

## 1 Présentation du phénomène d'incendie

En cas d'incendie, les flammes et les fumées émettent une partie de l'énergie libérée par la réaction de combustion sous forme de radiations électromagnétiques. La part de ces radiations situées dans l'infrarouge est une source d'agression pour les personnes ou les installations industrielles qu'il est nécessaire de dimensionner dans les études de danger.

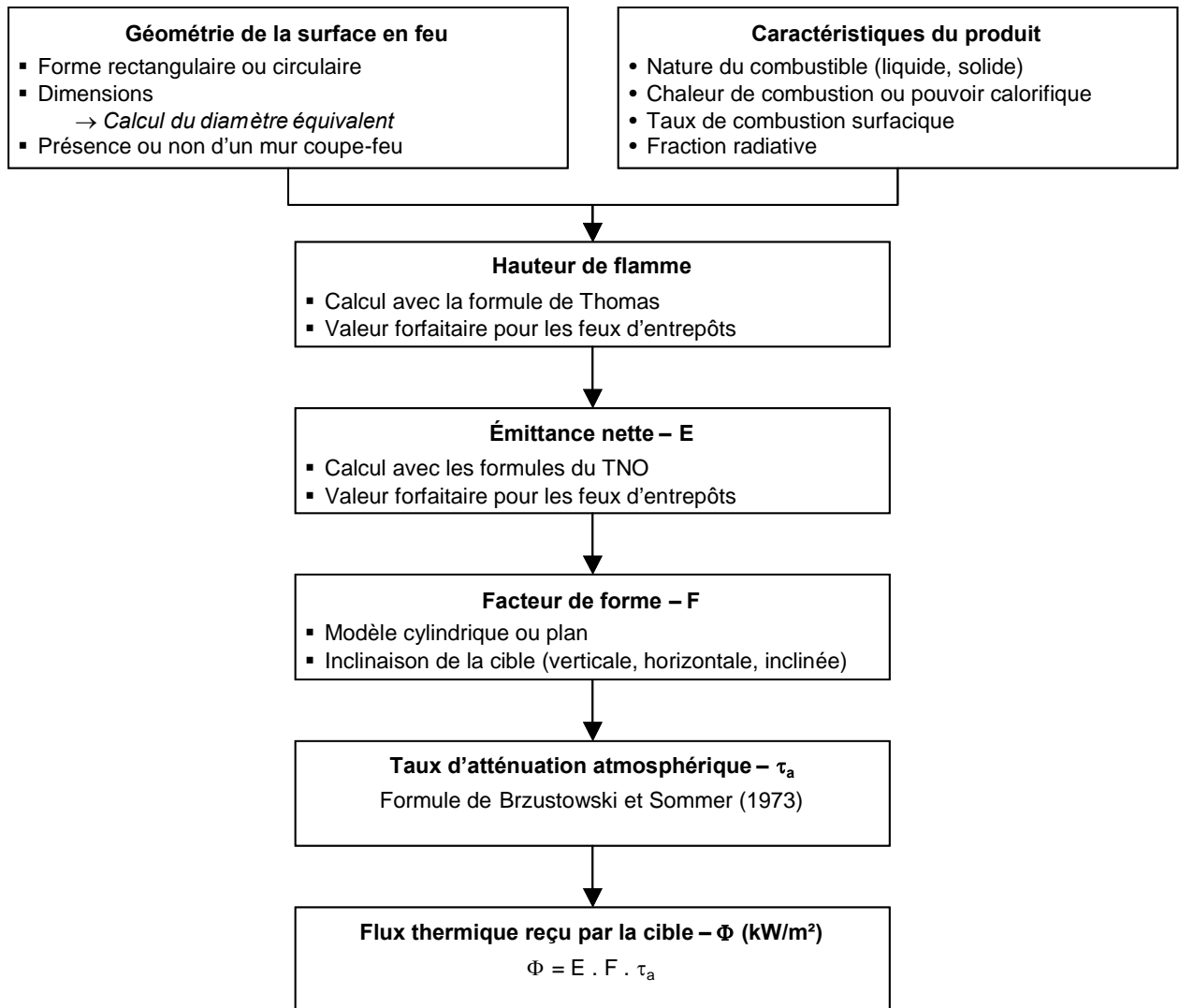
Plusieurs modèles mathématiques existent pour estimer ces conséquences selon la géométrie de l'incendie. Dans le cas des feux de cuvettes et d'entrepôts, c'est le modèle du radiateur plan présenté par le TNO qui est employé. Le mur de flammes y est assimilé à un plan vertical émettant une certaine puissance radiative par unité de surface donnée. Le flux thermique reçu par un observateur est calculé en fonction de sa position par rapport à ce plan.

