



L'incendie est une réaction de combustion, dite aussi oxydation thermique. A condition d'être suffisamment alimenté en combustible et comburant, le foyer initial se développera sans contrôle dans l'espace et le temps. C'est donc une réaction particulièrement exothermique dont environ 10% de l'énergie libérée est consommée par le brasier pour s'alimenter. Les 90% restants sont libérés sous forme de rayonnement, de conduction et de convection.

Un observateur à proximité d'un incendie ne perçoit donc que le rayonnement. C'est cette perception qui est dimensionnée lors du calcul des flux thermiques.

## 1. MÉTHODE DE CALCUL

Utilisé pour la maîtrise foncière autour des sites en activité, le calcul se doit d'être conservatoire tout en étant réaliste.

Le code utilisé par BEG Ingénierie pour modéliser le flux thermique rayonné est le modèle de la flamme solide, détaillé ci-dessous.

Le flux thermique reçu est fonction des caractéristiques des flammes (l'émetteur de chaleur), de la taille de la cible ainsi que de sa position par rapport au foyer.

La flamme sera vue soit comme un radiateur plan vertical (foyer rectangulaire) soit comme un cylindre vertical (foyer circulaire).

La radiation thermique reçue par une cible est donnée par la relation suivante :

$$\phi = \phi_0 \times F_{cible-flamme} \times \tau$$

avec :

$\Phi$	:	flux thermique reçu par la cible (kW/m <sup>2</sup> )
$\Phi_0$	:	flux thermique émis en surface de la flamme (kW/m <sup>2</sup> )
$F_{cible-flamme}$	:	facteur de vue (sans dimension)
$\tau$	:	transmission atmosphérique (sans dimension)

Les trois paramètres influant le flux thermique reçu sont explicités ci-après.

### 1.1. FLUX THERMIQUES ÉMIS À LA SURFACE D'UNE FLAMME

Le pouvoir émissif de la flamme est donné par la relation de Stefan-Boltzman :

$$\Phi_0 = \sigma \varepsilon T_f^4$$

avec :

$\Phi_0$	:	flux radiatif émis (W/m <sup>2</sup> )
$\sigma$	:	constante de Stefan-Boltzman - $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
$\varepsilon$	:	pouvoir émissif de la flamme (sans dimension)
$T_f$	:	température de flamme (K)

En pratique, cette formule s'avère souvent difficile à appliquer pour de multiples raisons (température de la flamme difficile à mesurer, présence de fumées jouant un rôle d'écran, etc.). C'est pourquoi, pour estimer le flux radiatif émis, il est préférable :

- soit d'utiliser les valeurs expérimentales disponibles dans la littérature (TNO, INERIS, TEWARSON...),
- soit de décider a priori d'un flux radiatif émis moyenné sur toute la hauteur des flammes, le plus souvent pris aux alentours de 30 kW/m<sup>2</sup> pour les grands feux pétroliers (> 2000 m<sup>2</sup>) (LANNOY),
- soit, pour les feux très fumigènes, d'employer la relation de Mudan (MUDAN), rappelée ci-dessous :

$$\Phi_0 = 140 \exp(0.12Deq) + 20(1 - \exp(-0.12Deq))$$

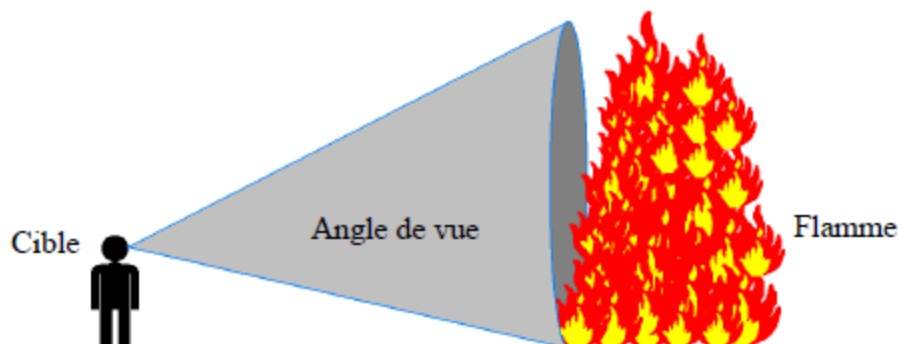
avec :

$\Phi_0$	:	flux radiatif émis (kW/m <sup>2</sup> )
Deq	:	diamètre équivalent de la surface en feu (m)

Cette corrélation rend compte de la diminution de  $\Phi_0$  avec l'augmentation de la surface en feu, en raison, principalement, de la recrudescence des imbrûlés (suies) et donc de l'obscurcissement de la flamme. Elle a été établie notamment à partir de feux de kérosène ou de GPL et n'est adaptée qu'à des feux produisant des suies en quantités significatives.

