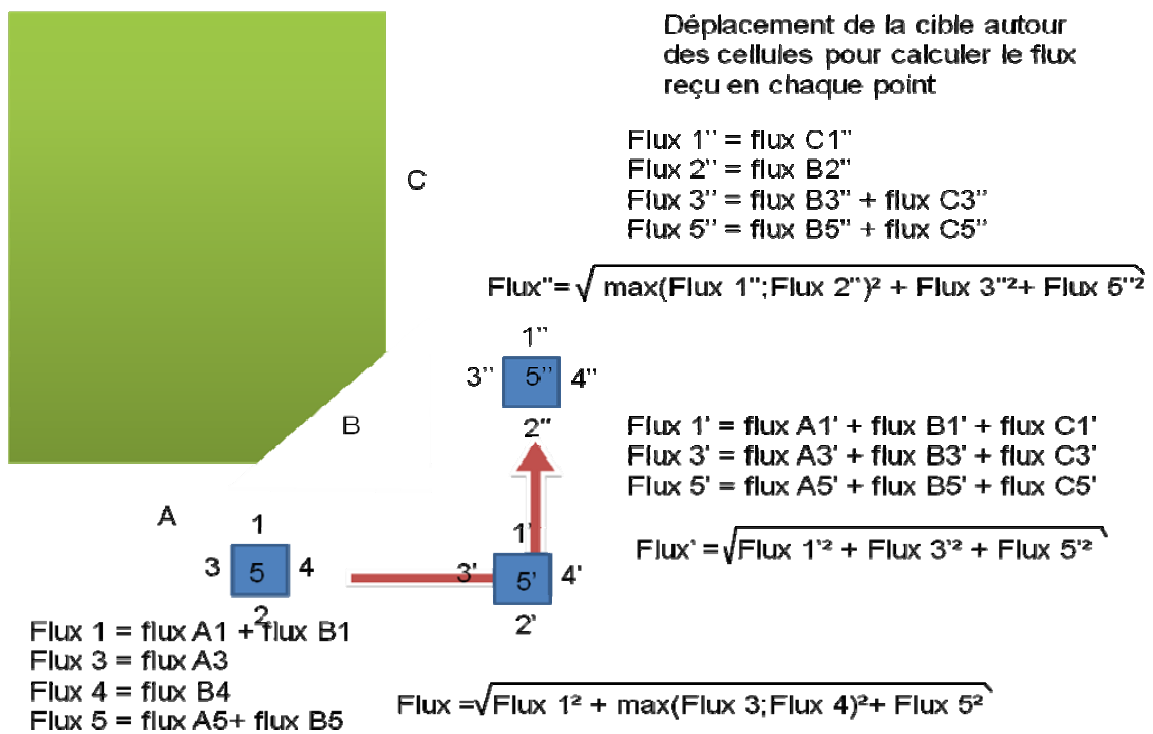
Figure 52 : Schéma de la cible élémentaire.

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

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

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

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



7.3 LA PRISE EN COMPTE D'ÉCRAN THERMIQUE

7.3.1 RAPPEL SUR LE RÔLE DES ÉCRANS THERMIQUES

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

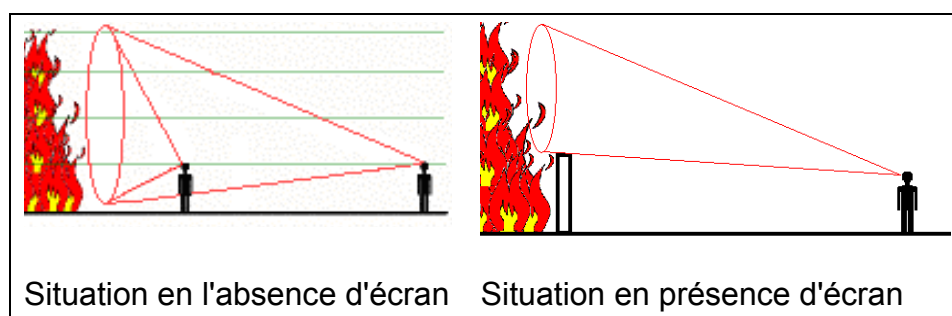


Figure 53 : Rôle protecteur des écrans thermiques.

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

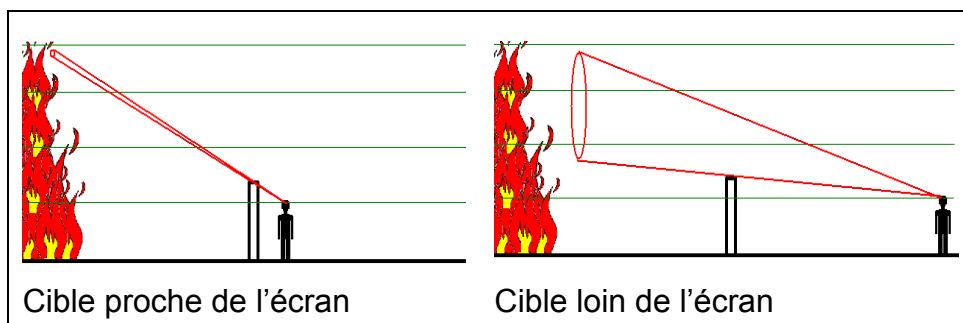


Figure 54 : Position de la cible pour un rôle optimal de l'écran thermique

Les éléments qui peuvent être considérés comme écrans sont, entre autres, les merlons, les dénivelés ou les parois périphériques. Dans ce dernier cas, il est utile de s'interroger sur le comportement de ce mur lors de l'incendie. Ceci est précisé au paragraphe suivant.

