

MODELISATION DES FLUX THERMIQUES RAYONNES

FEU DE RETENTION OU FEU DE BATIMENT

1. Rappel

L'incendie est un phénomène nécessitant un combustible, un comburant et une source d'allumage apportant l'énergie d'activation à la réaction de combustion. La suppression de l'un de ces trois éléments évite son apparition.

L'incendie est une réaction de combustion, dite aussi oxydation thermique : à 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.

2. Le 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 BIGS pour modéliser le flux thermique rayonné est le modèle de la flamme solide, détaillé ci-dessous.

Les scénarii retenus permettent de dimensionner géométriquement la surface en feu :

- Feu de cuvette de rétention (cas des liquides inflammables) ;
- Feu dans un local compartimenté coupe-feu (cas des cellules d'entrepôt) ;
- Feu dans plusieurs locaux en cas de non-efficacité, ou d'absence, de compartimentage coupe-feu ; dans ce cas, et uniquement dans ce cas, il est tenu compte de la vitesse de propagation de l'incendie.

Le flux thermique reçu est fonction des caractéristiques des flammes (l'émetteur de chaleur), de la taille de la personne (le récepteur) 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 :

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

avec :

| | | |
|---------------------------|---|--|
| Φ | : | flux thermique reçu par la cible (kW/m ²) |
| Φ_0 | : | flux thermique émis en surface de la flamme (kW/m ²) |
| $F_{\text{cible-flamme}}$ | : | facteur de vue (sans dimension) |
| τ | : | transmission atmosphérique (sans dimension) |

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

2.1 Flux thermique émis en surface de flamme

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

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

avec :

| | | |
|---------------|---|--|
| Φ_0 | : | flux radiatif émis (W/m ²) |
| σ | : | constante de Stefan-Boltzman - $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ |
| ε | : | 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/m² pour les grands feux pétroliers (> 2000 m²) (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 :

| | | |
|----------|---|--|
| Φ_0 | : | flux radiatif émis (kW/m ²) |
| Deq | : | diamètre équivalent de la surface en feu (m) |

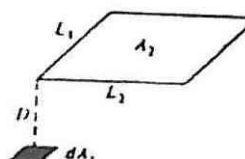
Cette corrélation rend compte de la diminution de Φ_0 avec l'augmentation de la surface en feu, en raison, principalement, de la recrudescence des imbrûlés (suies) et donc de l'obscurcissement de la flamme. Elle a été établie notamment à partir de feux de kérosène ou de GPL et n'est adaptée qu'à des feux produisant des suies en quantités significatives.

2.2 Facteur de vue

En physique, le facteur de forme $F_{A \rightarrow B}$ 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.



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

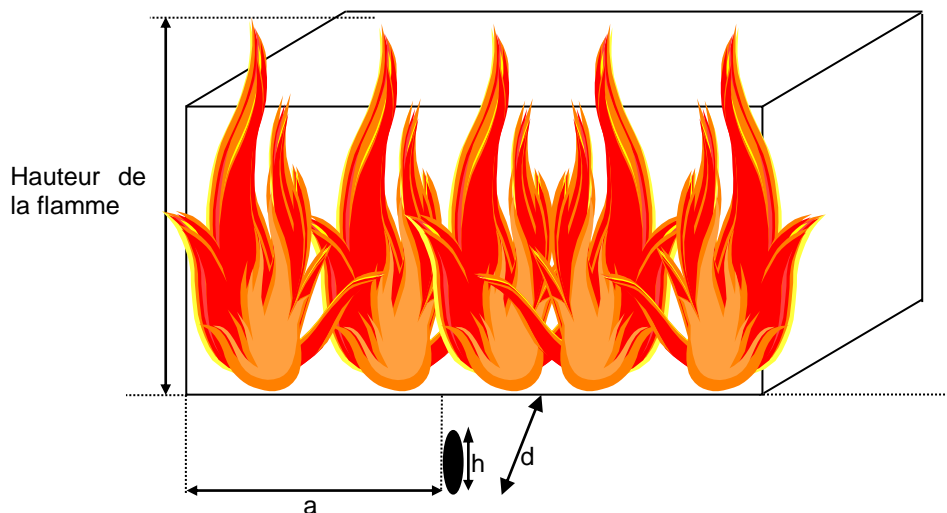
où $X = \frac{L_1}{D}$ et $Y = \frac{L_2}{D}$

Le facteur de vue nous intéressant, c'est-à-dire $F_{\text{flamme} \rightarrow \text{cible}}$, 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 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 combustion¹ (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.

La corrélation de THOMAS est usuellement utilisée :

$$H_f = 42 D_{eq} \left[\frac{m''}{\rho_a (g D_{eq})^{0.5}} \right]^{0.61}$$

avec :

| | | |
|----------------------|---|--|
| H_f | : | hauteur de la flamme (m) |
| Deq | : | diamètre du feu circulaire ou diamètre équivalent du feu non circulaire (m) |
| m'' | : | vitesse de combustion (kg/m ² .s) |
| ρ_a | : | densité de l'air ambiant (kg/m ³) – ρ _a = 1,22 kg/m ³ à 15°C |
| g | : | accélération de la pesanteur (m/s ²) – g = 9,81 m/s ² |

¹ La vitesse de combustion d'un produit est une donnée obtenue expérimentalement (cf. DRYSDALE, SFPE, ...). La vitesse de combustion d'un mélange de produits est évaluée comme étant la somme pondérée du taux de combustion de chacun des produits impliqués.

