

RAPPORT D'ÉTUDE

14 / 03 / 2014

Réf. : DRA-14-141478-03176A

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

Ω-2

**Modélisations de feux
industriels**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

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

Ω -2

Modélisations de feux industriels

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

PRÉAMBULE

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

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

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

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

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

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

TABLE DES MATIÈRES

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

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

1. INTRODUCTION

1.1 LES REFERENTIELS OMEGA

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

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

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

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

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

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

1.3 ORGANISATION DU DOCUMENT

Le rapport Omega 2 comprend 3 éléments distincts :

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

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

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

2. DEFINITIONS PRINCIPALES

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

Allumage spontané, auto-inflammation*

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

Brûler*

Etre en état de combustion.

Chaleur de combustion* ou Potentiel calorifique

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

Chaleur spécifique

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

Combustible*

Susceptible de brûler. Objet pouvant brûler.

Combustion*

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

Conduction

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

Convection

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

Débit masse surfacique de combustion

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

Facteur de vue / de forme

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

Feu*

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

Flamme*

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

Flammes de diffusion / flammes de prémélange

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

Flux thermique radiatif

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

Incendie*

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

Incandescence*

Emission de lumière produite par un corps chauffé intensément.

Inflammable*

Capable de brûler avec flamme, dans des conditions spécifiées.

Inflammation*

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

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

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

Point d'éclair*

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

Potentiel calorifique inférieur (PCI)*

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

Potentiel calorifique supérieur* (PCS)

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

Pouvoir émissif (surfaccique)

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

Pyrolyse*

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

Rayonnement thermique*

Transfert d'énergie par ondes électromagnétiques

Réaction au feu*

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

Régime laminaire / turbulent

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

Résistance au feu*

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

Suie*

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

Rendement de combustion

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

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

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

Tension de vapeur

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

Vitesse massique de combustion*

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

3. DESCRIPTION GENERALE DU PHENOMENE D'INCENDIE

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

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

3.1 DEFINITION GENERALE DE LA COMBUSTION

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

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

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

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

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

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

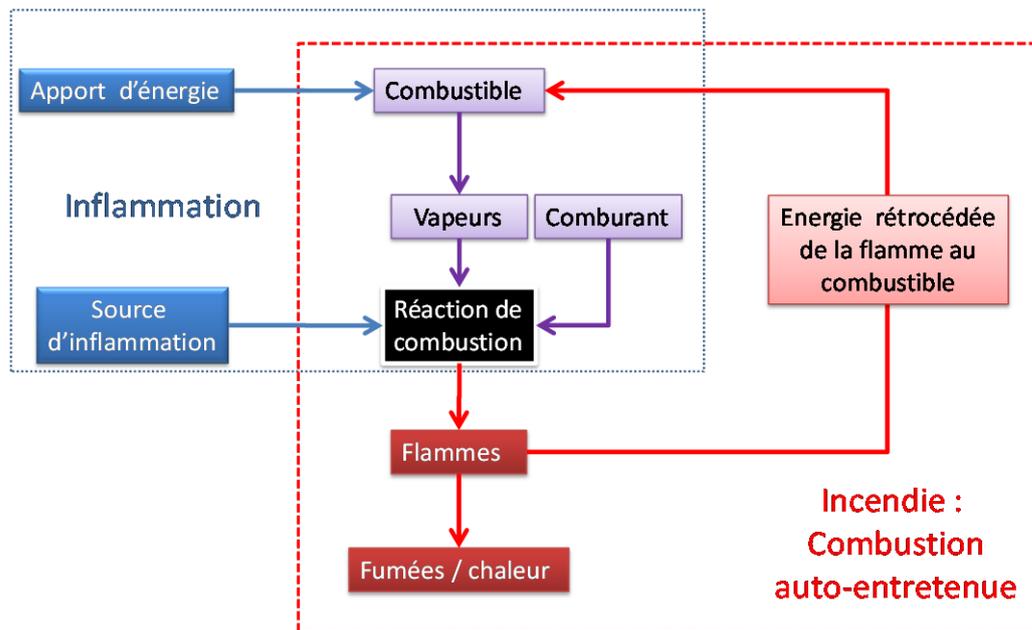


Figure 1 : Schéma du mécanisme de combustion auto-entretenue

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

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

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

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

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

3.2 DIFFERENTES FORMES DE COMBUSTION

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

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

3.3 PROCESSUS DE COMBUSTION POUR UN FEU INDUSTRIEL

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

3.3.1 COMBUSTIBLES LIQUIDES

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

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

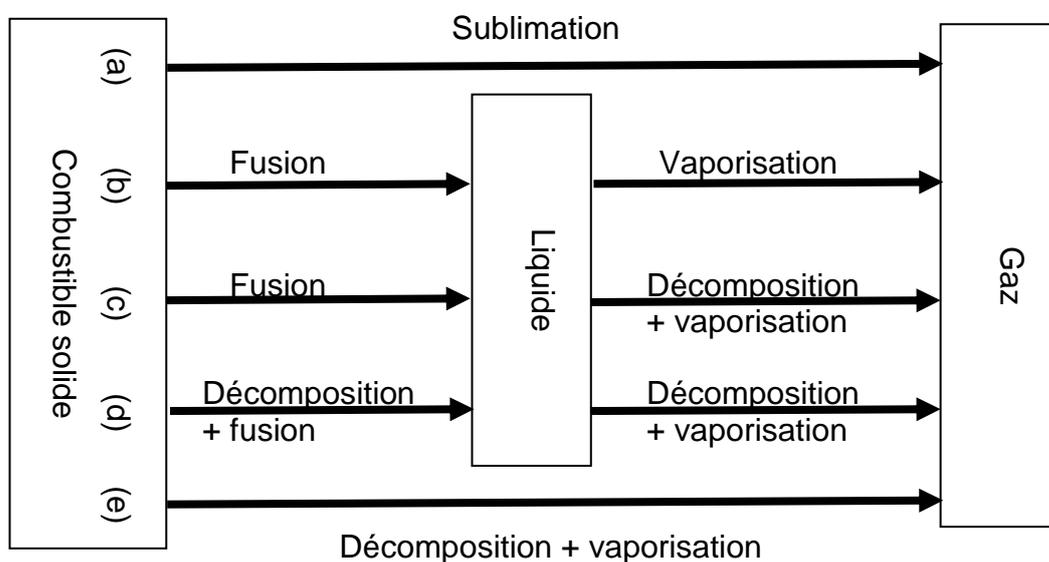
Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le **domaine d'inflammabilité** et en présence d'une **source d'inflammation**, il s'enflamme.

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

3.3.2 COMBUSTIBLES SOLIDES

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

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



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

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

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

3.3.3 PRINCIPE DE LA COMBUSTION

3.3.3.1 EMISSION DE VAPEURS

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

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

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

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

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

3.3.3.2 DOMAINE D'INFLAMMABILITE

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

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

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

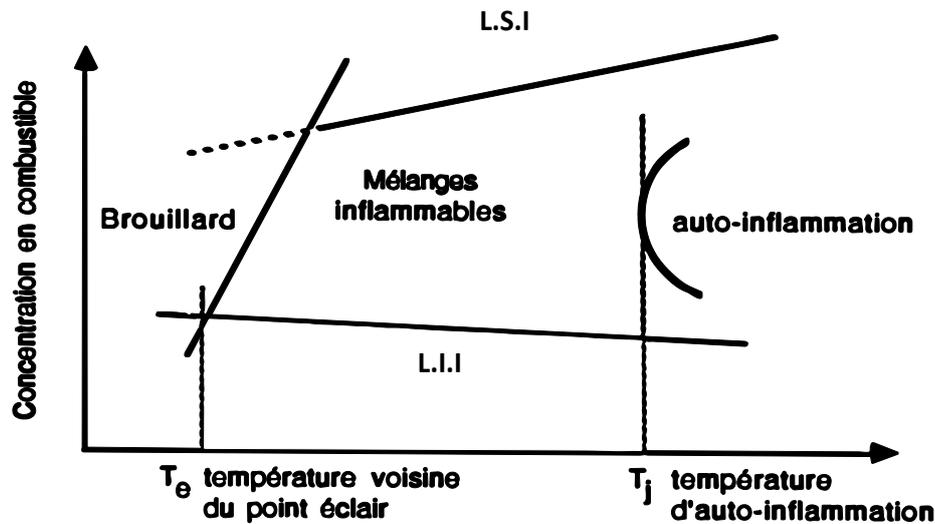


Figure 3 : Domaine d'inflammabilité (représentation schématique)(Zabetakis, 1965).