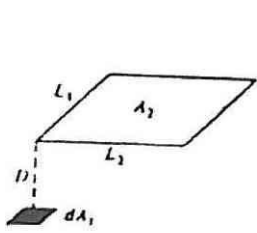
## 1.2. FACTEUR DE FORME

Le facteur de forme  $F_{A \rightarrow B}$  (ou angle de vue) est un coefficient qui exprime la part du flux quittant A qui atteint B. Il est utilisé notamment dans le calcul des transferts de chaleur par rayonnement.



Il s'exprime comme suit lorsque les surfaces émettrices et réceptrices sont parallèles et que le récepteur est situé en face du coin de l'émetteur :

Surface élémentaire parallèle à un élément rectangulaire de surface finie.



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

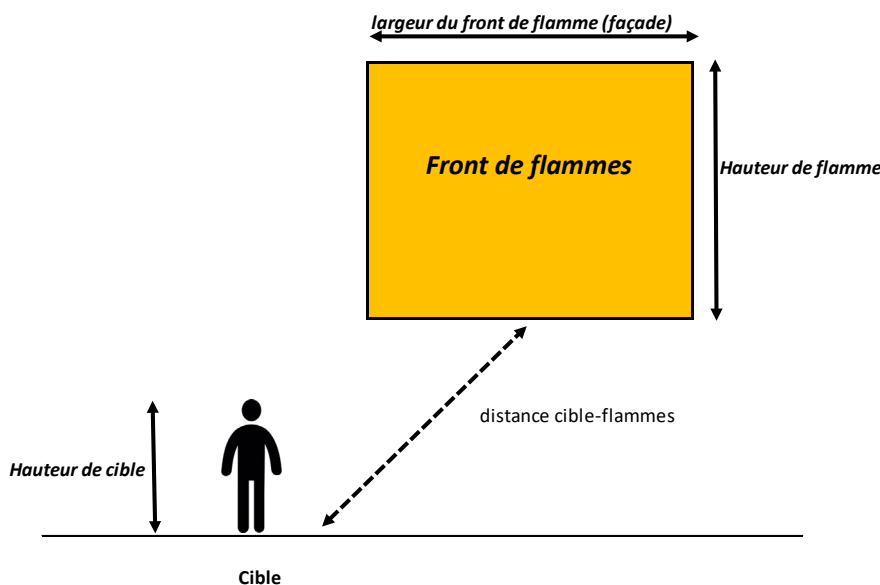
où  $X = \frac{L_1}{D}$  et  $Y = \frac{L_2}{D}$

Le facteur de vue nous intéressant, c'est-à-dire  $F_{flamme \rightarrow cible}$ , est fonction de l'angle solide sous lequel la cible reçoit le rayonnement et a été évalué selon la méthodologie développée dans l'ouvrage « Yellow Book » du TNO, Chapitre 6 « Heat flux from fires ».

Il a été tabulé en fonction de la géométrie de l'émetteur et des positions respectives de l'émetteur et de la cible pour une cible verticale.

Le flux thermique reçu par un point situé face à un mur de flamme varie selon :

- la distance entre le récepteur et le mur de flamme (d),
- la hauteur de la cible par rapport au sol (c'est-à-dire base de la surface en feu) (h),
- la distance entre l'extrémité latérale du mur de flamme et la perpendiculaire au point concerné (a),
- la hauteur de la flamme.



Tous les paramètres étant égaux par ailleurs, le flux thermique est maximal au niveau de la médiatrice du mur de flamme et minimum aux extrémités latérales.

Les variables  $d$ ,  $h$  et  $a$  correspondent à une mise en situation précise : personne de taille généralement prise égale à 1,80 mètre et que l'on déplace parallèlement au mur de feu, la hauteur par rapport au sol étant fonction de la topographie locale. Par contre, la hauteur de flamme se calcule car elle dépend

- du diamètre équivalent du foyer : **Deq**, déduit des caractéristiques géométriques de la cuvette ou du local en feu ;
- de la vitesse de combustion<sup>1</sup> (ou taux massique surfacique de combustion) : **m''**, dépendante de la nature du combustible, de son état de division, de son mode stockage et de son conditionnement.

### 1.3. HAUTEUR DE FLAMME

La corrélation de THOMAS est usuellement utilisée pour calculer la hauteur de flamme :

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

Avec :

Hf	:	hauteur de la flamme (m)	
D	:	diamètre du feu circulaire ou diamètre équivalent du feu non circulaire (m)	
m''	:	vitesse de combustion (kg/m <sup>2</sup> .s)	
ρ <sub>a</sub>	:	densité de l'air ambiant (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>a</sub> = 1,22 kg/m <sup>3</sup> à 15°C
g	:	accélération de la pesanteur (m/s <sup>2</sup> )	g = 9,81 m <sup>2</sup> /s

Cette corrélation possède néanmoins une limite de validité dépendante de la surface en feu et est majorante lorsque ladite surface est supérieure à 2 000 m<sup>2</sup>. C'est la raison pour laquelle, dans un souci de réalisme et en tenant compte du retour d'expérience résultant de l'observation des hauteurs de flammes constatées sur des sinistres industriels, la hauteur de flamme est très souvent limitée à trois fois la hauteur sous poutre.