## 2 Méthodologie

La méthode de calcul utilisée est celle du TNO (The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research) décrite dans le *Yellow Book* [1] et [2]. Certains points sont issus de la seconde édition de « *An Introduction to Fire Dynamics* » [3], notamment pour la règle d'additivité des flux.

Cette méthode est intégrée dans un logiciel développé par APAVE – **FluTherm V3** - pour réaliser les calculs de flux thermiques. Celui-ci permet de calculer la hauteur de flamme et la décroissance du flux thermique en fonction de la distance par rapport à une surface émettrice assimilée à un cylindre ou à un plan rectangulaire représentatif de l'incendie à modéliser.

Le principe de cette méthode est décrit sur l'organigramme suivant :



## 2.1 Hauteur de flamme

Dans le cas d'un feu de liquide inflammable, la hauteur de flamme peut être approchée par plusieurs corrélations empiriques. Celle utilisée dans FluTherm est la corrélation de Thomas citée par le TNO [2] et l'INERIS [4].

La relation de Thomas :

$$H_{FL} = 42 \cdot D_{EQ} \cdot \left[ \frac{m''}{\rho_{air} \sqrt{g \cdot D_{EQ}}} \right]^{0,61}$$

avec	$D_{EQ}$	le diamètre équivalent du feu (m)
	$H_{FL}$	Hauteur de Flammes (m)
	$\rho_{air}$	la masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )
	$m''$	Taux de combustion surfacique ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )
	$g$	Accélération de la pesanteur ( $\text{m/s}^2$ )

En grande majorité ces corrélations empiriques font intervenir le taux de combustion ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) qui représente la quantité de combustible (kg) participant à l'incendie par unité de surface au sol ( $\text{m}^2$ ) et de temps (s).

La corrélation de Thomas suppose que la combustion ait lieu dans la flamme, c'est une combustion homogène pour laquelle le combustible pyrolyse, émet des gaz qui se mélange à l'air et brûlent dans la flamme. Ce n'est pas le cas des braises qui sont elles-mêmes le siège d'une combustion hétérogène solide-gaz.

L'INERIS limite donc la hauteur des flammes et choisit un seuil à 3 fois la hauteur sous faitage (Source : Face au risque n°394 – Juin - Juillet 2003). Pour autant, toujours selon l'INERIS, dans certains cas où la vitesse de combustion est faible, il est possible que la corrélation de Thomas conduise à calculer des hauteurs de flammes inférieures à 3 fois la hauteur sous faitage. Dans ce cas, c'est cette hauteur calculée qui doit être retenue.

## 2.2 Emission

L'émission d'une flamme, appelée aussi « flux thermique initial » ou « pouvoir émissif », correspond à l'énergie rayonnée par la flamme par unité de surface et par unité de temps. Elle s'exprime en  $\text{kW/m}^2$ .

Le modèle utilisé est le modèle de flamme 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 la flamme. La surface émettrice est donc supposée homogène, c'est-à-dire que la valeur du flux thermique initial (émission nette) est supposée identique sur toute la surface.

### Emission brute

L'émission brute d'une flamme correspond à l'énergie rayonnée par la flamme sans tenir compte des fumées et suies générées par l'incendie. Selon le TNO l'émission brute peut être exprimée par la corrélation expérimentale suivante :

$$E_{brute} = \eta \frac{\dot{m} \cdot \Delta H_c}{\left(1 + 4 \cdot \frac{hf}{Deq}\right)}$$

- Avec :
- $E_{brute}$  : Emittance brute (kW/m<sup>2</sup>)
  - $\eta$  : Fraction radiative
  - $\dot{m}$  : Taux de combustion surfacique (kg/m<sup>2</sup>.s)
  - $\Delta H_c$  : Enthalpie de combustion (kJ/kg)
  - $hf$  : Hauteur de flamme (m)
  - $Deq$  : Diamètre équivalent de la cuvette (m)

### **Emittance nette**

Dans un incendie, 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. Cet effet d'écran tend à diminuer le pouvoir émissif moyen de la flamme.