7.3.2 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.

7.3.2.1 CARACTÉRISTIQUES 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 n'est 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.

7.3.2.2 ÉCHAUFFEMENT DE LA FAÇADE ET FLUX THERMIQUE INDUIT

Lorsqu'un incendie se développe dans une cellule sollicitant thermiquement une façade, tant que la durée I n'est pas atteinte, la façade n'émet pas un rayonnement significatif et elle fait office de barrière radiative.

Le décompte de la durée d'efficacité d'une façade, en ce qui concerne ses critères R, E, I et Y ne débute que lorsque la paroi est sollicitée thermiquement soit à partir du moment où le flash-over a lieu dans la cellule, soit à partir du moment où l'effondrement de la toiture atteint les bords de l'entrepôt.

A partir de l'instant où le critère I est atteint, l'échauffement se fait progressivement du haut de la façade vers le bas. Ce comportement reflète l'augmentation de l'épaisseur de la couche chaude liée au développement de l'incendie à l'intérieur de la cellule.

Il a été retenu que la zone échauffée s'étend jusqu'au bas de la façade à la vitesse de 0.5 m.min^{-1} sur toute sa largeur et ce quel que soit le type de paroi (Figure 55). En termes de température en face non exposée, il est fait l'hypothèse qu'elle croît linéairement de 160°C (soit une émittance de 2.0 kW.m^{-2}) à 500°C (soit une émittance de 20 kW.m^{-2}) entre I et E minutes. La température de 155°C correspond au critère d'élévation de température de 140°C avec une température initiale de 15°C , conformément à la définition du critère d'isolation thermique lors d'un essai normalisé. La température de 500°C fait elle référence à la température moyenne maximale observée lors de l'essai à grande échelle FLUMILOG via les caméras thermiques. Pour calculer le flux induit par cet échauffement, l'émissivité des parois est prise égale à 0.7, telle que définie dans les parties feu des Eurocodes.

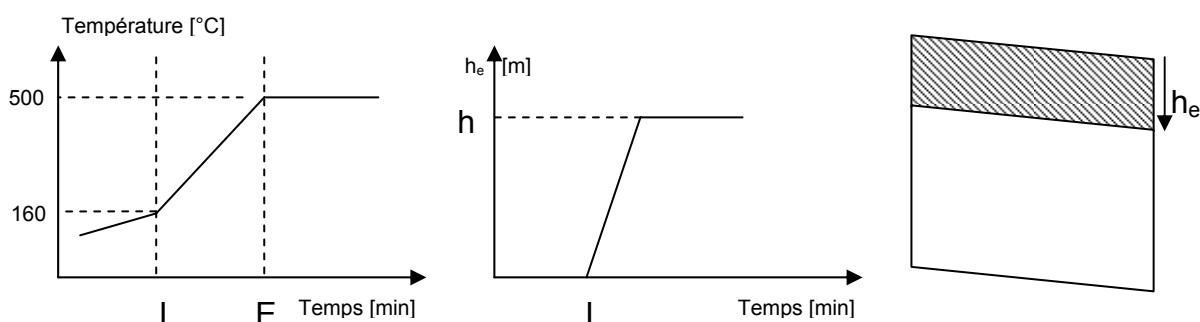


Figure 55 : Schéma descriptif de l'échauffement d'une façade.

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.

7.3.2.3 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 notable 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 $0,2 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$, car le poteau sera entraîné par l'effondrement des poutres ou traverses. Pour une structure béton, du type poutre, portique ou mur auto-stable, 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.

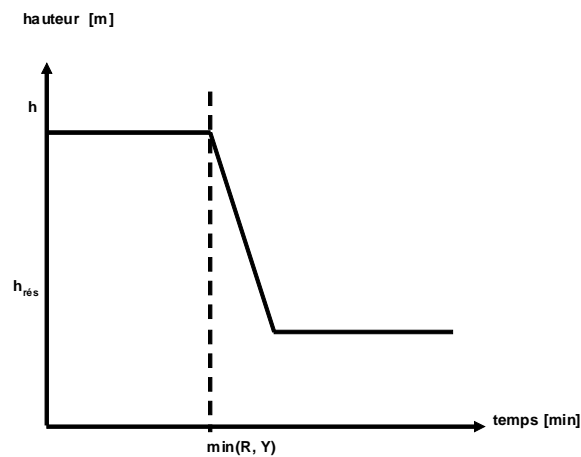


Figure 56 : Hauteur de la paroi au cours du temps

Si un déport latéral ou une zone de préparation est présente, c'est le maximum entre cette valeur et le recul induit par l'effondrement de la paroi qui est utilisé pour positionner la flamme.

D'autre part, si l'extension du déport latéral ou de la zone de préparation est supérieure à la hauteur initiale de la paroi alors cette dernière reste en place pendant toute la durée du feu quelques soient les valeurs de R , E et Y mais le flux induit par la paroi est quand même ajouté.