Néanmoins, cette corrélation possède une limite de validité dépendante de la surface en feu et est majorante lorsque ladite surface est supérieure à 2 000 m². 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.

2.3 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 (τ) 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 :

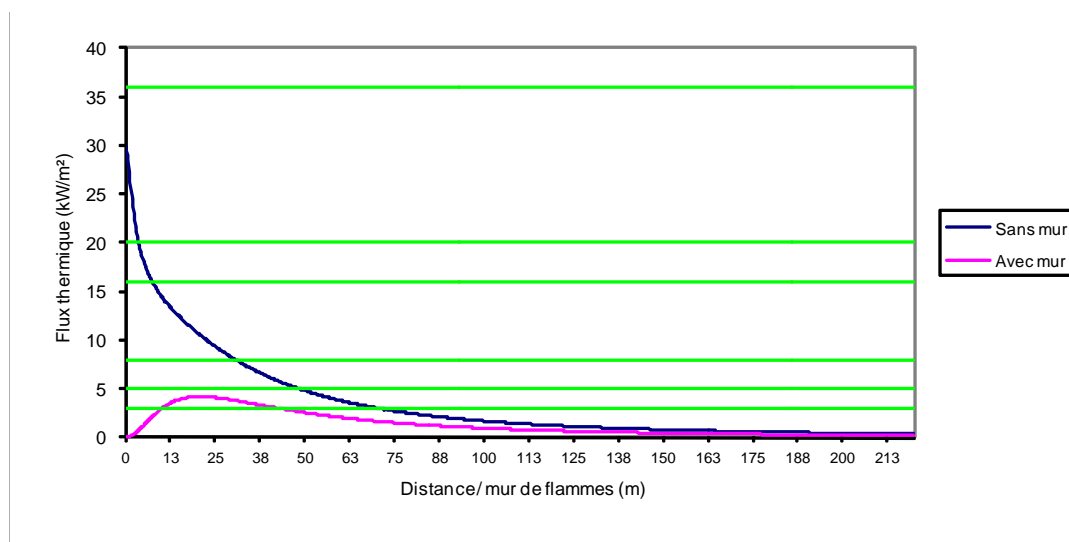
$$\tau = 0.79 \left(\frac{100}{RH} \right)^{1/16} \left(\frac{30.5}{d} \right)^{1/16}$$

avec :

- τ : coefficient de transmission atmosphérique (sans dimension)
- RH** : taux d'humidité de l'air (%)
- d** : distance entre le centre de la flamme et la cible (m)

3. Prise en compte des écrans

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.

4. Effets des flux thermiques

Les effets des flux thermiques dépendent de la valeur du flux reçu.

| Effets du flux thermique | |
|--------------------------------|---|
| Flux reçu (kW/m ²) | Effets |
| 0,7 | Coup de soleil pour une exposition de très longue durée sans protection ni préparation |
| 1 | Rayonnement solaire en zone tropicale |
| 1,5 | Seuil maximum en continu pour des personnes non protégées |
| 2 | Douleur en 1 minute. Exposition de 40 à 140 secondes, avec un temps moyen de 100 secondes, rougissement de la peau |
| 2,5 | Les personnes normalement habillées, sans fragilités particulières, peuvent s'exposer plusieurs minutes en bougeant |
| 3 | Exposition de 1 minute, début d'apparition de cloques sur les peaux très sensibles. Seuil retenu pour les ERP (Etablissement Recevant du Public) |
| 5 | Cloques possibles pour des expositions de 20 à 90 secondes. Seuil retenu pour les habitations |
| 10 | Douleur en 5 à 10 secondes. Brûlures du 2 ^{ème} degré en 40 secondes. Pour une exposition de 50 secondes, 1% de décès |
| 15 | Pyrolyse de certains matériaux et début d'émission de vapeurs inflammables qui peuvent s'enflammer selon les circonstances (contacts de flammèches, brandons enflammés) |
| 20 | Tenue du béton plusieurs heures. La température atteint 100°C à 3 cm dans le béton en 45 minutes. Inflammation possible de certains plastiques |
| 25 | Inflammation possible de certains bois secs |
| 30 | Condition de l'essai réglementaire de réaction au feu, en présence d'une flamme pilote |
| 50 | Brûlures immédiates et 1% de décès après une exposition de 10 secondes |
| 100 | La température atteint 100°C à 10 cm dans le béton en 3 heures |

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

- Effets sur les structures :
 - 5 kW/m², seuil des destructions de vitres significatives
 - 8 kW/m², seuil des effets domino et correspondant au seuil des 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 béton 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
- Effets sur l'homme :
 - 3 kW/m², seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine
 - 5 kW/m², seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine
 - 8 kW/m², seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine