

Généralités sur la modélisation des flux thermiques liés à un incendie

Code MARTIN, développé par SAFEGE, pour les feux d'entrepôts

Code GTDLI, développé par l'INERIS, pour les feux d'hydrocarbures

SOMMAIRE

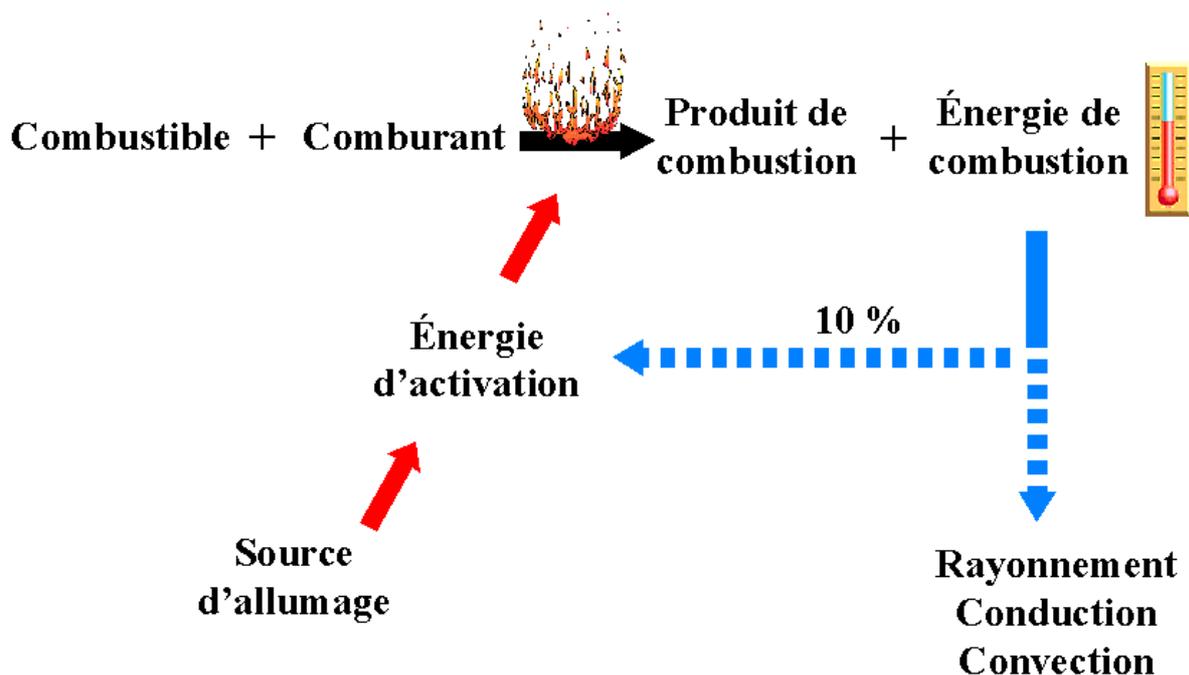
1	Qu'est-ce qu'un incendie ?	3
2	Modélisation du flux thermique rayonné.....	4
2.1	Principe de modélisation	4
2.2	Equation générale	5
3	Paramètres déterminants.....	6
3.1	Angle de vue.....	6
3.2	Hauteur de flamme d'incendie	8
3.3	Transmittance de l'air.....	9
3.4	Flux émis par la flamme	10
3.5	Cas particulier d'un feu d'hydrocarbures ou d'éthanol – méthode développée par le GTDLI	11
4	Influence des écrans	13
4.1	Flux thermique sans écran.....	13
4.2	Flux thermique avec un écran en façade	14
4.3	Flux thermique avec écran déporté	14
4.4	Comparaison.....	15
5	Effets du rayonnement thermique	16
5.1	Effets sur l'homme	17
5.2	Effets sur les structures.....	17

1

Qu'est-ce qu'un incendie ?

L'incendie est une combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace. La combustion est la réaction chimique que l'on obtient lorsqu'on met en présence sous certaines conditions, un comburant (en général l'air), une source de chaleur et un corps combustible.

La combustion est une réaction d'oxydation particulièrement exothermique. 10 % de l'énergie libérée par la combustion va permettre d'alimenter la réaction. Le reste est libéré sous forme de rayonnement (transfert électromagnétique dans l'infrarouge), de conduction (transport de chaleur dans la masse) et de convection (mouvement des gaz chauds).



La sensation de chaleur que perçoit un observateur lorsqu'il se place en face d'un feu est due au rayonnement émis par les flammes. Le phénomène de conduction ne pourra être ressenti qu'en touchant un matériau au contact direct des flammes. Le phénomène de convection ne pourra être ressenti qu'en se plaçant dans les fumées.