Le tableau suivant récapitule les hypothèses retenues pour les différents matériaux constituant les parois.

Tableau de synthèse des parois

Durées d'efficacité :

- Paroi : E min et I min
- Fixation : Y min
- Structure support : R min
- t^* : instant où la paroi atteint la hauteur résiduelle

Structure support	Paroi						
	Rayonnement de la paroi		Effacement de la paroi si $R > \text{MIN}$ [E, Y]	Déformation de la paroi à partir de R			
	Paroi stable	Paroi effondrée avec hauteur résiduelle		Hauteur résiduelle	Vitesse affaissement (m/min)	Largeur de recouvrement (m)	
						Paroi ductile (acier)	Paroi peu ductile (béton ou maçonnerie)
Poteau acier	Entre l et MIN [E, Y] si $R > \min$ [E, Y]	Pas de rayonne ment	A partir de MIN [E, Y]	0.3 h	0,05 h ¹	0.15 h	0
Portique acier				0.4 h	0,1 h ¹	0.4h	0
Poteau béton/bois				0.1 h	0.9 h	0	0
Portique béton/bois				0.1 h	0.9 h	0	0
Auto-stable béton	Entre l et t [*] si $R < \min$ [E, Y]		A partir de E	0.1 h	0.9 h	-	0

¹ : valeur à multiplier par deux pour une paroi comportant un isolant combustible

Tableau descriptif du comportement des parois

Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des données disponibles sur un certain nombre de sinistres. Pour chaque sinistre, une fiche descriptive avec photos est fournie en annexe. Lorsqu'aucune information n'est disponible, la case est laissée vide.

Référence	Structure + paroi	Paroi					Annexe
		Stabilité du support	Support stable	support effondré			
			% effacé des parois	Hauteur résiduelle h _{min} h _{max}		Largeur de recouvrement	
F1	béton + bardage double peau	NON	-	30%	50%	0.3 h	A
F2	béton	OUI	0% - 100%	-	-	-	B
F3	métallique + briques	OUI	0% - 20%	-	-	-	C
F4	métallique + parpaings	OUI	0% - 10%	-	-	-	C
F5	métallique + bardage simple peau	NON	-	30%	90%	0.4 h	D
F6	métallique + bardage simple peau	NON	-	20%	70%	-	D
F7	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	75%	0.3 h	D
Face Au Risque - 372	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	50%	-	D
Face Au Risque - 387	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	50%	0.25 h	D
Face Au Risque - 359	métallique + bardage double peau	NON	-	40%	70%	0.2 h	E
F8	métallique + bardage double peau	NON	-	50%	50%	0.3 h	E
F9	métallique + bardage double peau	NON	-	25%	80%	0.25 h	D

7.3.3 CAS DES ECRANS THERMIQUES DÉPORTÉS : 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 57). 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 $f = f_e - f_o$.

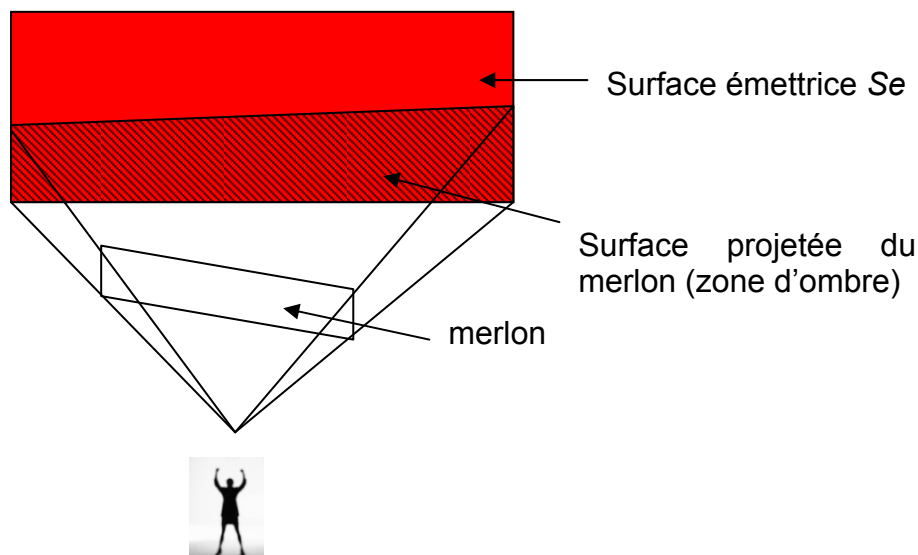


Figure 57 : schéma descriptif de l'influence d'un écran thermique

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.

8. DÉTERMINATION 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 5.2, 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 5.2.2 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 58.

