



(ID Modèle = 454988)

Ineris - 204476 - 2728180 - v0.3

13/01/2023

FLUMilog

**Description de la méthode de calcul des effets
thermiques produits par un feu d'entrepôt**

Module 6 :

Calcul des effets sur l'environnement

FLUMilog

Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt

Module 6 :

Calcul des effets sur l'environnement



PRÉAMBULE

Le présent document a été établi sur la base des informations transmises à l'Ineris. La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations fournies.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du présent document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La prestation ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser le document après cette date.

L'établissement du présent document et la prestation associée sont réalisés dans le cadre d'une obligation de moyens.

Au vu de la mission qui incombe à l'Ineris au titre de l'article R131-36 du Code de l'environnement, celui-ci n'est pas décideur. Ainsi, les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre de cette prestation ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur. Par conséquent la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du présent document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour toute utilisation du document en dehors de son objet.

En cas de contradiction entre les conditions générales de vente et les stipulations du présent préambule, les stipulations du présent préambule prévalent sur les stipulations des conditions générales de vente.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Incendie, Dispersion, Explosion

Rédaction : MURILLO-RUEDA Carlos - GEORGES-PICOT ALEXANDRE

Vérification : TRUCHOT BENJAMIN; GENTILHOMME OLIVIER; HEUDIER LAURE

Approbation : Document non approuvé

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

INERIS : Benjamin TRUCHOT, Alexandre GEORGES-PICOT, Carlos MURILLO RUEDA

Liste de sociétés externes ayant participé à l'étude :

Centre National de Prévention et de Protection (CNPP)

Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM)

EFFECTIS FRANCE

Table des matières

Glossaire.....	7
1 Introduction	8
2 La transmittivité de l'air	9
3 Le facteur de vue.....	11
3.1 Facteur de vue analytique	13
3.2 Facteur de vue par calcul intégral	14
3.3 Calcul du flux reçu par une cible	14
4 La prise en compte d'un écran thermique	16
4.1 Rappel sur le rôle des écrans thermiques.....	16
4.2 Evolution des parois	16
4.2.1 Caractéristiques d'une paroi.....	16
4.2.2 Echauffement de la façade et flux thermique induit	17
4.2.3 Hauteur de la façade	18
4.2.4 Cas des zones de préparation et déports importants.....	19
4.3 Cas des écrans thermiques déportés : merlons et zone de préparation dont la largeur est supérieure à la hauteur de la paroi.....	23
5 Propagation à 3 cellules	24
5.1 Scénarios de propagation.....	24
5.1.1 Types de scénarios	24
5.1.2 Définition de scénarios par typologie de combustible	26
5.2 Détermination des flux maximums	27
6 Références	29

Liste des illustrations

Figure 1. Variation de la transmissivité atmosphérique	10
Figure 2. Schéma d'une surface émettrice verticale et d'une cible.....	11
Figure 3. Facteur de forme en fonction de l'angle d'inclinaison	12
Figure 4. Exemples de configuration	12
Figure 5. Schéma pour le calcul analytique du facteur de vue.....	13
Figure 6. Schéma pour le calcul intégral du facteur de vue avec la cible verticale.....	14
Figure 7. Schéma de la cible élémentaire.....	15
Figure 8. Déplacement de la cible autour des cellules pour calculer le flux reçu en chaque point.....	15
Figure 9. Rôle protecteur des écrans thermiques.....	16
Figure 10. Position de la cible pour un rôle optimal de l'écran thermique	16
Figure 11. Schéma descriptif de l'échauffement d'une façade.....	18
Figure 12. Hauteur de la paroi au cours du temps.....	19
Figure 13. Flux thermique reçu par la paroi à l'opposé de la zone de départ.....	20
Figure 14. Schéma descriptif de l'influence d'un écran thermique.....	23
Figure 15. Schéma de propagation du feu dans le cas où l'incendie est plus court que la durée de résistance des parois – pas de propagation.....	24
Figure 16. Le feu se propage aux deux cellules voisines dès lors que les murs séparatifs ne sont plus en mesure de jouer leur rôle (temps au-delà de leur degré REI).....	24
Figure 17. Schéma de propagation d'un incendie d'une cellule à ses voisines	25
Figure 18. Calcul pratique des conséquences d'une propagation d'un incendie – étape 1	26
Figure 19. Exemple de cartographie de flux obtenue avec l'outil FLUMilog.....	28