Ainsi dans le cas du dimensionnement des effets thermiques d'un incendie industriel sur l'environnement, c'est bien le rayonnement thermique émis par les flammes qui est intéressant.

Modélisation du flux thermique rayonné

2.1 Principe de modélisation

Le calcul du flux thermique émis lors d'un incendie se doit d'être majorant. Il est donc réalisé sur la base de l'étude du « scénario maximal physiquement possible ».

Par exemple :

- **dans le cas des entrepôts**, ce scénario correspond à un incendie maximaliste entraînant la destruction quasi totale de la toiture et de la structure du bâtiment si cette dernière n'a pas une tenue au feu suffisante. Lorsque l'entrepôt est compartimenté, l'incendie d'une seule cellule est généralement pris en compte. On considère que les murs coupe-feu qui séparent les cellules de stockage assurent une protection passive suffisante pour limiter l'incendie à la condition de garantir que les éventuelles portes coupe-feu entre les cellules se fermeront correctement.

- **dans le cas d'un feu de nappe d'hydrocarbure**, ce scénario correspond à un incendie maximaliste d'une nappe recouvrant la totalité de la rétention.

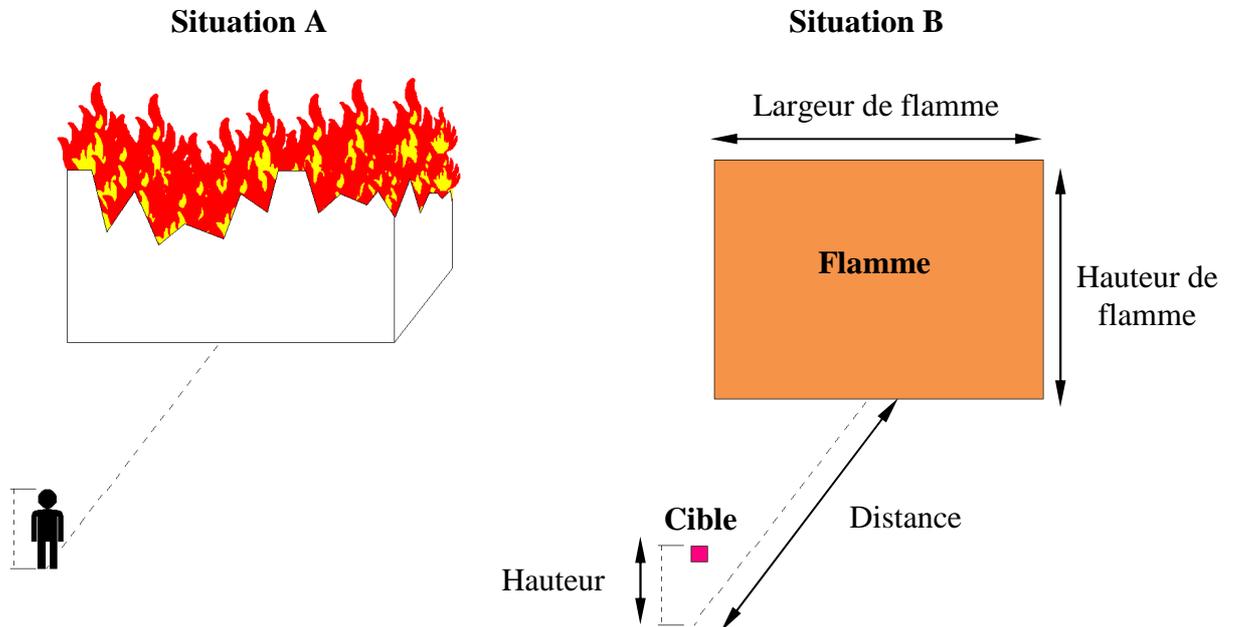
Dans le cadre d'une étude majorante, il est pris comme hypothèse que les protections actives sont considérées comme inopérantes (exemple : le système d'extinction automatique des fumées, les moyens d'arrosage).

Les flammes qui s'élèvent du bâtiment, du stockage, de la cellule ou de la rétention en feu, émettent alors un rayonnement thermique vers l'environnement extérieur. On les modélise par une surface qui a la largeur du bâtiment, du stockage, de la cellule ou de la rétention en feu et une hauteur moyenne calculée.

Le flux thermique est ensuite calculé pour une cible placée dans l'axe de cette surface rayonnante en fonction de sa distance et de sa hauteur.

La situation réelle est la situation **A**.

Afin de pouvoir la modéliser, nous sommes contraints de la simplifier et de se ramener à la situation **B**.