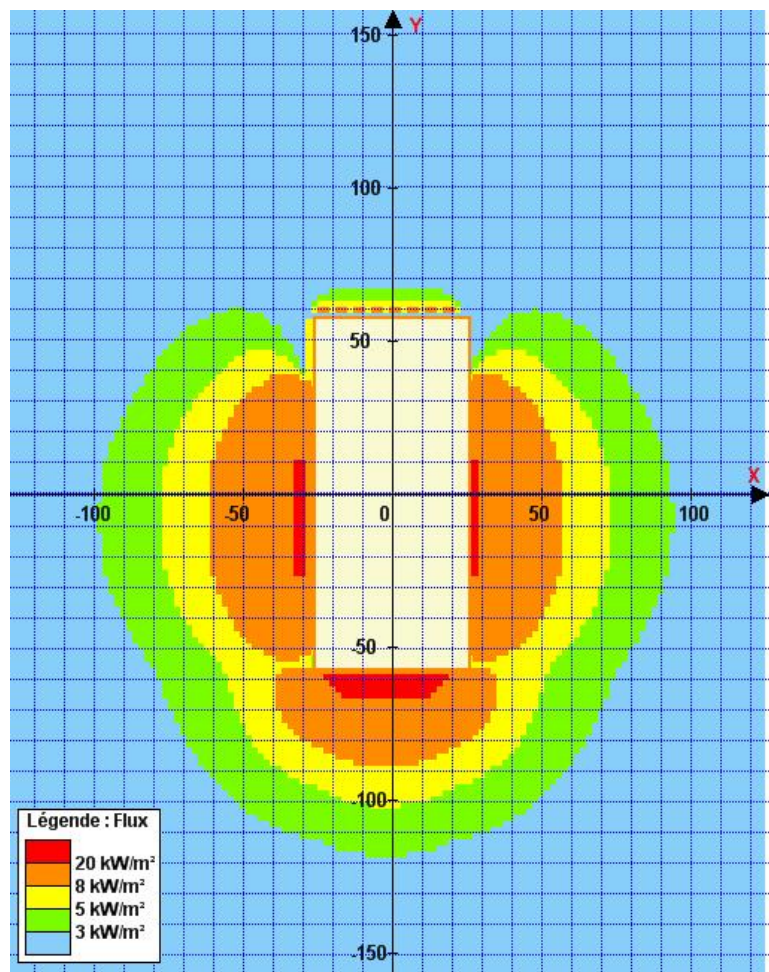


Figure 58 : Exemple de cartographie de flux obtenue avec l'outil FLUMILOG.

9. CAS DE LA PROPAGATION À 3 CELLULES

Selon la nature des produits entreposés dans les cellules, 2 types de situation peuvent se produire :

1^{er} cas : la durée de l'incendie dans la cellule initiale est inférieure à la résistance des parois séparatrices. Dans ce cas, il n'y a pas à considérer de propagation aux cellules voisines, ceci est illustré sur la Figure 59.

1^{er} cas : la durée de l'incendie est inférieure à la résistance des murs séparatifs

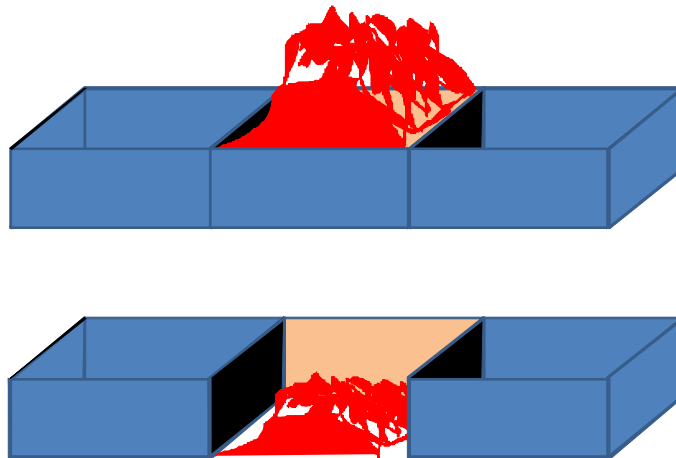


Figure 59 : schéma de propagation du feu dans le cas où l'incendie est plus court que la durée de résistance des parois – pas de propagation

2^{ème} cas : la durée de l'incendie est supérieure à la capacité de résistance des parois séparatrices. Dans ce cas, la propagation est à considérer dès que cette durée est atteinte. Ceci est illustré sur la Figure 60 et la Figure 61.

2^{ème} cas : la durée de l'incendie est supérieure à la résistance des murs séparatifs

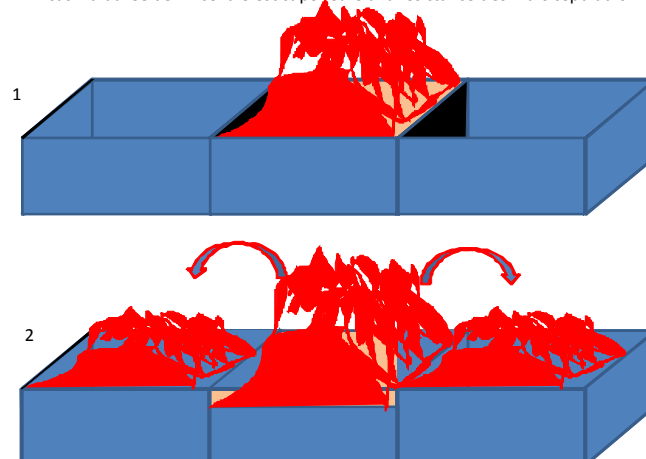


Figure 60 : Le feu se propage aux deux cellules voisines dès lors que les murs séparatifs ne sont plus en mesure de jouer leur rôle (temps au-delà de leur degré REI)

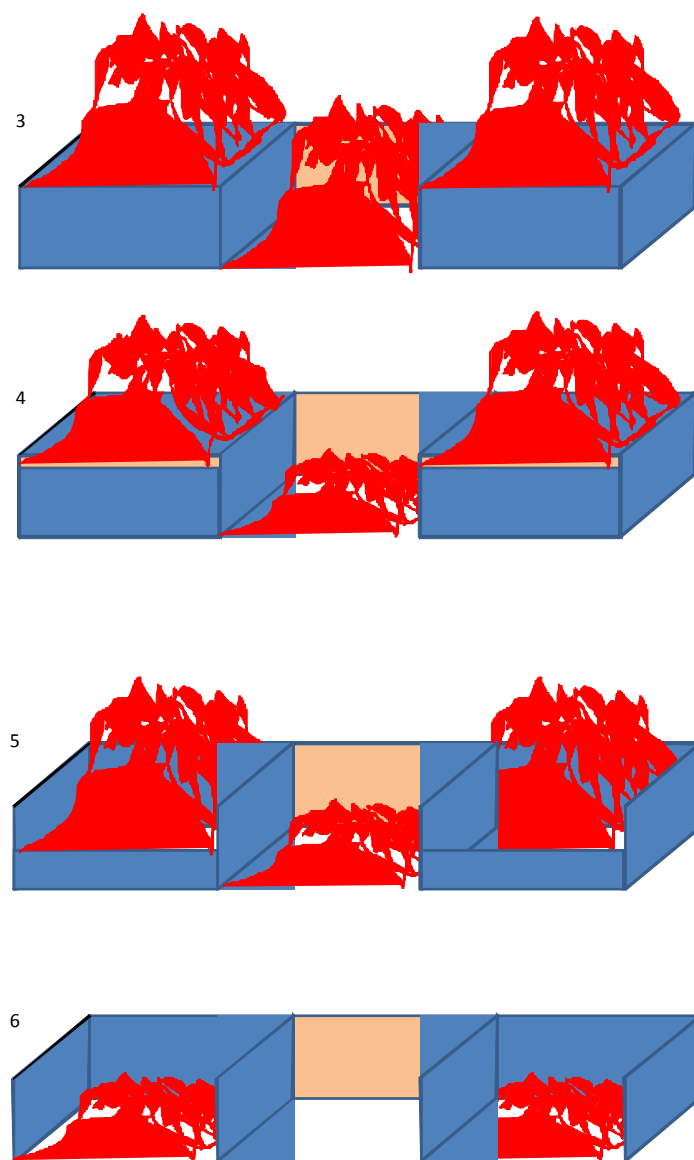


Figure 61 : schéma de propagation d'un incendie d'une cellule à ses voisines.

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 62.

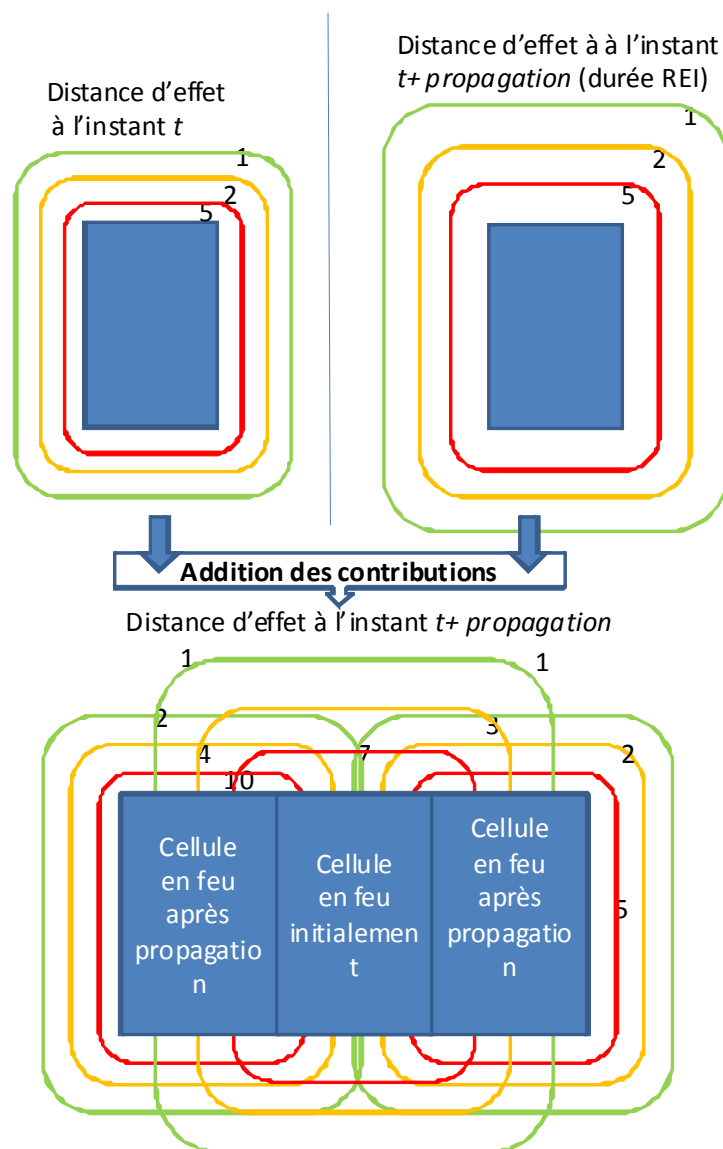


Figure 62 : calcul pratique des conséquences d'une propagation d'un incendie – étape 1