3.3.3.3 ENERGIE D'INFLAMMATION

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.4 FLAMME

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

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

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

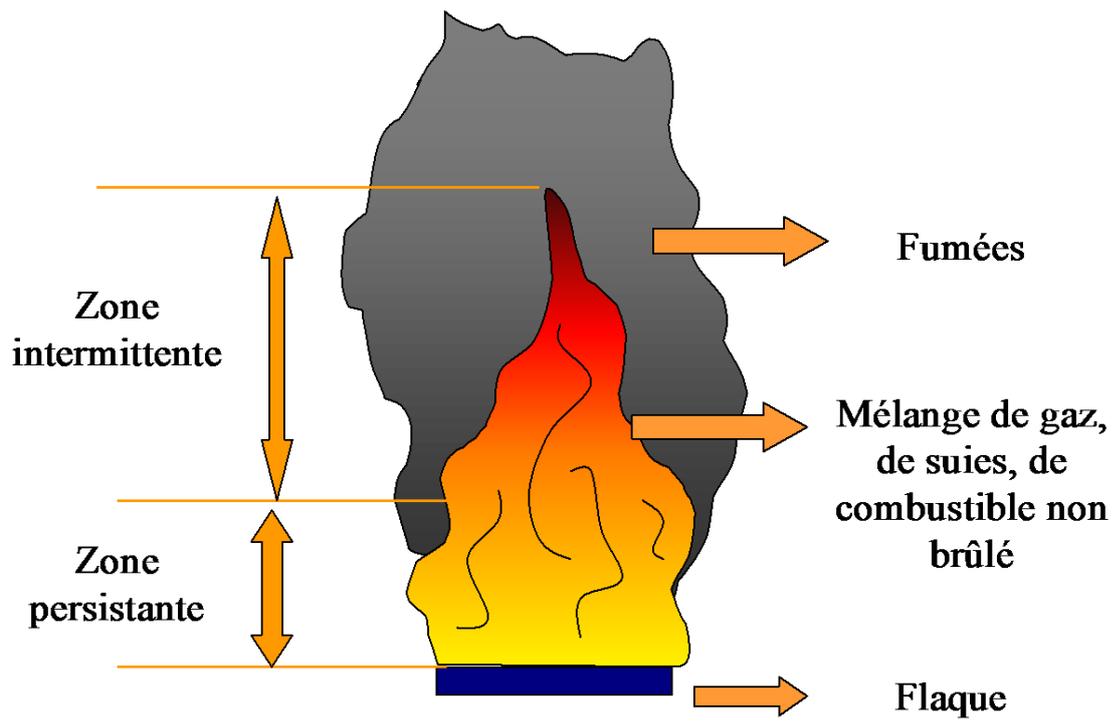


Figure 4 : Représentation schématique de la flamme

4. TRANSFERT DE CHALEUR

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

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

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

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

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

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

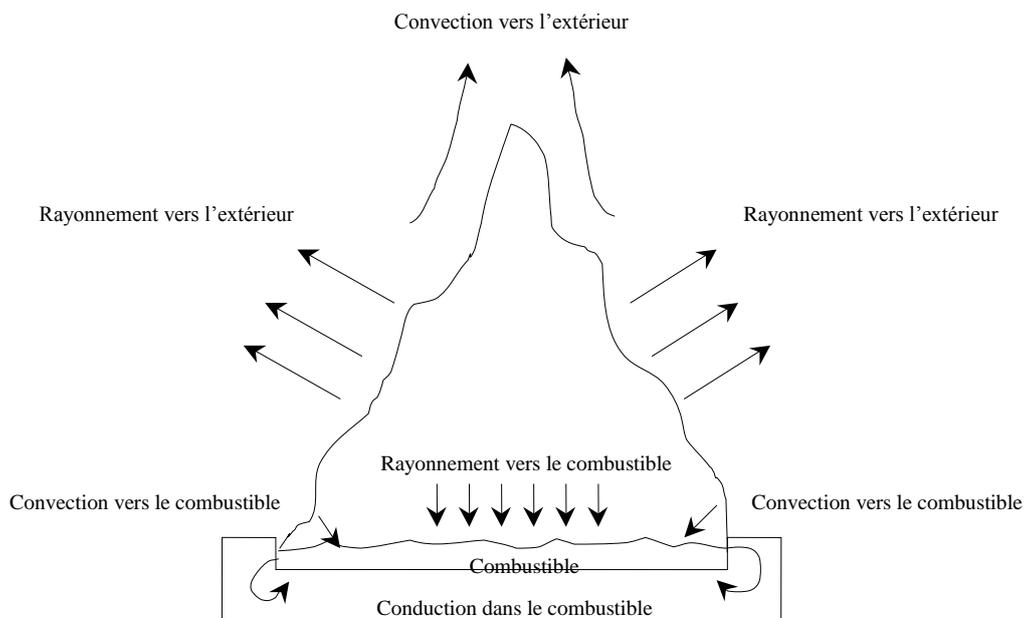


Figure 5 : Mécanismes de transfert de la chaleur dans la flamme (Alpert, Ward)

4.1 CONVECTION

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

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

4.2 CONDUCTION

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

4.3 RAYONNEMENT

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

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

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

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

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

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

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

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

T = température absolue (K)

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

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

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

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

Avec T_f : température de flamme (K)

T_a : température de l'ambiance (K)

ε : émissivité de la flamme

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

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

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

Il apparaît ainsi le paradoxe suivant :

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

5. MODELISATION DES EFFETS THERMIQUES RADIATIFS

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

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

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

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

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

5.1 MODELE DU POINT SOURCE

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

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

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

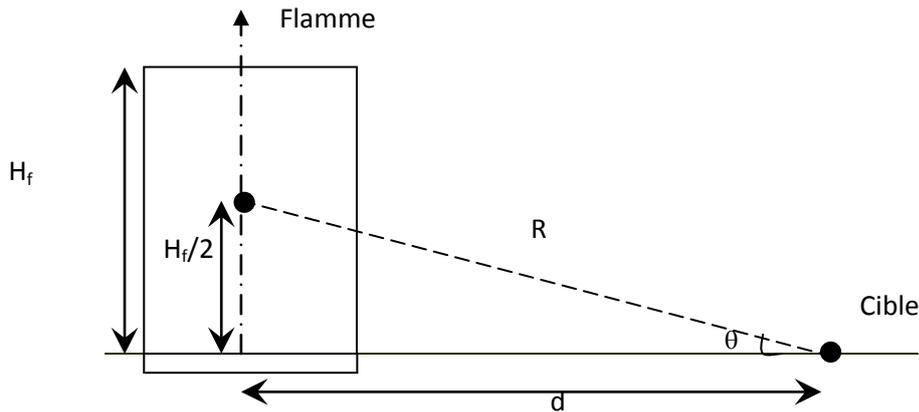
La densité de flux thermique radiatif, q_a , reçue par un récepteur situé à une distance R de la flamme (voir Figure 6) est donnée par la formule suivante :

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

avec Q_r : puissance totale rayonnée (kW),

R : distance cible/source ponctuelle en mètres

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



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

Figure 6 : Configuration pour le modèle de la source ponctuelle

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.2 MODELE DE LA FLAMME SOLIDE

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

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

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

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

5.2.1.1 MODELE DE FLAMME SOLIDE A UNE ZONE

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

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

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

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

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

τ : coefficient d'atténuation atmosphérique (-)

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

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

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

Trois données importantes doivent ainsi être déterminées :

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

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

5.2.1.2 MODELE DE FLAMME SOLIDE A PLUSIEURS ZONES

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

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

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

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

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

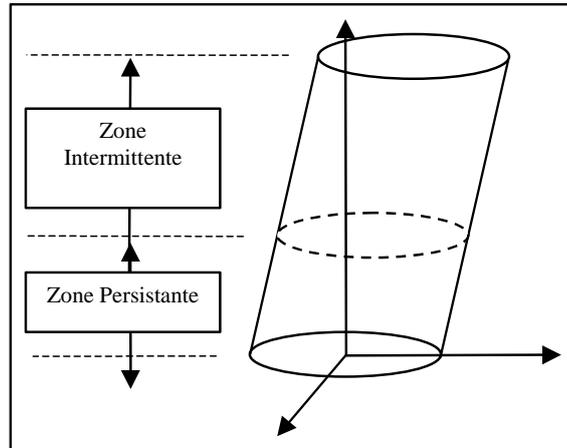


Figure 7 : Représentation schématique du modèle de flamme solide à deux zones

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

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

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

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

5.2.2 PARAMETRES POUR LE MODELE DE LA FLAMME SOLIDE

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

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

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

5.3 CALCUL DU FLUX RAYONNE REÇU PAR LA CIBLE

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

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

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

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

5.3.1 FACTEUR DE TRANSMISSIVITE ATMOSPHERIQUE

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

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

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

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

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

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

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

5.3.1.1 LA CORRELATION DE BRZUSTOWSKI ET SOMMER

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

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

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

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

5.3.1.2 LA CORRELATION DE LANNOY :

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

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

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

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

5.3.1.3 LA CORRELATION DE BAGSTER

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

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

où

- d = distance entre la flamme et la cible (m)

- p_w = pression partielle d'eau dans l'air (Pa),

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

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

5.3.1.4 CORRELATION DE WAYNE

Elle est donnée par la relation suivante :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

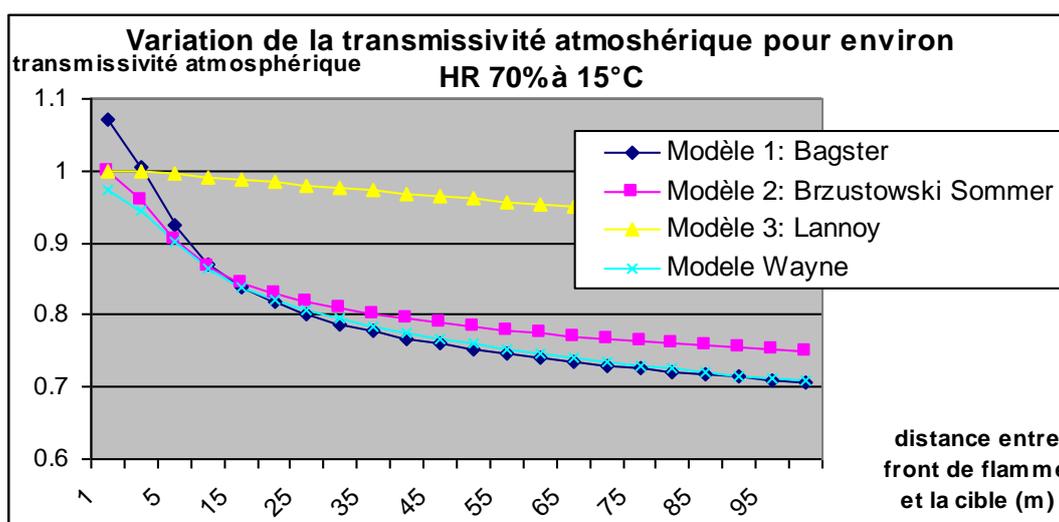


Figure 8 : Graphique comparatif des corrélations de transmittivité.

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

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

5.3.2 FACTEUR DE FORME

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.3.2.1 LE CALCUL INTEGRAL DU FACTEUR DE VUE

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

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

Les différentes grandeurs sont définies sur le schéma suivant.

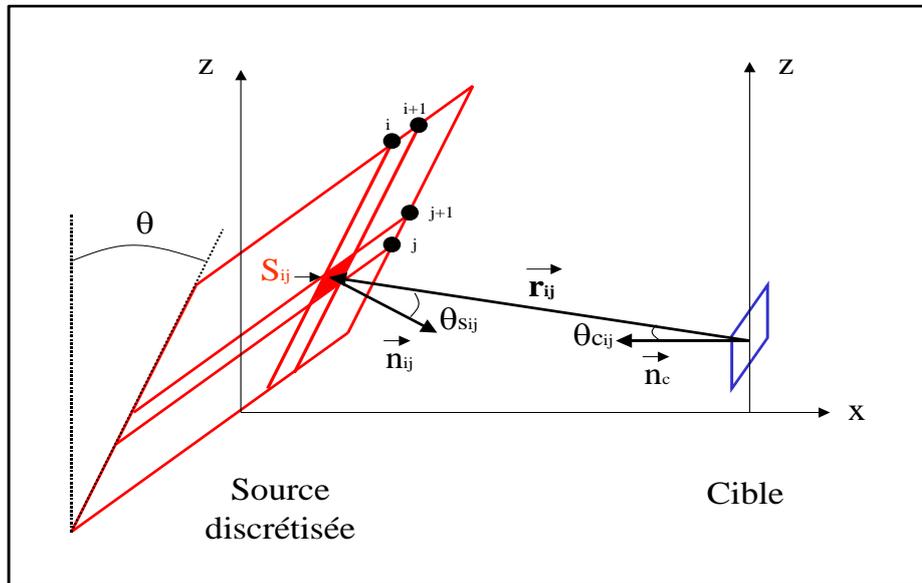


Figure 9 : Schéma général entre une flamme et une cible

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

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

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

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

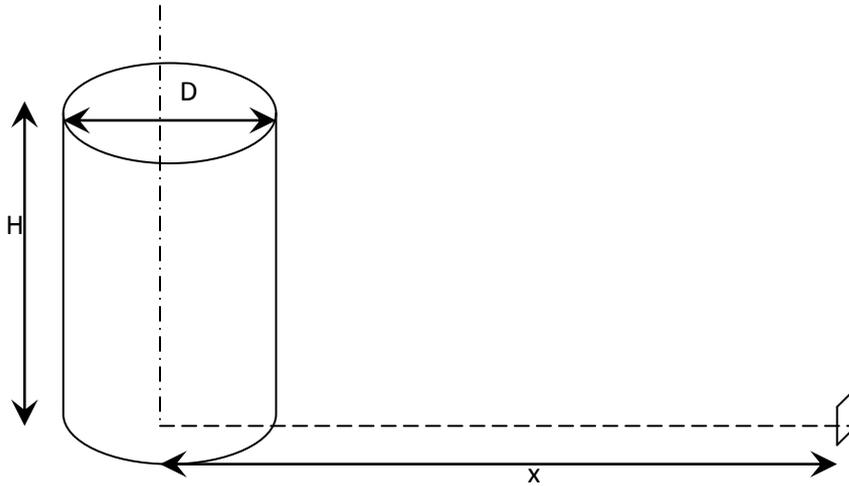
Il existe également de multiples formules analytiques permettant de déterminer le facteur de forme pour des géométries diverses (SPARROW & CESS, 1977). Les paragraphes suivants présentent quelques formules utiles pour des configurations classiques :

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

5.3.2.2 CAS D'UN CYLINDRE DROIT

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

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

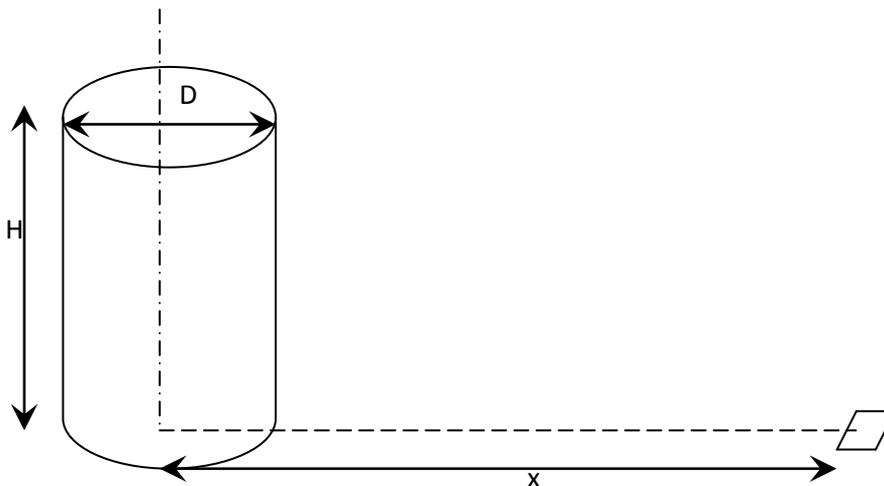


$$F_v = \frac{1}{\pi X} \operatorname{Arctan} \left(\frac{L}{\sqrt{X^2 - 1}} \right) + \frac{L}{\pi} \left[\frac{(A - 2X)}{X \sqrt{AB}} \operatorname{Arctan} \sqrt{\frac{A(X-1)}{B(X+1)}} - \frac{1}{X} \operatorname{Arctan} \sqrt{\frac{X-1}{X+1}} \right] \quad (11)$$

où :

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

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



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

où :

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

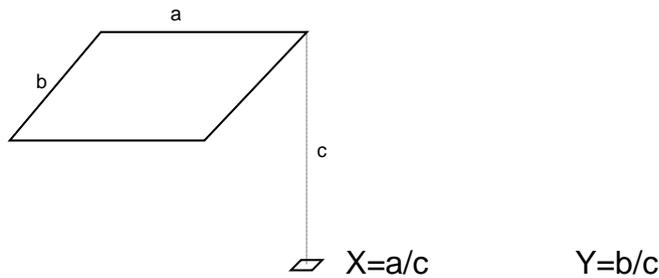
A noter que pour une cible à une hauteur h du sol, il suffit de décomposer le cylindre de flamme en deux selon un plan horizontal à l'altitude h afin de pouvoir appliquer les formules précédentes sur chaque moitié de cylindre.