2.2 Equation générale

Le flux reçu par la cible est calculé de la façon suivante :

$$\Phi_{reçu} = F_{cible - flamme} \times \tau \times \Phi_{émis}$$

$F_{cible - flamme}$: angle de vue entre la cible et la flamme (sans unité)

τ : transmittance de l'air (sans unité)

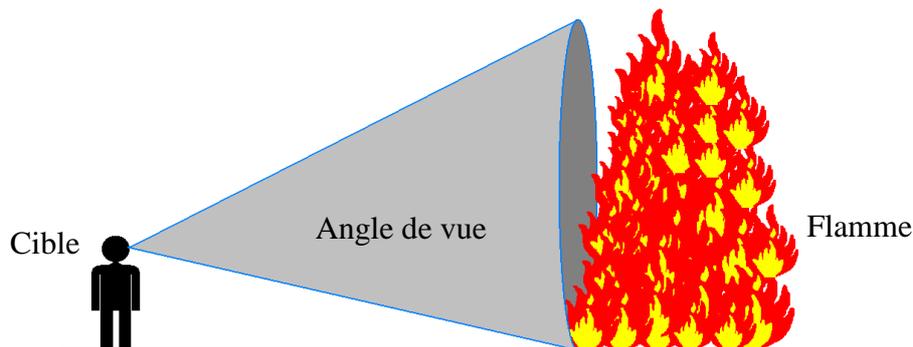
$\Phi_{émis}$: pouvoir émissif de la flamme par unité de surface de la flamme (kW/m²)

Paramètres déterminants

L'équation générale permettant de calculer le flux reçu par une cible est exprimée en fonction de l'angle de vue (lui-même fonction de la hauteur de flamme), de la transmittance de l'air et du flux émis par la flamme.

3.1 Angle de vue

L'angle de vue, appelé également facteur de forme, est l'angle solide sous lequel une cible voit une source rayonnante.

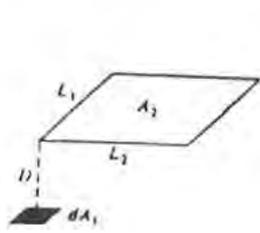


L'angle de vue sous lequel la cible voit la flamme est dépendant de :

- la hauteur de la flamme,
- la hauteur de la cible,
- l'angle entre la cible et la flamme,
- la distance entre la cible et la flamme.

La littérature nous fournit la formule analytique permettant de calculer l'angle de vue sous lequel une cible élémentaire voit un élément rectangulaire de surface finie lorsque les deux surfaces sont parallèles et que la cible est située en face du coin de l'élément rectangulaire.

Surface élémentaire parallèle à un élément rectangulaire de surface finie.



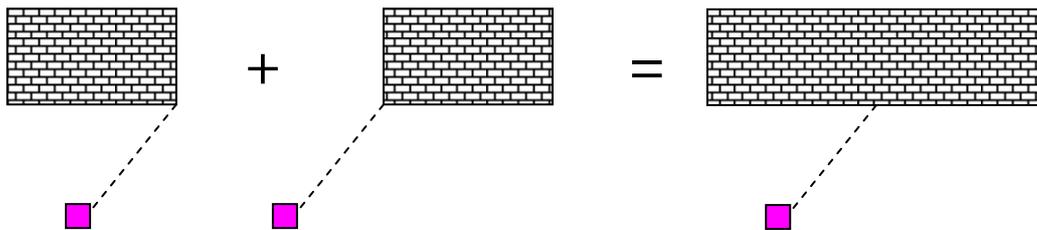
$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right)$$

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

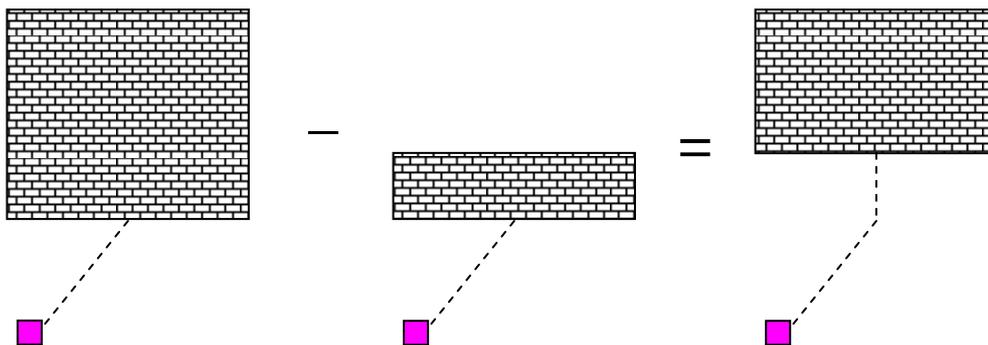
Il est donc possible de calculer l'angle de vue sous lequel une cible «■» voit un élément rectangulaire de surface finie lorsqu'elle se trouve en face du milieu de l'élément rectangulaire.