10. COMPARAISONS AVEC L'EXPÉRIMENTAL

La méthode décrite précédemment a été élaborée en assemblant plusieurs modèles spécifiques à certaines phases ou phénomènes observables lors d'un incendie. Il convient de vérifier que cet assemblage fournit bien des résultats comparables à ceux obtenus lors des essais réalisés dans le cadre de ce projet

Ce chapitre est consacré à la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de calculs. Le chapitre suivant sera quant à lui consacré à une étude de sensibilité des principaux paramètres (combustible, surface de la cellule et caractéristiques des parois).

Dans le cadre du projet FLUMILOG, 9 essais à moyenne échelle ont été réalisés, la cellule d'essais avait une surface de 8x12 m² pour une hauteur de 3 m. Le principal objectif de cette campagne était d'étudier l'influence du combustible sur les caractéristiques des flammes. De fait, des mesures de flux ont été effectuées au cours de ces essais et il est donc possible de comparer les résultats fournis par la méthode avec ceux mesurés lors de ces essais.

8 essais sur 9 ont fait l'objet de comparaison : l'essai n°8 n'a pas fait l'objet de comparaison car la configuration testée n'a pas conduit à la formation de flammes au dessus de la cellule du fait du surdimensionnement de la structure pour les essais à moyenne échelle, la toiture et les parois sont restées en place.

Pour la présentation des résultats, aucune différence n'a été faite entre les faces sous le vent et les autres faces même si la prise en compte du vent dans la méthode conduit à considérer que les flammes sont poussées par le vent sur toutes les faces, ce qui n'est pas physique bien entendu. Ce choix a été fait car le sens du vent ne peut pas être connu à l'avance et donc le calcul est fait pour chaque face avec l'hypothèse d'absence de vent et celle d'un vent qui couche les flammes. Par conséquent, pour établir les comparaisons entre les essais et les calculs, pour chaque essai, 2 calculs ont été réalisés : un avec le vent mesuré lors de l'essai et un avec un vent nul. La comparaison a été faite systématiquement entre la valeur expérimentale et la valeur maximale calculée.

Les courbes de la Figure 63 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.

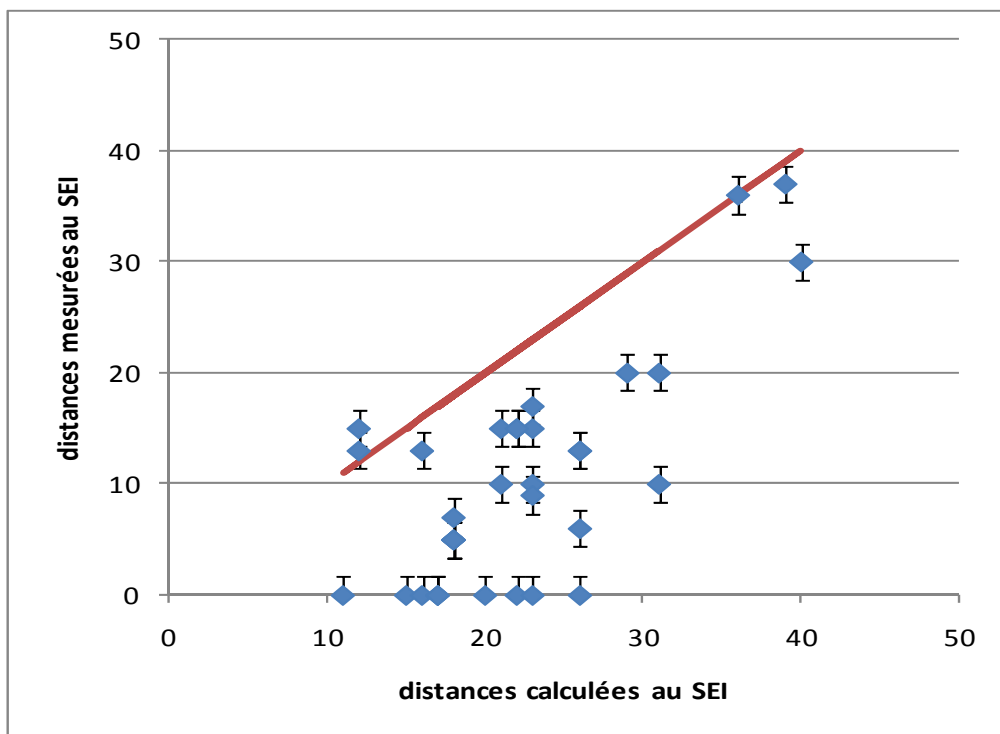


Figure 63 : Courbes des effets irréversibles

Les courbes de la Figure 64 sont relatives aux effets létaux.

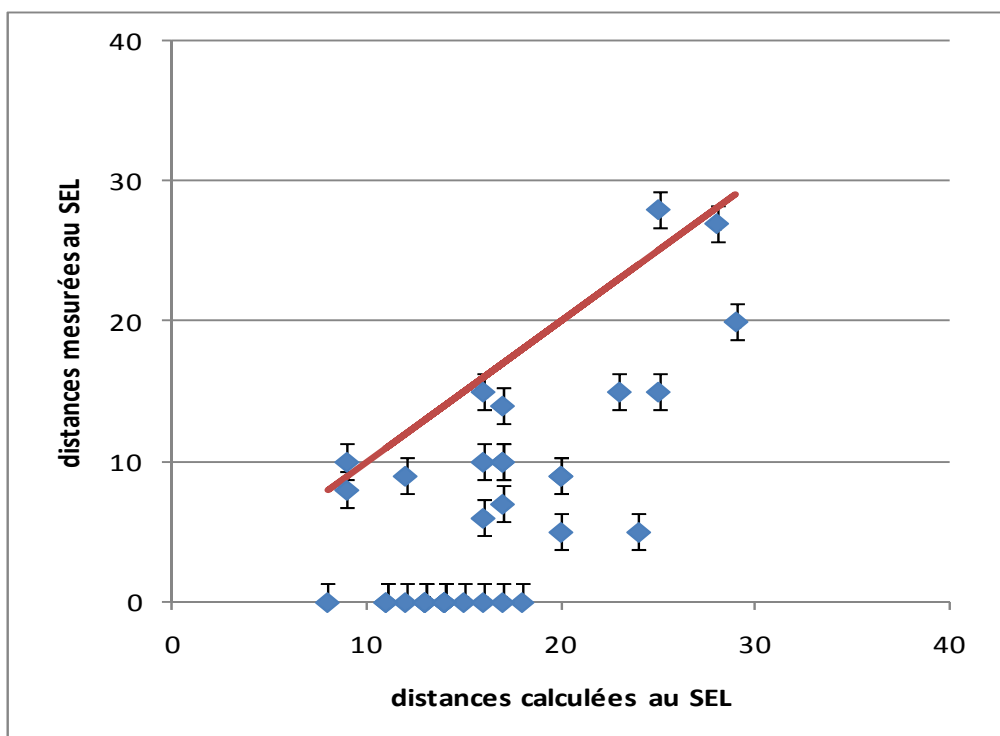


Figure 64 : Courbes des effets létaux

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.

11. 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.

12. BIBLIOGRAPHIE

CARRAU André, DRA-03 : Spécificités des entrepôts au regard de l'incendie, INERIS-DRA-2000-25291-ACa/Aca, 2000.

CARRAU André, BCRD : Caractérisation des feux industriels, rapport d'avancement, 2003.

CARRAU André, BCRD : Caractérisation des feux industriels, rapport final, INERIS-DRA Aca-LFo-Spa-2004-28659, 2004.

EVANS, CEILING JET FLOWS, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, p2.40-2.49, 1995.

HESKESTAD, SMOKE MOVEMENT AND VENTING, Fire Safety Journal, 11, 77-83, 1986.

d'HOOP Jean-Michel, Sécurité incendie, Techniques de l'ingénieur, 2002.

INGASON H., "Rack storage fires", Safetynet Seminar at www.safetynet.de/activities/35.htm, 2001.

INGASON H., MODELING OF A TWO DIMENSIONAL RACK STORAGE, Fire Safety Science, Proceedings of the 4th International Symposium, pp. 1209-1220, 1994.

INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID, La sécurité incendie dans les entrepôts frigorifiques, 1987.

NAUDIN Cécile-Anne, Nomenclature, classification et formules chimiques des polymères, Techniques de l'ingénieur, A3035-1, 1995.

TEWARSON, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA, 1995.

LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation précise	Nb pages
Annexes A à E	Eléments du REX sur les structures	18

Annexe A :Structure béton - bardage double peau

A.1.Sinistre F1

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : béton + bardage double peau métallique
- Surface sinistrée : totalité
- Durée de l'incendie : 3 h

Constatations :

- le bardage est appuyé par les racks là où la hauteur résiduelle est la plus faible
- effondrement des murs intérieurs et d'une paroi périphérique,
- hauteur résiduelle de la paroi périphérique : de 30% à 50%
- largeur de recouvrement : 30% de la hauteur de paroi.





Annexe B : Structure béton - paroi béton

B.1.Sinistre F2

- Surface de l'entrepôt : 2000 m²
- Structure : béton
- Surface sinistrée : 2 000m²
- Durée de l'incendie : 4 h

Constatations :

- défaillance de certaines fixations paroi/structure,
- effacement de certaines parois - comportement des façades où les poteaux sont restés : défaillance de certaines fixations.



Annexe C : Structure acier - paroi en parpaings

C.1.Sinistre F3

- Surface de l'entrepôt : 800 m²
- Structure : métallique avec remplissage par parpaings
- Surface sinistrée : 800 m²
- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- effacement des parois : de 0% à 20%,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : effondrement vers l'intérieur de la maçonnerie.



C.2.Sinistre F4

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + remplissage parpaings
- Surface sinistrée : totalité

- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- effacement des parois : 10% (façade en parpaings détruite par le service de secours),
- comportement des façades: stable.