Liste des tableaux

Tableau 1. Corrélations pour la détermination de la transmittivité de l'air	9
Tableau 2. Tableau de synthèse des parois	21
Tableau 3. Tableau descriptif du comportement des parois	22
Tableau 4. Evaluation de la pertinence de la modélisation de scénarios de propagation selon le type de combustible (FLUMilog, 2020).....	27

Pour citer ce document :

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 204476 - 2728180 - v0.3, 13/01/2023.

Mots-clés :

FLUMilog

Glossaire

HR : Taux d'humidité relative de l'air (%),

$P_{VAP(H_2O)}$: Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (Pa ou mmHg),

r : Distance entre le front de flamme et la cible,

T : Température atmosphérique (K),

$\Gamma(r)$: facteur de transmittivité (-),

ω : humidité absolue de l'air ambiant (g/ kg d'air sec).

1 Introduction

Pour mémoire, le calcul du flux reçu en un point donné peut être calculé de plusieurs façons (modèle de source ponctuelle, de flamme solide...). Le modèle de flamme solide, classiquement utilisé jusqu'à présent, n'a pas été remis en cause et il est utilisé dans la méthode FLUMilog. La relation qui permet de calculer le flux radiatif reçu par une cible, φ , s'écrit :

$$\varphi = \varphi_0 \tau F$$

Où τ est le facteur d'atténuation atmosphérique (ou transmittivité),

F le facteur de forme,

φ_0 l'émittance (puissance dégagée).

Les grandeurs qui n'ont pas été calculées jusqu'à présent sont le facteur de forme et la transmittivité. Les paragraphes suivants détaillent le mode de calcul de ces paramètres.

2 La transmissivité de l'air

Au cours du GT-DLi, une étude comparative des différentes corrélations de transmissivité avait été réalisée. Le lecteur pourra idéalement se reporter à la note technique annexée à la Circulaire du 31/01/2007 dont les conclusions sont brièvement reprises ici.

Dans la littérature, différentes corrélations existent pour déterminer ce facteur de transmissivité, qui tiennent compte de la distance et de l'humidité (relative ou absolue) :

Brzustowski & Sommer, Jr. (1973)	$\Gamma(r) = 0,79 \times \left(\frac{100}{r}\right)^{1/16} \times \left(\frac{30,5}{HR}\right)^{1/16}$
Bagster (1989)	$\Gamma(r) = 2,02(P_{vap\ H_2O})^{-0,09}$
Lannoy (1984)	$\Gamma(r) = 0,33 + 0,67 \exp(-0,0002\omega r)$
Wayne (1991)	$\Gamma(r) = 1,006 - 0,01171 \log X_{H_2O} - 0,02368 (\log X_{H_2O})^2 - 0,03188 \log X_{CO_2} + 0,001164 (\log X_{CO_2})^2$ $X_{CO_2} = r \times \frac{273}{T}$ $X_{H_2O} = r \times HR \times P_{vap\ H_2O} \times \frac{288,65}{T}$

Tableau 1. Corrélations pour la détermination de la transmissivité de l'air

Où :

r : Distance entre le front de flamme et la cible,

$P_{vap\ H_2O}$: Pression de saturation de la vapeur d'eau à température ambiante (mmHg pour la corrélation de Wayne et Pa pour la corrélation de Bagster),

HR : Taux d'humidité relative de l'air (%),

ω : Humidité absolue de l'air ambiant (g/ kg d'air sec),

Les paramètres, température et humidité de l'air, ont été testés et il en ressort les conclusions suivantes.