Les angles de vue étant des valeurs algébriques, il est possible de les sommer et les soustraire.

Ainsi :



De plus :



Les paramètres d'entrée sont les dimensions de la surface émissive (hauteur et largeur de flamme), la hauteur de la cible et sa distance par rapport à la flamme.

3.2 Hauteur de flamme d'incendie

La hauteur des flammes est calculée en règle générale par la corrélation de THOMAS.

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

H :	hauteur de la flamme	(m)
D :	diamètre hydraulique de la surface en feu	(m)
m'' :	taux de pyrolyse	(kg/m ² /s)
ρ _a :	masse volumique de l'air	(kg/m ³)
g :	accélération de la pesanteur	(9,81 m/s ²)

Ainsi la hauteur de flamme est dépendante :

- du diamètre hydraulique de la surface en feu et donc de ces dimensions,
- du taux de pyrolyse du combustible en feu lui même dépendant de la nature du combustible, de son état de division, de son mode de stockage et de son conditionnement.

La corrélation de Thomas est valable pour les feux à **moyenne échelle dont le rapport H/D est compris entre 3 et 10 et pour un diamètre équivalent Deq de la surface en flamme inférieur à 20 m**. Cette corrélation est souvent extrapolée faute de mieux mais n'est pas directement applicable pour les incendies industriels. Il a en effet été constaté que la hauteur des flammes d'un incendie industriel ne dépend pas uniquement du produit en feu et de la surface du foyer, mais aussi directement de la ventilation du foyer : alimentation en air frais et évacuation des fumées.

C'est la raison pour laquelle dans un souci de réalisme et pour que les calculs soient conformes aux constatations des pompiers lors des interventions sur des sinistres industriels, **la hauteur de flamme est très souvent limitée à trois fois la hauteur de stockage ou la hauteur libre sous poutre (dans les cas des entrepôts)¹**.

Dans le cas des grands feux d'hydrocarbure, la corrélation d'HESKESTAD peut être utilisée :

$$H = \left(-1,02 + 15,6 N^{\frac{1}{5}} \right) \times D$$

H :	hauteur de la flamme	(m)
-----	----------------------	-----

¹ Cf. article du CNPP - Flux rayonnés, la difficulté de l'expertise - Face aux Risques n°394, 11-12 - Juin - Juillet. Cette valeur est cohérente avec les prescriptions du guide d'application de l'arrêté du 5 août 2002 qui préconise « une hauteur plafonnée à 3 fois la hauteur utile ».

- D : diamètre hydraulique de la surface en feu (m)
 N : défini selon la relation suivante

$$N = \frac{C_{p0} T_0}{g \Delta H_c} \left(\frac{\eta_{comb} \dot{m}'}{\rho_a} \right)^2 \frac{r_s^3}{D^5}$$

- g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)
 C_{p0} : capacité calorifique de l'air (J/kg.K)
 T₀ : température de l'air (K)
 m' : débit de combustible (kg/m²)
 η_{comb} : rendement de la combustion (sans unité)
 ΔH_c : enthalpie de la réaction (PCI) (MJ/kg)
 r_s : rapport stœchiométrique air/combustible défini selon la réaction suivante

$$r_s = 137,87 \frac{x + y/4 + z/2}{12x + y + 16z}$$

x, y, z : nombre de carbone, d'hydrogène et d'oxygène dans la formule brut du combustible (C_xH_yO_z)

3.3 Transmittance de l'air

L'air absorbe une partie du flux émis par la flamme notamment à cause des particules d'eau qu'il contient. La corrélation de Brzustowski et Sommer permet de calculer la transmittance de l'air, c'est à dire la fraction de flux que l'air laisse passer.

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

- x : épaisseur de la couche d'air soit la distance cible-flamme (m)
 r : humidité relative de l'air (%)

3.4 Flux émis par la flamme

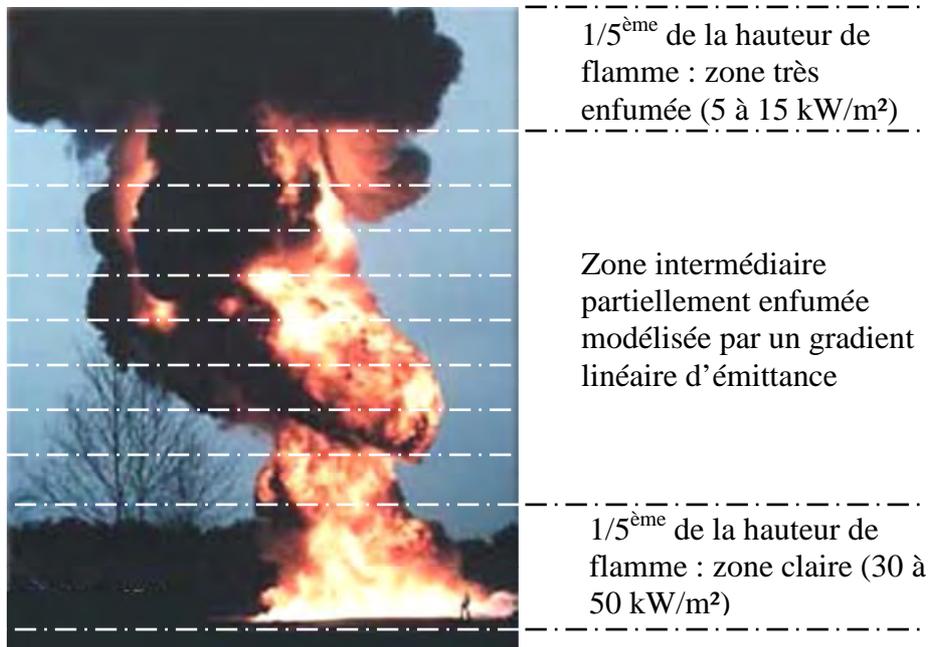
Le flux émis par une source rayonnante est appelé émittance. Les émittances sont issues de la littérature disponible et des différentes tierces expertises effectuées par l'INERIS ou le CNPP pour des installations similaires.

Il est généralement considéré que la flamme est homogène (modèle classique de la flamme solide). Or cette simplification est très clairement majorante.



En effet, lors des sinistres industriels, quel que soit le combustible, la flamme n'émet pas le même flux sur toute sa hauteur. En partie basse, la chaleur extrêmement intense est synonyme d'un rayonnement important. En partie haute, les fumées masquent les flammes et absorbent ainsi une grande partie du rayonnement.

La modélisation réalisée par SAFEGE est proche de la réalité. Elle permet de découper la flamme en tranche et d'affecter à chaque tranche sa propre émittance. La flamme est donc découpée selon le schéma suivant.



Cette modèle de calcul validé par les experts de SAFEGE permet d'effectuer des calculs extrêmement réalistes tout en conservant une approche majorante des phénomènes.

Pour des incendies d'entrepôts de matières combustibles, le guide d'application de l'arrêté du 5 août 2002 indique qu'un ordre de grandeur usuel pour les flux surfaciques des flammes est de 25 kW/m² à 40 kW/m².²

3.5 Cas particulier d'un feu d'hydrocarbures ou d'éthanol – méthode développée par le GTDLI

Conformément aux recommandations du Guide de maîtrise des risques technologiques dans les dépôts de liquides inflammables du GTDLI³, celui-ci préconise, pour la modélisation des feux de nappe d'hydrocarbures, l'utilisation d'un modèle qu'il a élaboré et figurant dans la circulaire du 10 mai 2010. Ce modèle est applicable aux hydrocarbures liquides de catégories B et C, ainsi qu'aux feux d'éthanol.

Le modèle a donné lieu à une feuille de calcul développée par l'INERIS, basée sur les propositions de la note « Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbures liquides, GTDLI, Septembre 2006 »⁴. Pour évaluer les distances d'effets associées à un flux thermique les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Données météo :
 - ✓ Humidité relative de l'air : 70 %
 - ✓ Température : 15° C
 - ✓ Vitesse de vent : 5 m/s
 - ✓ Masse volumique de l'air : 1,161 kg/m³

- Données Produits :
 - ✓ De manière conservative, les distances d'effets pour **tous les hydrocarbures liquides** (gazole, FOD,...) sont calculées en considérant la combustion d'essence dont le débit de combustion est pris égal à **0,055 kg/m².s**.
 - ✓ Pour les **feux d'éthanol**, la vitesse de combustion est prise égale à **0,025 kg/m².s**

- Diamètre équivalent :
 - ✓ Pour un feu de nappe circulaire :
Deq = Diamètre de la nappe en feu
 - ✓ Pour un feu de forme rectangulaire :
Deq = 4 S / P si la Longueur < 2,5 x largeur
Deq = largeur si la Longueur > 2,5 x largeur
 - ✓ Pour un feu de nappe de forme quelconque :
Deq = 4 S / P

²Entrepôts de matières combustibles – Guide d'application de l'Arrêté du 5 août 2002 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts soumis à autorisation sous la rubrique 1510
MEDD – Août 2006

³Groupe de Travail Dépôts Liquide Inflammables – Guide de maîtrise des risques technologiques dans les dépôts de liquides inflammables – Septembre 2008

⁴Mémo technique du Groupe de Travail Dépôts Liquides Inflammables – Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbures liquides – Septembre 2006

avec :

