I. CALCULS PREALABLES AU CALCUL DU FLUX THERMIQUE

Les différents chapitres présentés à suivre présentent les différentes étapes de calcul permettant d'aboutir à la détermination finale des distances d'effet correspondant au flux thermiques suivants :

- **3 kW/m²** : seuils des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine »,
- **5 kW/m²** : seuils des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine,
- **8 kW/m²** : seuils des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine.

I.1. Dimensions de la flamme

I.1.1. Diamètre équivalent (D_{eq})

Pour un feu de nappe rectangulaire, le diamètre équivalent est calculé par la formule suivante (cas où la longueur est inférieure à 2,5 fois la largeur) :

$$D_{eq} = \frac{4 \times S}{P}$$

Avec : D_{eq} = Diamètre équivalent de la nappe (m),
S = Surface de la nappe (m^2),
P = Périmètre de la nappe (m).

Pour un feu de nappe circulaire, le diamètre équivalent est calculé par la formule suivante :

$$D_{eq} = 2R$$

Avec : D_{eq} = Diamètre équivalent de la nappe (m),
R = Rayon du cercle (m).

I.1.2. Hauteur ou longueur de flamme (L)

La hauteur de flamme est déterminée à l'aide de la formule de Thomas ou de Moorhouse selon leur domaine de validité :

- La formule de Thomas est valide pour les feux dont le rapport H/D_{eq} est compris entre 3 et 10 ;

- La formule de Moorhouse est valide pour les feux dont le rapport H/D_{eq} est compris entre 1 et 3.

Pour un vent nul, la formule de **Thomas** est la suivante :

$$L = 42 \times D_{eq} \times \left(\frac{m''}{\rho_a \sqrt{g.D_{eq}}}\right)^{0.61}$$

Avec : L = Hauteur de flamme (m),
D_{eq} = Diamètre équivalent de la nappe (m),
m'' = Vitesse de combustion (kg/m^2/s),
ρ_a = Masse volumique de l'air à température ambiante (kg/m³),
g = Accélération gravitationnelle (= 9,81 m/s²).

En considérant la masse volumique de l'air à température ambiante à 1,161 kg/m^3, la formule simplifiée de Thomas devient :

$$L = 19{,}1 \times D_{eq}^{0{,}695} \times m''^{0{,}61}$$

La formule de **Moorhouse**, pour un vent nul, est la suivante :

$$L = 6{,}2 \times D_{eq} \times \left(\frac{m''}{\rho_a \sqrt{g.D_{eq}}}\right)^{0.254}$$

Avec : L = Hauteur de flamme (m),
D_{eq} = Diamètre équivalent de la nappe (m),
m'' = Vitesse de combustion (kg/m^2/s),
ρ_a = Masse volumique de l'air à température ambiante (kg/m³),
g = Accélération gravitationnelle (= 9,81 m/s²).

I.1.3. Effets dus au vent

I.1.3.a. Correction de la hauteur de flamme

La formule de **Thomas**, corrigée en fonction du vent, est la suivante :

$$L = 55 \times D_{eq} \times \left(\frac{m''}{\rho_a \sqrt{g.D_{eq}}}\right)^{0.67} \times (u^*)^{-0{,}21}$$

Avec : $u^* = u_w/u_c$: vitesse adimensionnelle du vent,
u_w = Vitesse du vent (m/s),
$u_c = \left(gD_{eq}\frac{m''}{\rho_a}\right)^{1/3}$: Vitesse caractéristique du vent,

Si $u_w < u_c$, $u^* = 1$

Avec : L = Hauteur de flamme (m),
D_{eq} = Diamètre équivalent de la nappe (m),
m'' = Vitesse de combustion (kg/m^2/s),
ρ_a = Masse volumique de l'air à température ambiante (kg/m³),
g = Accélération gravitationnelle (= 9,81 m/s²).

En considérant la masse volumique de l'air à température ambiante à 1,161 kg/m^3, la formule corrigée de Thomas devient :

$$L = 26{,}89 \times D_{eq}^{0{,}735} \times m''^{0{,}74} \times u_w^{-0{,}21}$$

La formule de Moorhouse corrigée est la suivante :

$$L = 6{,}2 \times D_{eq} \times \left(\frac{m''}{\rho_a \sqrt{g.D_{eq}}}\right)^{0.254} \times (u_{10}^*)^{-0{,}044}$$

Avec : u_{10}^* = Vitesse adimensionnelle du vent à 10 m d'altitude,

Avec : L = Hauteur de flamme (m),
D_{eq} = Diamètre équivalent de la nappe (m),
m'' = Vitesse de combustion (kg/m^2/s),
ρ_a = Masse volumique de l'air à température ambiante (kg/m^3),
g = Accélération gravitationnelle (= 9,81 m/s^2).

Remarque : Comme suite à des mesures effectuées, il semble qu'en présence de vent la corrélation de Thomas donne des résultats légèrement meilleurs que celle de Moorhouse.

I.1.3.b. Angle d'inclinaison de la flamme

Cet angle peut être estimé à partir de la vitesse du vent grâce à la formule établie par l'American Gas Association (AGA), à partir de **feux de gaz naturel** :

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{g\ m''\ D_{eq}}{\rho_a}\right)^{1/3}}$$

$$\text{Si } u^* < 1 \text{ alors } cos\theta = 1$$

$$\text{Si } u^* \geq 1 \text{ alors } cos\theta = \frac{1}{\sqrt{u^*}}$$

Avec : θ = Angle d'inclinaison de la flamme (degrés),
u_w = Vitesse du vent à 1,60 m (m/s),
D_{eq} = Diamètre équivalent de la nappe (m),
m'' = Vitesse de combustion (kg/m^2/s),
ρ_a = Masse volumique de l'air à température ambiante (kg/m^3),
g = Accélération gravitationnelle (= 9,81 m/s^2).

Welker et Sliepcevitch proposent une autre corrélation, établie à partir d'essais sur des **feux de combustibles liquides** dont le diamètre n'excédait pas 60 cm :

$$\frac{tan\theta}{cos\theta} = 3{,}3 \times R_e^{0.07} \times F_r^{0{,}8} \times \left(\frac{\rho_g}{\rho_a}\right)^{-0.6}$$

Avec : ρ_g = Masse spécifique du combustible en phase vapeur, à sa température d'ébullition (kg/m^3),

Avec : Fr = Nombre de Froude :

$$F_r = \frac{u_w^2}{D_{eq} \times g}$$

Avec : Re = Nombre de Reynolds :

$$R_e = \frac{D_{eq} \times u_w}{v}$$

Avec : v = Viscosité cinématique de l'air (m²/s) :

$$v = \frac{\mu_a}{\rho_a}$$

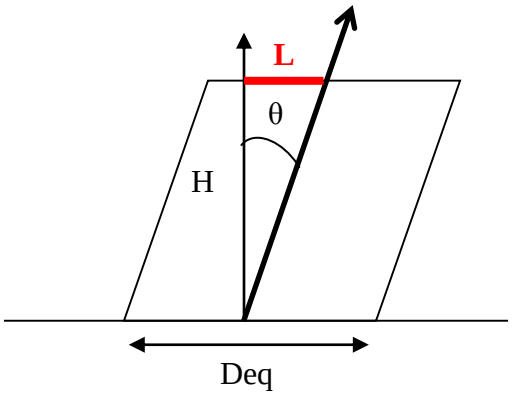
Avec : μ_a = Viscosité dynamique de l'air ($1{,}9.10^{-5}$ kg.m^{-1}.s^{-1}),

D'après ses travaux sur des **feux de produits cellulosiques**, Thomas propose la corrélation suivante pour le calcul de l'angle d'inclinaison :

$$cos\theta = 0{,}7 \left(\frac{u_w}{\left(\frac{g\ m''\ D_{eq}}{\rho_a}\right)^{1/3}} \right)^{-0{,}49}$$

I.1.3.c. Distance de décalage de la flamme

Afin de tenir compte de l'effet du vent (et puisque le facteur de vue calculé au I4 correspond à un facteur de vue plan), il est ajouté à la distance d'effet, la distance L (distance de décalage de la flamme) comme présenté sur le schéma inséré ci-après.



I.2. Transmissivité atmosphérique (τ)

Le facteur de transmissivité atmosphérique est calculé à partir de la corrélation de Bagster°:

$$\tau(r) = 2{,}02 \times (HR \times T_{VAP(H2O)} \times r)^{-0{,}09}$$

Avec : $T_{VAP(H2O)}$ = Tension de vapeur de l'eau (1 665 Pa à 15°C),
HR = Humidité relative (70 %),
r = distance de la cible à la source (m).

I.3. Pouvoir émissif (Φ_0)

Dans le cas des **feux solides**, en l'absence de modèles de calcul adapté à ce type de feu, on retiendra la valeur majorante, de 29 720 W/m², fournie par **l'Instruction Technique de novembre 1989** (relative au calcul des distances d'isolement associées à un feu de cuvette, aux seuils de 3 et 5 kW/m²). Cette valeur correspond à la moyenne obtenue lors des essais de Prosperine sur un feu de 2 500 m² de pétrole brut réalisées en 1977 à Parentis.

Dans le cas des **feux liquides**, le pouvoir émissif de la flamme est déterminé à partir de la formule du **TNO/Yellow Book (1992)** dans le cas des feux de nappe °:

$$\emptyset_0 = \emptyset_{max} \times (1 - \zeta) + \emptyset_{soot} \times \zeta$$

Avec : $Ø_0$ = Pouvoir émissif de la flamme (kW/m²),
$Ø_{max}$ = Pouvoir émissif de la flamme sans fumées noires (calculé ci-après),
$Ø_{soot}$ = Pouvoir émissif des fumées (20 000 W/m² pour T= 800°K),
ζ = Pourcentage du flux absorbé par les fumées noires (0,80).

$$\phi_{\max} = m''.FR \times \frac{\Delta h_c}{1 + 4.\frac{L}{D_{eq}}}$$

Avec : FR = fraction radiative (0,35),
Δhc = Chaleur de combustion du produit (J/kg),
m'' = Vitesse de combustion (kg/m²/s).

La **fraction radiative** est un facteur dont on dispose de peu de données spécifiques en fonction des combustibles considérés. Des valeurs de fraction radiative ont été mesurées par Burgess et Hertzberg en 1974 à partir de feux impliquant différentes substances (Cf. tableau suivant).

Les valeurs obtenues varient entre 0,1 et 0,4. Pour la présente étude, on retiendra une valeur par défaut de **0,35**.

Il a été constaté par ailleurs que lors de ces essais, pour certaines substances (méthanol, méthane et benzène), la fraction radiative n'est pas dépendante du diamètre de l'incendie. Elle reste équivalente quel que soit le diamètre de celui-ci.

Substance	Diamètre du feu (m)	Fraction radiative FR (-)
Méthanol	0,076 0,152 1,22	0,162 0,165 0,177
Méthane	0,305 0,76 1,53 3,05 6,10	0,21 0,23 0,15-0,24 0,24-0,34 0,20-0,27
Butane	0,305 0,457 0,76	0,199 0,205 0,269
Essence	1,22 1,53 3,05	0,30-0,40 0,16-0,27 0,13-0,14
Benzène	0,076 0,457 0,76 1,22	0,350 0,345 0,350 0,360

Tableau 1 : Fraction radiative FR pour différents types de feux (Burgess et Hertzberg, 1977)

I.4. Facteur de vue max (F_{max})

Pour la réalisation des calculs, le facteur de vue plan vertical sera considéré (pas de prise en compte de l'effet du vent sur la flamme). Les formules utilisées sont celles proposées par Sparrow et Cess :

$$Fv = \frac{1}{2\Pi}\left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}}\,Arctg\left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}}\right)+\frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}}\,Arctg\left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}}\right)\right]$$

$$X=\frac{L}{r} \qquad Y=\frac{b}{r}$$

Avec : Fv = Facteur de forme pour une surface parallèle au plan émetteur,
L = Hauteur de flamme (m),
r = Distance de la cible à la source (m),
b = Longueur du front de flamme (m).

$$Fh = \frac{1}{2\Pi}\left(Arctg\,\frac{1}{Y} - A.Y.ArctgA\right)$$

$$X=\frac{L}{b} \qquad Y=\frac{r}{b} \qquad A=\frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}}$$

Avec : Fh = Facteur de forme pour une surface perpendiculaire au plan émetteur,
L = Hauteur de flamme (m),
r = Distance de la cible à la source (m),
b = Longueur du front de flamme (m).

$$F_{max} = \sqrt{Fh^2+Fv^2}$$

II. CALCUL DU FLUX THERMIQUE

Le modèle utilisé pour le calcul du flux thermique est le modèle de la flamme solide à une zone. La densité de flux thermique radiatif reçu par un élément extérieur à la flamme sera calculée par l'équation suivante :

$$\emptyset = \emptyset_0 \times F_{max} \times \tau$$

Avec : Ø : Densité de flux thermique radiatif reçue par un élément extérieur (kW/m²),
$Ø_0$ = Pouvoir émissif de la flamme (kW/m²),
F_{max} : Facteur de vue entre un élément extérieur et la flamme,
τ : Coefficient d'atténuation atmosphérique,