5.3.2.3 CAS D'UN PLAN VERTICAL

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

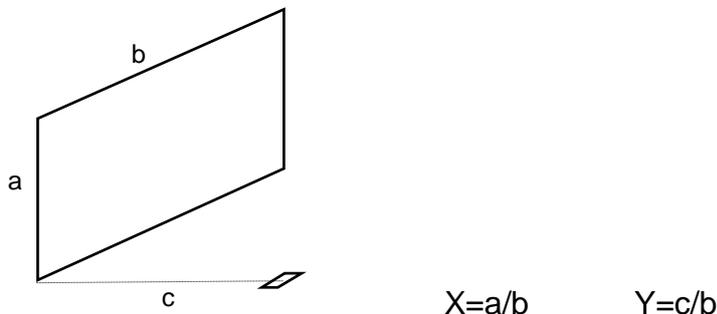
Les formules suivantes ont ainsi été proposées par Sparrow et Cess [22].

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



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

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



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

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

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

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

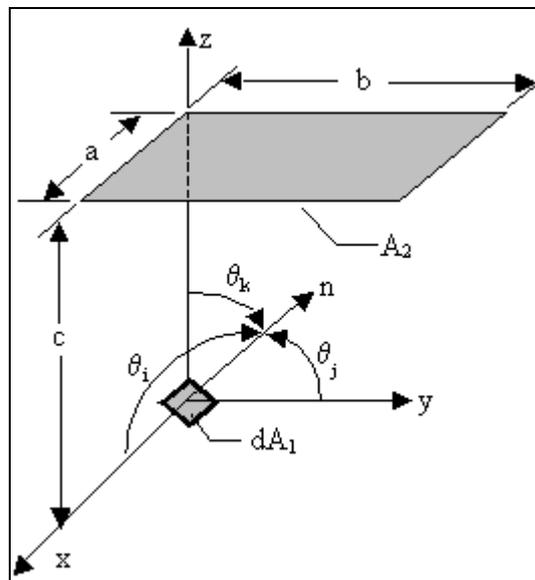


Figure 10 : Schéma pour le calcul analytique du facteur de vue

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

Où $A=a/c$; $B=b/c$

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

5.3.3 APPLICATION AU CAS D'UNE CIBLE HUMAINE

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

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

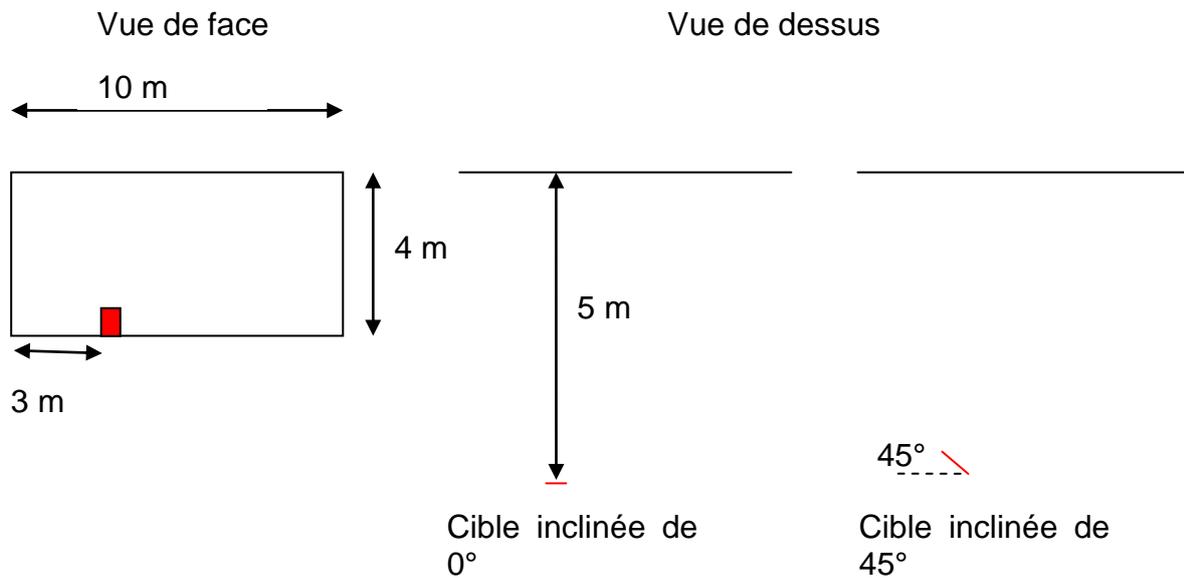


Figure 11 : Schéma d'une surface émettrice verticale et d'une cible

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

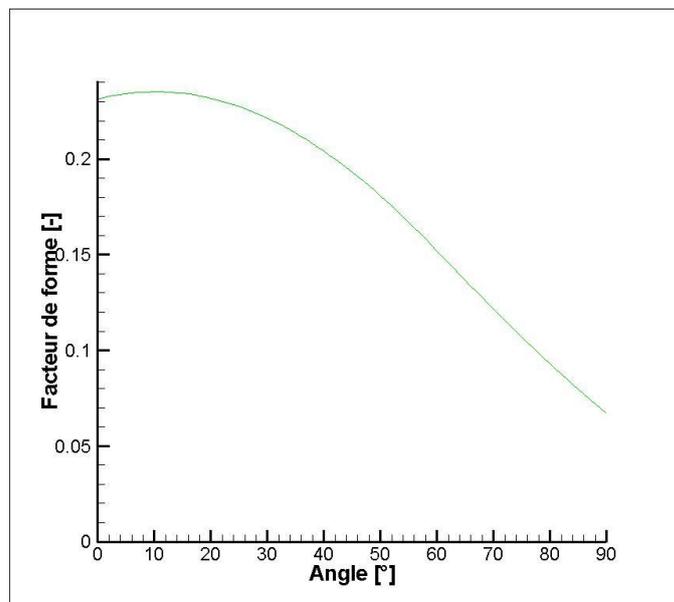


Figure 12 : Facteur de forme en fonction de l'angle d'inclinaison

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

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

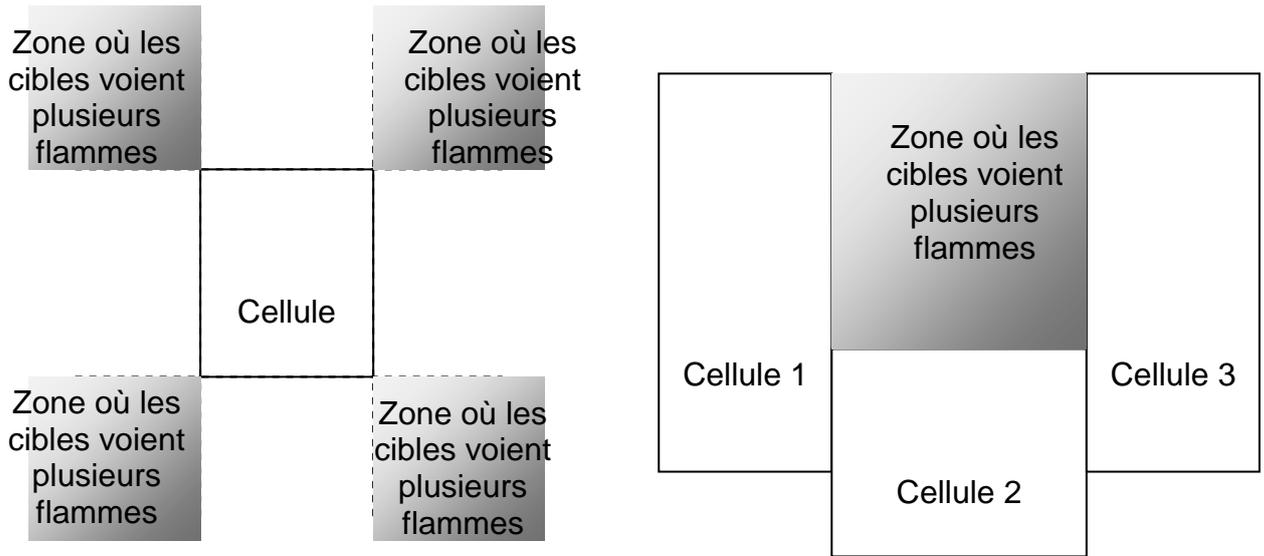


Figure 13 : Exemples de configuration où la cible voit plusieurs plans de flammes