S et P correspondant respectivement à la surface brute (surface avec bacs) et au périmètre de la cuvette en feu,
Longueur et largeur correspondant respectivement à la longueur et largeur de la surface en feu

- Hauteur de flamme :

- ✓ **Formule de Thomas avec un vent de 5 m/s :**

$$L = 19,18 \times m^{0,74} Deq^{0,735}$$

- Angle d'inclinaison de la flamme

- ✓ **Corrélation de Welker and Sliepceвич :**

$$\frac{\tan \xi}{\cos \xi} = 3,3 \times (Fr)^{0,8} \times (Re)^{0,07} \times \left(\frac{\rho_v}{\rho_{air}} \right)^{-0,6}$$

avec :

Fr: Nombre de Froude

$$Fr = \frac{u_w^2}{Deq \times g}$$

Re: Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{Deq \times u_w \times \rho_{air}}{\mu_{air}}$$

ρ_v : : Masse spécifique du produit en phase vapeur, à sa température d'ébullition (2,56 kg/m³ pour essence)

ρ_{air} : Masse volumique de l'air : 1,161 kg/m³

μ_{air} : viscosité dynamique de l'air ambiant (1,9 x 10⁻⁵ (kg.m⁻¹.s⁻¹))

- Pouvoir émissif :

- ✓ **Corrélation de Mudan and Croce :**

$$\Phi_o = 20000 + 120000 e^{-0,12 Deq}$$

- Facteur de vue :

- ✓ Facteur de vue cylindrique avec vent pour les feux de nappe circulaire ou ayant une forme s'inscrivant dans un cercle : corrélation de Mudan
- ✓ Facteur de vue plan avec vent pour les autres feux de nappe : Outil développé par l'INERIS

- Coefficient d'atténuation atmosphérique :

- ✓ **Corrélation de Bagster :**

$$\Gamma(r) = 2,02 \times (HR \times TVAP(H_2O) \times r)^{-0,09}$$

Avec :

TVAP(H₂O)=1665 Pa à 15°C

HR= 70 %

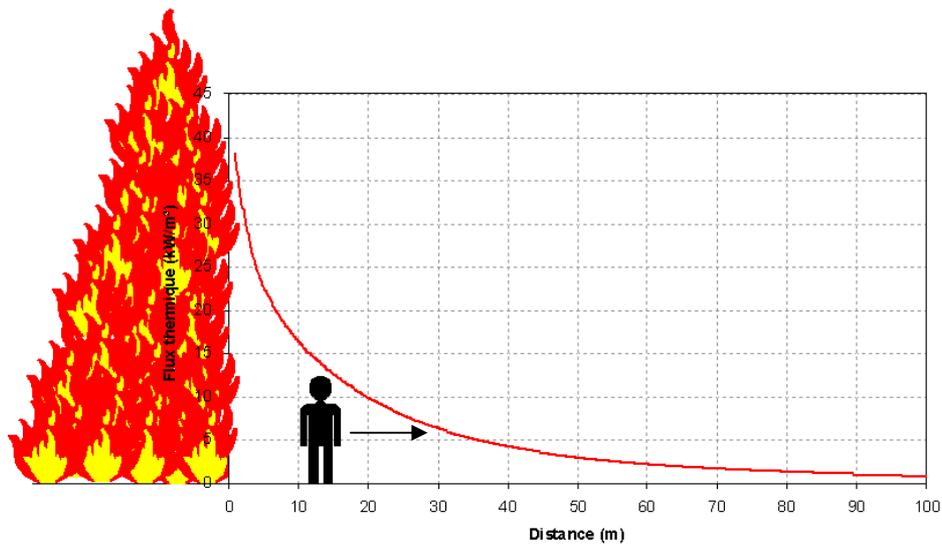
4

Influence des écrans

Les écrans thermiques sont tous les obstacles physiques susceptibles de réduire le flux reçu par une cible en effectuant un rempart entre la cible et la source. Ces écrans peuvent être des murs coupe-feu, mais également des écrans thermiques de façade, des merlons ou bien des murs périphériques en limite de propriété.