- Pour les modèles de Bagster (1989), de Wayne (1991) et de Brzustowski & Sommer, Jr. (1973), la valeur de l'humidité n'a que peu d'influence sur le facteur de transmissivité atmosphérique. En revanche, pour le modèle de Lannoy (1984), il convient de spécifier l'humidité absolue du site.
- Pour l'ensemble des modèles exceptés Brzustowski et Sommer, qui est indépendant de la température, une variation de 20° C à un impact de l'ordre de 10% sur la valeur de la transmissivité atmosphérique.

La Figure 1 présente les écarts existants entre les différentes corrélations. Rappelons qu'en champ proche (pour des distances inférieures à 10 m), ces modèles ne sont pas valides. Comme le montre la Figure 1, les écarts entre les corrélations à humidité et température données sont peu significatifs hormis pour la corrélation de Lannoy, utilisée dans les formules réglementaires de l'IT 89, qui donne les valeurs de transmissivité les plus importantes.

Finalement, le choix s'est porté sur la corrélation de Bagster qui est intégrée dans la feuille de calcul « effets thermiques » annexée à la Circulaire du 31/01/2007 et, utilisée, entre autres, par le TNO, DNV (Phast) et l'UFIP. C'est formule a donc été retenue pour l'approche FLUMi/log. La valeur calculée dans l'outil est bornée à 1, la transmissivité ne pouvant pas, physiquement, dépasser une valeur unitaire.

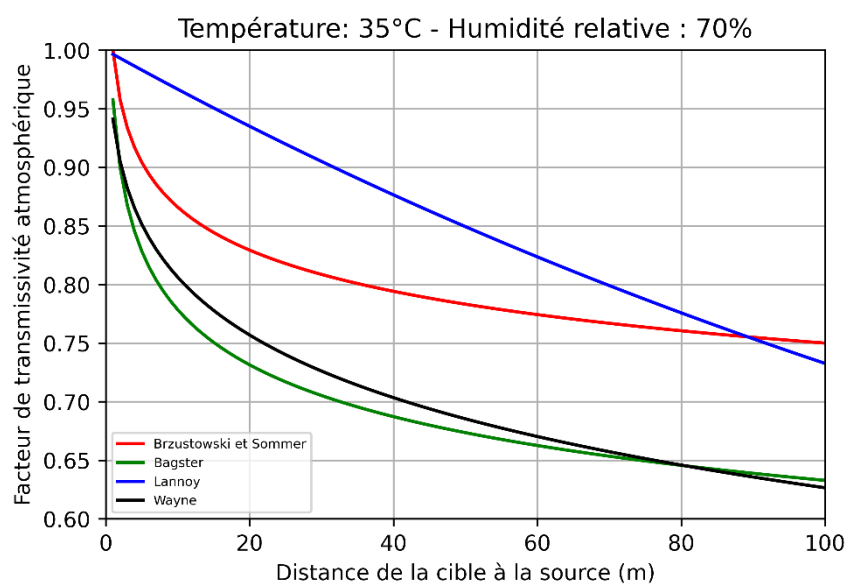
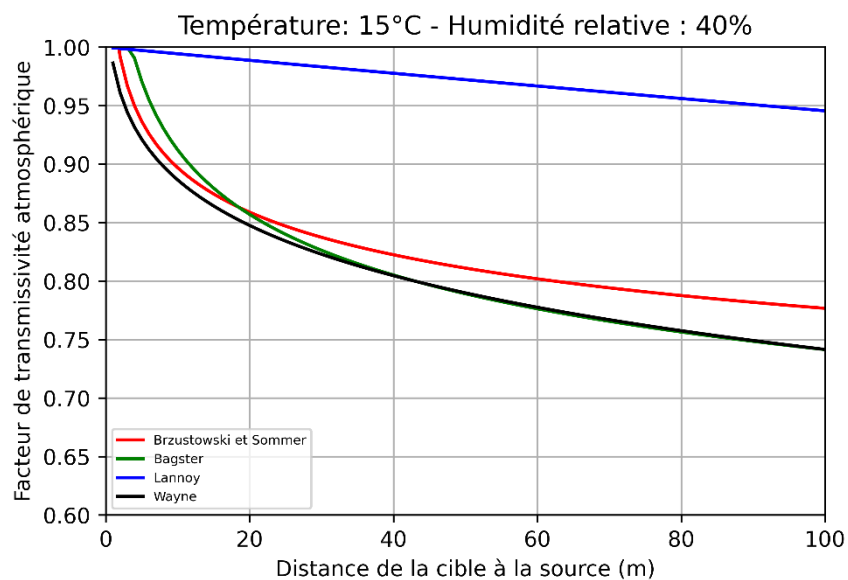
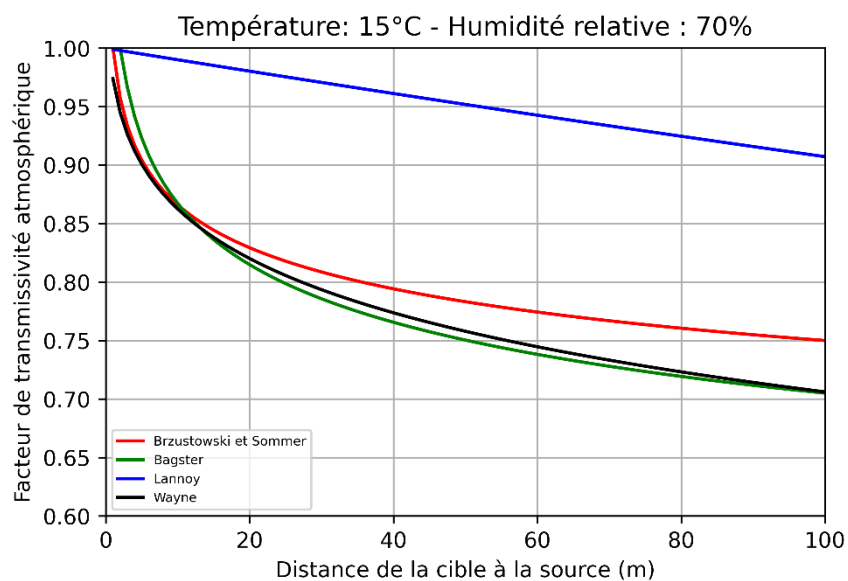