## 1.4. TRANSMISSION ATMOSPHÉRIQUE

La radiation de la flamme vers l'environnement est partiellement atténuée tout au long de son parcours dans l'air. Ceci est le fait de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et des poussières qui absorbent et dissipent une partie des radiations émises. La vapeur d'eau est le principal facteur d'absorption.

Le coefficient de transmission atmosphérique ( $\tau$ ) correspond donc à la fraction de chaleur transmise à l'atmosphère.

Ce coefficient de transmission peut être déterminé à l'aide d'abaque, comme une fonction de la distance et de l'humidité relative de l'air.

Nous avons retenu le modèle de Brzustowski :

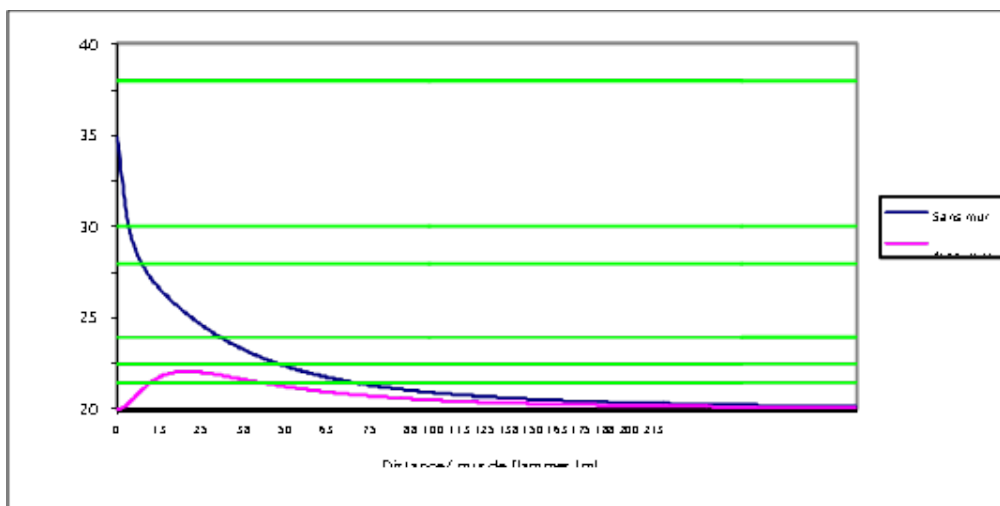
$$\tau = 0,79 \times (100/x)^{1/16} \times (30,5/r)^{1/16}$$

avec :

- $\tau$  : coefficient de transmission atmosphérique (sans dimension)
- $r$  : taux d'humidité de l'air (%)
- $x$  : distance entre le centre de la flamme et la cible (m) correspondant à l'épaisseur de la couche d'air entre la cible et la flamme.

## 2. PRISE EN COMPTE DES ÉCRANS COUPE-FEU

La présence éventuelle d'écrans coupe feu (mur, merlons, etc...) est prise en compte car la distance d'effets se trouve atténuée.



Comme le montre la figure ci-dessus, l'absence de mur se traduit par un rayonnement thermique diminuant avec la distance. Ceci s'explique par la diminution de la transmission de l'air et du facteur de vue.

En plaçant un écran thermique en limite périphérique du foyer, nous constatons que le rayonnement est moins intense, mais aussi que son évolution spatiale diffère : il est d'abord croissant, puis décroissant. En effet, une personne placée juste derrière l'écran thermique verra peu la flamme. En s'éloignant, le facteur de vue augmentera, les effets thermiques également, puis au-delà d'une certaine distance, l'éloignement deviendra prépondérant et les effets s'estomperont.

En cas d'écran déporté du type merlon de terre, le flux reçu jusqu'au merlon est inchangé. Lorsque le récepteur se place derrière le merlon, il ne voit plus ou peu la flamme. Le flux reçu s'affaiblit en conséquence.

### 3. EFFETS DES FLUX THERMIQUES, SEUILS RETENUS

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

Effets sur les structures :

- 5 kW/m<sup>2</sup>, seuil des destructions de vitres significatives
- 8 kW/m<sup>2</sup>, seuil des effets domino et correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures
- 16 kW/m<sup>2</sup>, seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
- 20 kW/m<sup>2</sup>, seuil de tenue béton plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton
- 200 kW/m<sup>2</sup>, seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes

Effets sur l'homme :

- 3 kW/m<sup>2</sup>, seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine
- 5 kW/m<sup>2</sup>, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine
- 8 kW/m<sup>2</sup>, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine

#### **4. APPLICATION AUX STOCKAGES D'AÉROSOLS**

Cette méthodologie est applicable aux stockages de produits conditionnés sous forme de bouteilles aérosols.

Les hypothèses retenues sont celles issues du rapport Omega 4 publié par l'INERIS : « Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels : Modélisation d'un incendie affectant un stockage de générateurs d'aérosols ».

- Pouvoir émissif : 100 kW sur toute la hauteur de la flamme.
- Hauteur de flamme : hauteur de stockage + 10 m