4.1 Flux thermique sans écran

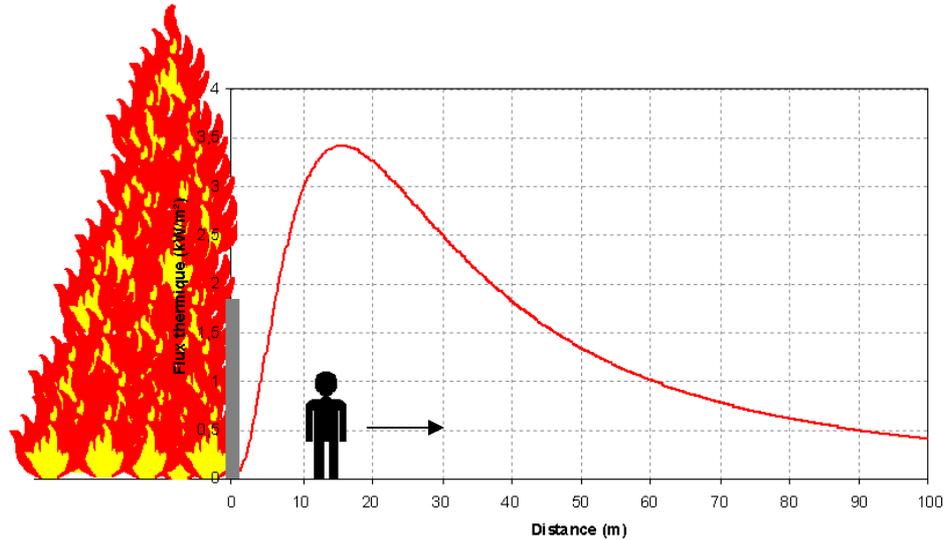
Le flux thermique reçu par une cible en fonction de sa distance par rapport au foyer à l'allure suivante.



Plus la cible s'éloigne du foyer, plus la transmittance de l'air diminue et plus le facteur de forme diminue. Ainsi plus la cible s'éloigne, plus le flux qu'elle reçoit diminue.

4.2 Flux thermique avec un écran en façade

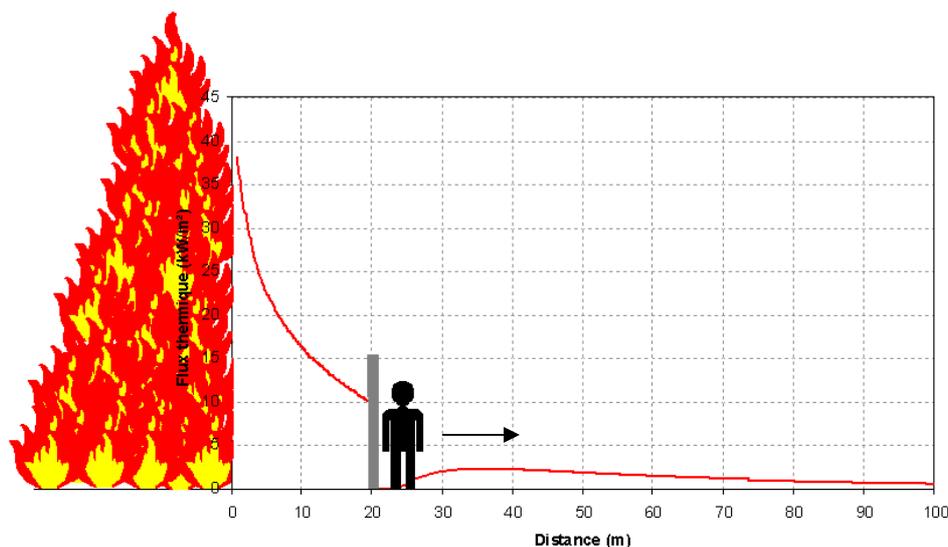
Le flux thermique reçu par une cible située derrière un écran en façade en fonction de sa distance par rapport au foyer à l'allure suivante.



Lorsque la cible est derrière l'écran, elle ne voit pas ou peu les flammes. L'angle de vue sous lequel elle voit le foyer est donc faible. En revanche il augmente sensiblement lorsque la cible s'éloigne du mur. Ainsi la cible reçoit un flux thermique de plus en plus intense. Si la cible continue de s'éloigner, l'influence de la distance devient prépondérante et le facteur de forme diminue à son tour. Le flux reçu diminue également.