Figure 1. Variation de la transmissivité atmosphérique

3 Le facteur de vue

Le facteur de vue est l'angle solide sous lequel la cible perçoit la flamme, il représente le ratio entre l'énergie émise par une surface émettrice et celle interceptée par la cible. L'approche communément retenue avant FLUMillog consistait à considérer deux cibles élémentaires : l'une horizontale et l'autre verticale. Ce choix découle du fait qu'une cible humaine (sa tête) se compose de surfaces approximativement horizontales et verticales. Deux flux sont donc calculés et une norme est ensuite appliquée pour obtenir une valeur unique. Cette valeur correspond dimensionnellement à un flux mais n'en est pas un physiquement.

A titre d'exemple, soit la configuration ci-dessous :

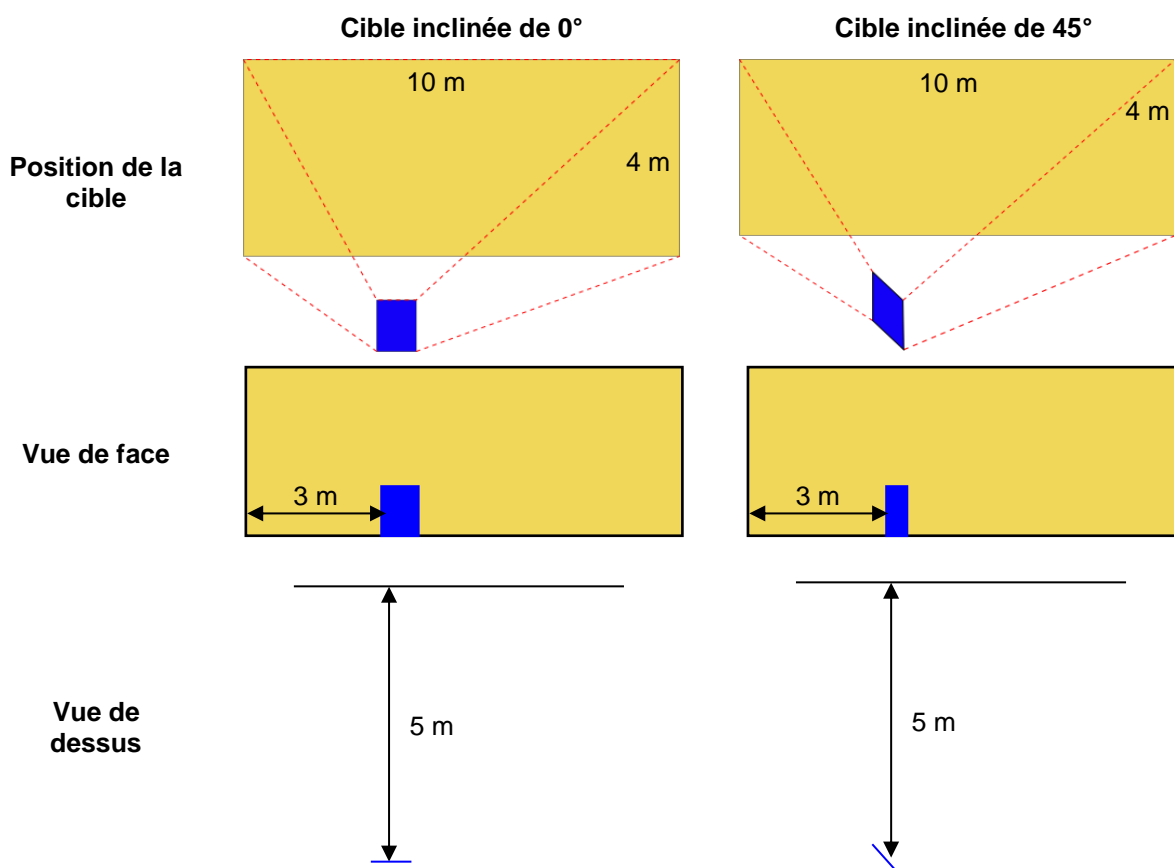


Figure 2. Schéma d'une surface émettrice verticale et d'une cible.

Le carré bleu représente la cible élémentaire. Le facteur de forme varie en fonction de l'angle entre la cible et la surface émettrice, Figure 3. Le maximum est obtenu pour un angle de 11° et vaut 0,235. Cette valeur est différente de celle obtenue en prenant la norme des cas à 0° et à 90° soit $\sqrt{0,231^2 + 0,068^2} = 0,241$