La part de l'énergie rayonnée par les flammes et absorbée par les fumées est ensuite réémise selon une émittance de 20 kW/m<sup>2</sup> [2]. En utilisant la loi de Stefan Boltzman ( $\varphi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ ), et en considérant une émissivité de 1, cette émittance des fumées correspond à une température des fumées d'environ 470°C.

Pour les hydrocarbures, la part absorbée par les fumées est communément fixée à 80 % [2].

Cependant, certains produits comme l'éthanol possèdent un faible pouvoir fumigène. Ainsi, de manière à rendre compte de cette faible émission de fumées et donc une plus forte visibilité de la flamme, nous nous proposons de réduire la part absorbée puis réémise par les fumées à 20% (voire moins pour petites surfaces en feu) pour les alcools.

L'*émittance nette* peut être obtenue avec la formule suivante :

$$E_{nette} = [ E_{brute} \cdot (1 - \xi) + E_{fumée} \cdot \xi ] \cdot \tau_a$$

- Avec :
- $E_{nette}$  : Emittance nette en kW/m<sup>2</sup>
  - $E_{brute}$  : Emittance brute en kW/m<sup>2</sup>
  - $E_{fumée}$  : Emittance des fumées fixée à 20kW/m<sup>2</sup>
  - $\xi$  : Fraction de la surface de flamme couverte par la fumée  
*80% pour les hydrocarbures selon TNO [2]*  
*20% pour les produits émettant peu de fumée comme l'éthanol (APAVE)*
  - $\tau_a$  : Transmittivité atmosphérique

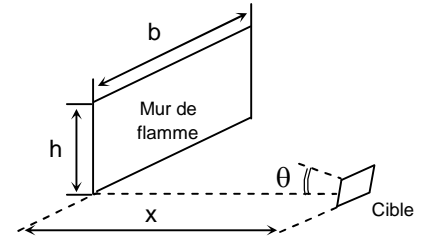
**NB :** Pour le calcul du flux thermique reçu  $\Phi$ , c'est l'émittance nette qui est prise en compte et qui est recalculée pour chaque scénario

## 2.3 Facteur de forme

L'évaluation des facteurs de forme est réalisée pour un mur de flamme assimilé à un radiateur plan, et un observateur de faibles dimensions.

Pour un foyer dont les caractéristiques géométriques sont représentées sur la figure ci-contre, on définit :

$$h_r = \frac{h}{b} \quad x_r = \frac{x}{b} \quad A = \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + x_r^2}} \quad B = \frac{h_r}{\sqrt{1 + x_r^2}}$$



$$F_{\max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$$

Où :

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ h_r \cdot A \cdot \tan^{-1}(A) + \frac{B}{h_r} \cdot \tan^{-1}(B) \right\} \text{ avec } h_r = \frac{h}{b} \text{ et } B = \frac{h_r}{\sqrt{1 + x_r^2}}$$

et

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \tan^{-1}\left(\frac{1}{x_r}\right) - A \cdot x_r \cdot \tan^{-1}(A) \right\} \text{ avec } x_r = \frac{x}{b} \text{ et } A = \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + x_r^2}}$$

## 2.4 Taux d'atténuation atmosphérique

Le taux d'atténuation atmosphérique  $T_a$  représente l'absorption du flux de rayonnement thermique par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone contenus dans l'air.

Le facteur de transmissivité atmosphérique  $\tau_a$  est donné par la relation suivante :

$$\tau_a = 1 - T_a = 1 - \alpha_{eau} - \alpha_{CO_2}$$

Avec :

$\tau_a$  : facteur de transmissivité de l'atmosphère,

$T_a$  : taux d'atténuation atmosphérique,

$\alpha_{eau}$  : facteur d'absorption de l'eau,

$\alpha_{CO_2}$  : facteur d'absorption du dioxyde de carbone.

Les facteurs d'absorption  $\alpha$  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.