Annexe D : Structure acier - bardage simple peau

D.1.Sinistre F5

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + bardage
- Surface sinistrée : inconnue
- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- hauteur résiduelle des parois : de 30% à 90%,
- largeur de recouvrement : 40% de la hauteur des parois ,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : inconnu.



D.2.Sinistre F6

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + bardage
- Surface sinistrée : inconnue

- Durée de l'incendie : inconnue

Constations :

- hauteur résiduelle des parois : de 20% à 70%,
- largeur de recouvrement : inconnu,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : effondrement total.



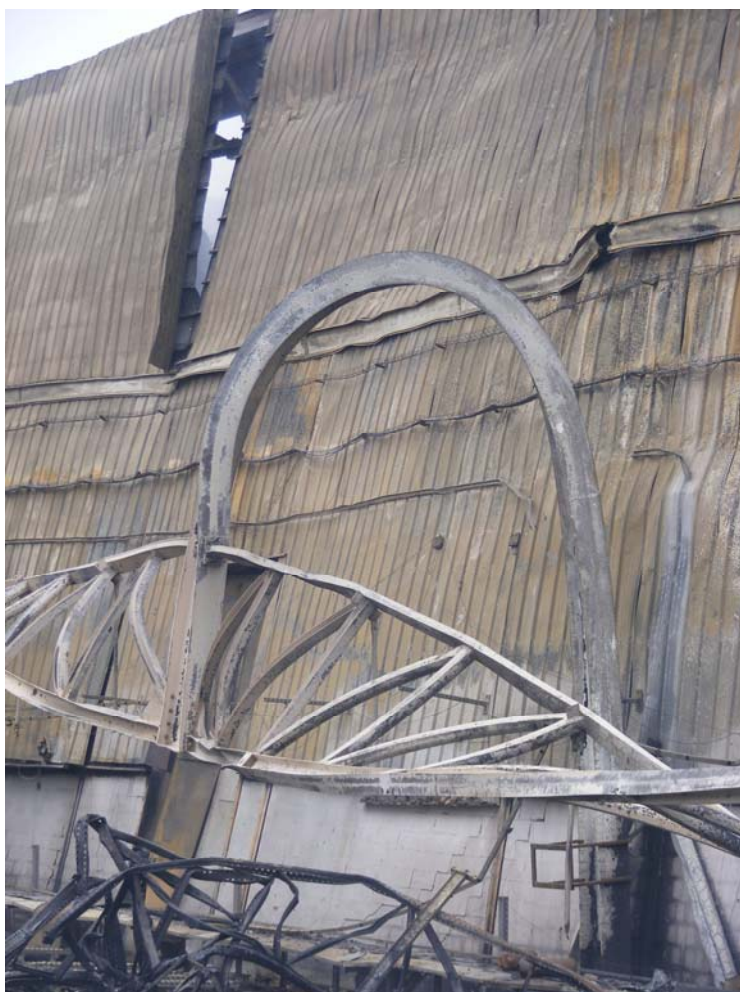
D.3.Sinistre F7

- Surface de l'entrepôt : 12000 m²
- Structure : métallique, bardage en périphérie, toiture avec poutres treillis
- Surface sinistrée : 12000 m²
- Durée de l'incendie : inconnue

Constatations :

- fortes variations des dégâts d'une zone à l'autre, déblaiement des façades par les pompiers,
- hauteur résiduelle des parois : de 50% à 75%,
- largeur de recouvrement : 30 % de la hauteur des parois,
- comportement des façades où les poteaux sont restés : inconnu.





D.4.Face au risque - 372

- Surface de l'entrepôt : 6000 m²
- Structure : acier + bardage
- Surface sinistrée : 6000 m²
- Durée de l'incendie : 5 h

Constatations :

- hauteur résiduelle des parois : 50%
- largeur de recouvrement : inconnu



D.5.Face au risque - 387

- Surface de l'entrepôt : 4000 m²
- Structure : acier + bardage
- Surface sinistrée : 4000 m²
- Durée de l'incendie : 5 h

- hauteur résiduelle des parois : 50%
- largeur de recouvrement : 25% de la hauteur des parois



Annexe E : structure acier - bardage double peau

E.1. Face au risque - 359

- Surface de l'entrepôt : 6000 m²
- Structure : métallique + bardage double peau
- Surface sinistrée : 3000 m²
- Durée de l'incendie : 3 h

Constations :

- hauteur résiduelle des parois : de 40% à 70%
- largeur de recouvrement : 20% de la hauteur des parois



E.2.Sinistre F8

- Surface de l'entrepôt : inconnu
 - Structure : métallique + bardage double peau
 - Surface sinistrée : inconnu
 - Durée de l'incendie : inconnu
-
- hauteur résiduelle des parois : 50%
 - largeur de recouvrement : 30% de la hauteur des parois





E.3.Sinistre F9

- Surface de l'entrepôt : inconnue
- Structure : métallique + bardage
- Surface sinistrée : inconnue
- Durée de l'incendie : inconnue

Constations :

- hauteur résiduelle des parois : de 25% à 80%,
- largeur de recouvrement : 25% de la hauteur des parois,
- comportement des façades où les poteaux sont restés :