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

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

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

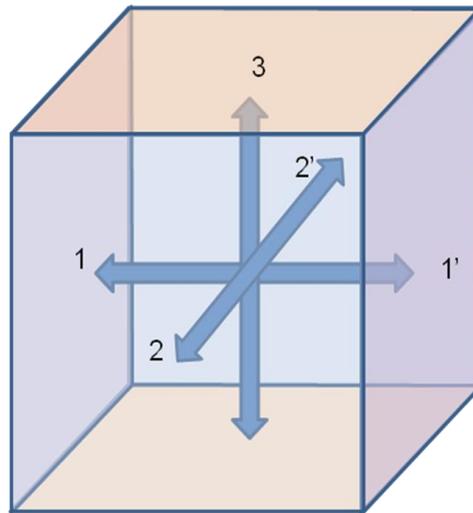


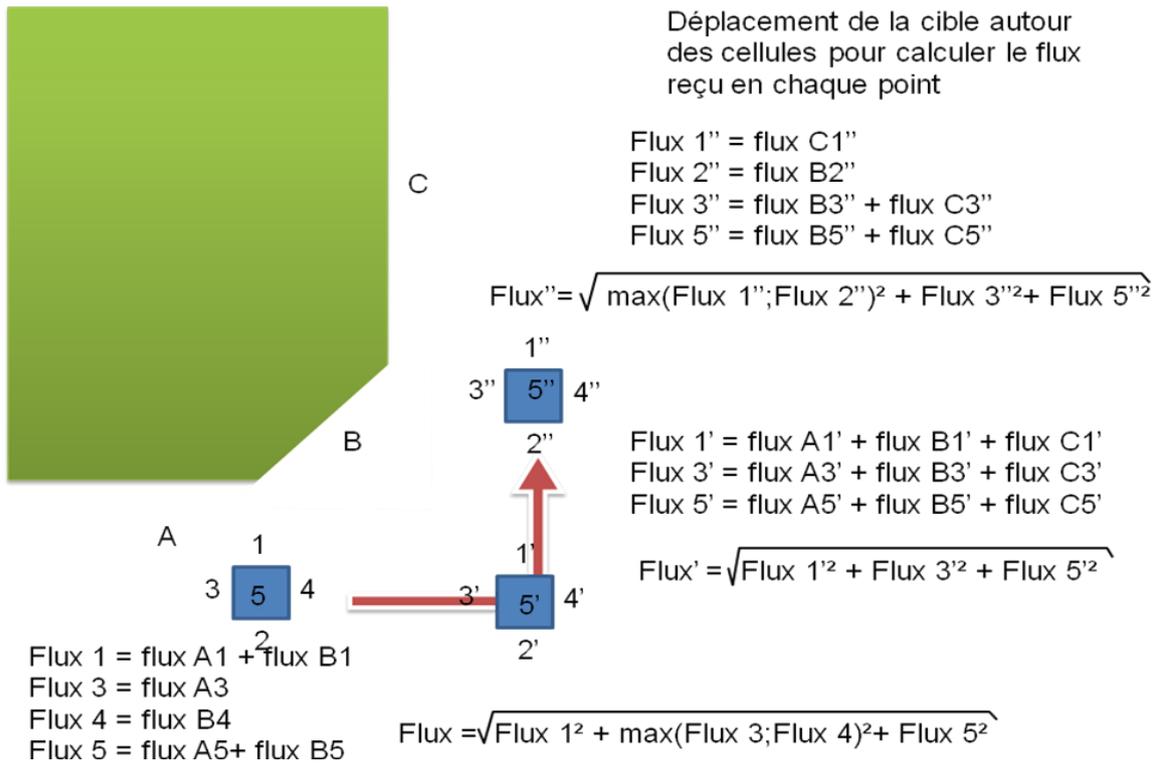
Figure 14 : Schéma de la cible élémentaire

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

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

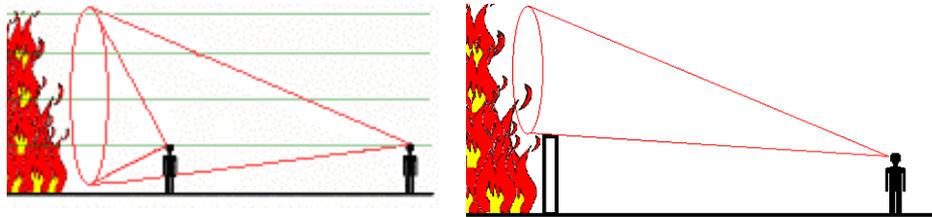
Où Flux1 et Flux1' sont les flux reçus par les faces latérales, Flux2 et Flux2' sont les flux reçus par les faces verticales et Flux3 est le flux reçu par la face horizontale supérieure (Figure 14).

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



5.3.4 RAPPEL SUR LE ROLE DES ECRANS THERMIQUES

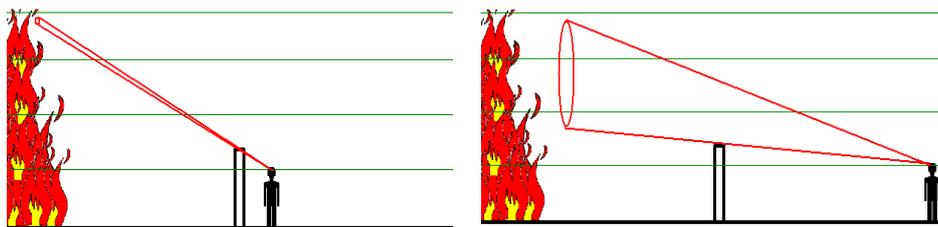
Les écrans jouent un rôle protecteur pour les cibles potentielles en masquant partiellement ou totalement les surfaces émettrices (Figure 15).



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

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

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



Cible proche de l'écran

Cible loin de l'écran

Figure 16 : Rôle protecteur des écrans déportés.

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

6. EFFETS ET SEUILS RETENUS

6.1 PREAMBULE

Les conséquences associées à un feu sont essentiellement liées :

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

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

6.2 EFFETS DU RAYONNEMENT THERMIQUE

6.2.1 NOTION DE BRULURES

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

Sa gravité dépend de plusieurs facteurs :

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

6.2.2 VULNERABILITE

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

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

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

6.2.3 EFFETS ET DOSE

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

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

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

Pour les effets sur l'homme :

- 3 kW/m², seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- 5 kW/m², seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement ;
- 8 kW/m², seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement.

Pour les effets sur les structures :

- 5 kW/m², seuil des destructions de vitres significatives ;
- 8 kW/m², seuil des effets domino¹ et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures ;
- 16 kW/m², seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton ;
- 20 kW/m², seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton ;
- 200 kW/m², seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

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

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

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

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

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

7. CONCLUSION

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

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

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

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

8. REFERENCES

M.G. ZABETAKIS(1965)

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

DRYSDALE (1985)

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

MC CAFFREY,

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

LIHOU, MAUND (1982)

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

American Petroleum Institute (1973)

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

LANNOY (1984)

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

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

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

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

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

HAMILTON, MORGAN (1952)

Radiant interchange configuration factors ;
NACA Technical Note 2386, 1952

STANNARD (1977)

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

DELICHATSIOS (1987)

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

F. P. LEES

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



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : <http://www.ineris.fr>