Le facteur de transmissivité atmosphérique évolue avec la distance entre l'observateur et le mur de flammes. À une température donnée, le taux d'atténuation atmosphérique augmente lorsque la distance de la cible à la flamme ou l'humidité relative de l'air augmente.

D'après le rapport de l'INERIS sur les feux de nappe [4], la corrélation de Brzustowski et Sommer (1973) semble être le meilleur compromis entre précision et complexité pour la détermination du facteur de transmissivité atmosphérique, c'est cette corrélation qui est utilisée par FluTherm :

$$\tau_a = 1 - T_a = 0,79 \cdot \left(\frac{100}{x}\right)^{1/16} \cdot \left(\frac{30,5}{r}\right)^{1/16}$$

Avec :

- $\tau_a$  : facteur de transmissivité de l'atmosphère,
- $T_a$  : taux d'atténuation atmosphérique,
- $x$  : distance entre le mur de flammes et l'observateur en m,
- $r$  : taux d'humidité relative de l'air (%).

Pour la plupart des régions françaises, le taux moyen d'humidité relative de l'air est d'environ 70 %.

## 2.5 Flux thermique reçu

Un observateur exposé aux flammes d'un incendie et aux combustibles portés à haute température reçoit un flux radiatif exprimé en kW/m<sup>2</sup> qui peut être formalisé selon :

$$\Phi = E \cdot F \cdot \tau_a$$

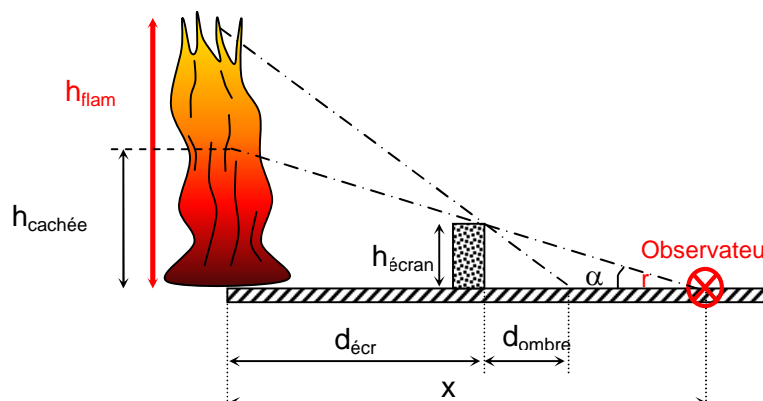
Avec :

- $E$  : Flux source émis par le mur de flammes ou émittance en kW/m<sup>2</sup>
- $F$  : Facteur de forme traduisant les positions relatives de la source et de la cible, qui dépend à la fois de la distance de l'observateur au foyer et des dimensions du mur de flammes
- $\tau_a$  : Transmittivité atmosphérique, facteur d'atténuation représentant l'absorption de flux par la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub> contenus dans l'air

### Prise en compte des protections passives

Lorsque des écrans de protection (merlons de terre, murs coupe-feu adaptés à la durée d'incendie...) existent, ces structures sont considérées comme faisant écran au rayonnement thermique. La méthodologie utilisée est le *principe d'additivité des flux thermiques*.

Ce principe a été appliqué dans le cas présenté sur la figure ci-dessous :



Le flux thermique reçu devient alors :

$$\Phi_{\text{reçu}} = \Phi_{\text{total}} - \Phi_{\text{cachée}}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{total}} &= \Phi (d=x, h_{\text{flamme}} = h_{\text{flamme réelle}}) \\ \Phi_{\text{cachée}} &= \Phi (d=x, h_{\text{flamme}} = h_{\text{cachée}}) \end{aligned} \quad \text{Ou} \quad h_{\text{cachée}} = \frac{x}{X - d_{\text{écran}}} \cdot h_{\text{écran}}$$

**Remarque :** Les distances d'effets thermiques de distances inférieures à 10 m sont données à titre informatif attendu qu'elles ne sont pas pertinentes dans le cadre du rayonnement en champ proche. En effet dans le champ proche ce sont les effets de conduction qui sont prépondérants.

### 3 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects, CPR 14E, TNO, 1992
- [2] Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects, CPR 14E, TNO, 1997
- [3] Introduction to fire dynamics, Dougal Drysdale, Second edition, 1998
- [4] Feux de nappes, INERIS, 2002