4.3 Flux thermique avec écran déporté

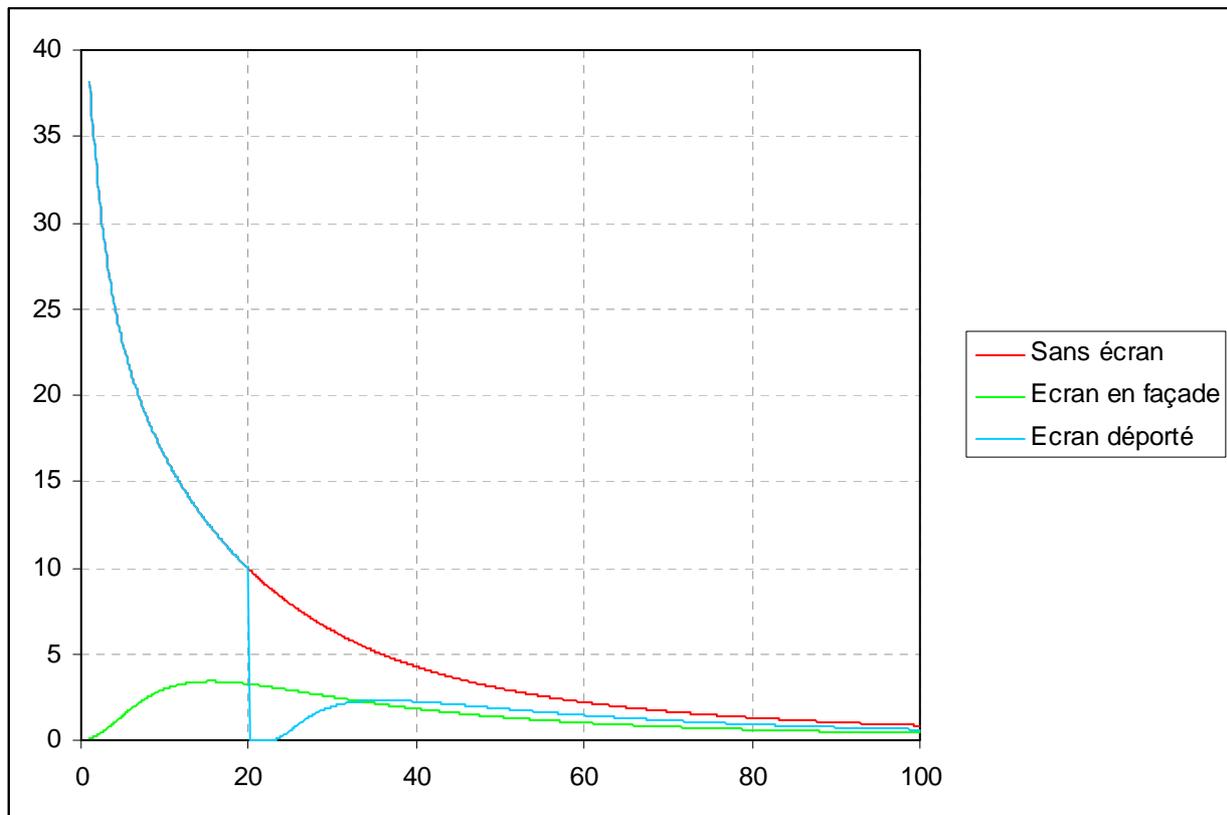
Le flux thermique reçu par une cible en fonction de sa distance par rapport au foyer à l'allure suivante lorsqu'un écran se trouve à 20 m du foyer.



Jusqu'à l'écran déporté le flux reçu est le même que lorsqu'il n'y a pas d'écran. Lorsque la cible passe derrière l'écran, elle ne voit plus ou peu le foyer. Le flux reçu devient donc très faible. Lorsque la cible s'écarte de l'écran, l'angle de vue sous lequel elle voit le foyer augmente à nouveau puis la distance devient prépondérante. Il se produit alors le même phénomène qu'avec l'écran en façade. Le flux thermique augmente puis diminue.

4.4 Comparaison

Si les trois situations sont placées sur un même graphe, l'influence de chaque solution est nette.



Ainsi, alors que l'écran en façade diminue le flux reçu en champ proche et en champ lointain, l'écran déporté n'agit qu'en champ lointain.

5 Effets du rayonnement thermique

Les effets du rayonnement dépendent de la valeur du flux reçu comme le montre le tableau suivant :

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	Conditions 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.

Source : CNPP

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

5.1 Effets sur l'homme

	Seuils des effets thermiques <i>(pour une exposition de plus d'1 à 2 minutes pour un terme source constant)</i>	Seuil des doses thermiques <i>(pour une exposition courte avec un terme source non constant)</i>
Seuil des effets par effets indirects	--	--
SEI <i>ou dangers significatifs</i>	3 kW/m ²	600 (kW/m ²) ^(4/3) .s
SEL <i>Ou dangers graves, premiers effets létaux</i>	5 kW/m ²	1000 (kW/m ²) ^(4/3) .s
SELS <i>Ou dangers très graves, effets létaux significatifs</i>	8 kW/m ²	1800 (kW/m ²) ^(4/3) .s

5.2 Effets sur les structures

	Seuils des effets thermiques
Seuil des destructions de vitres significatives	5 kW/m ²
Seuil des dégâts légers	--
Seuil des dégâts graves	8 kW/m ²
Seuil des effets dominos et correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures.	8 kW/m ²
Seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton.	16 kW/m ²
seuil de tenue du béton plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton.	20 kW/m ²
seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.	200 kW/m ²