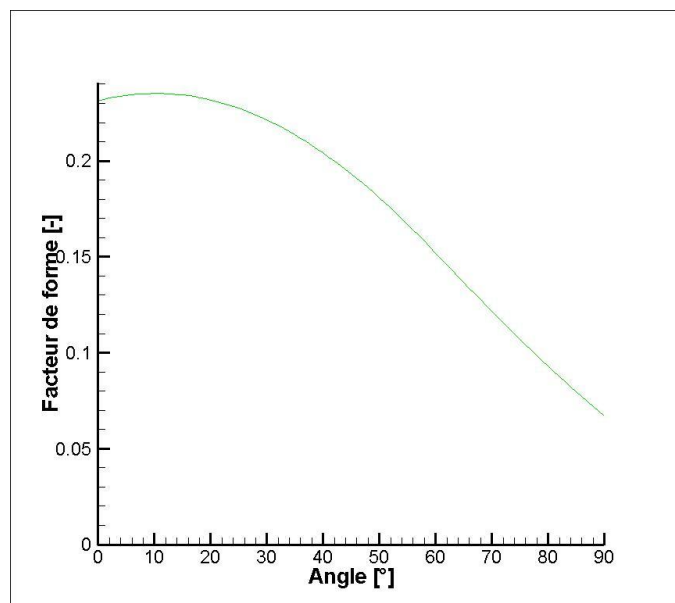


Figure 3. Facteur de forme en fonction de l'angle d'inclinaison

Dans ce cas la valeur obtenue est majorante mais cette approche n'est pas adaptée aux cas où :

- la flamme est inclinée par rapport à la verticale,
- l'entrepôt comporte des parois obliques (entrepôt avec parois coupé en diagonale par exemple),
- l'ensemble cible verticale – cible horizontale voit plusieurs surfaces émettrices, Figure 4.

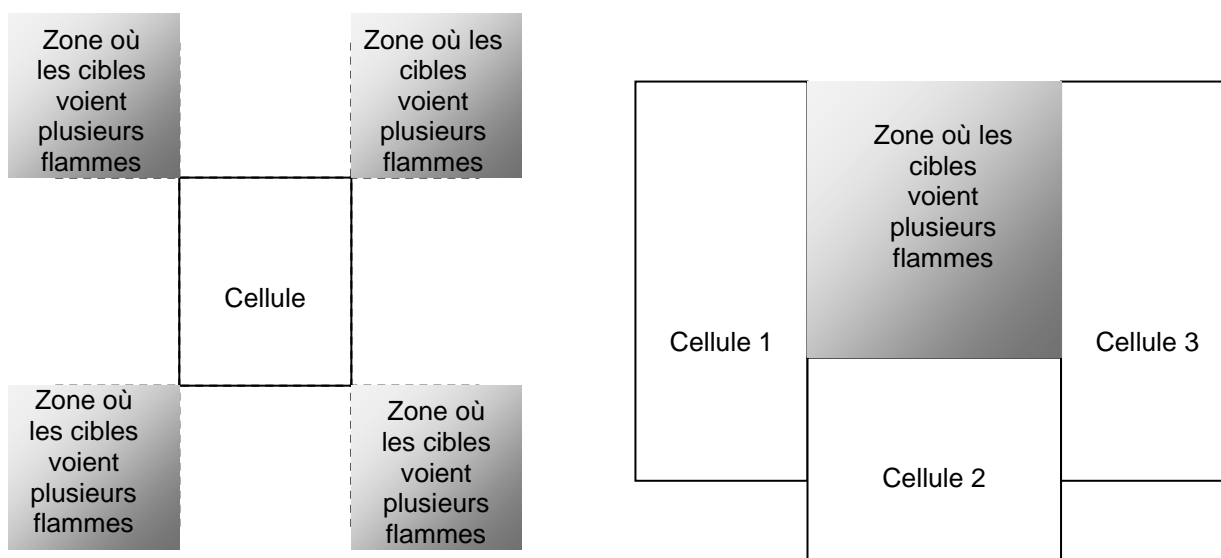


Figure 4. Exemples de configuration

La multitude des configurations envisageables a donc amené à étendre, dans le cadre de la méthode FLUMillog, l'approche précédente et à considérer une cible élémentaire cubique, soit 6 faces. Ainsi, quelle que soit la position de la cible et des cellules, elle est toujours capable de voir les surfaces émettrices. Le calcul du flux reçu est réalisé de la manière suivante :

- le flux reçu par chaque face du cube élémentaire est calculé en considérant toutes les surfaces émettrices visibles ;
- les flux reçus sont comparés sur 2 faces opposées et le plus grand des 2 est retenu ;
- une norme 2 est appliquée sur les 3 valeurs obtenues pour en déduire une unique valeur.

De plus, le facteur de vue est calculé soit par une formule analytique, soit à partir d'une intégrale double réalisée sur tout le domaine de la flamme. Le mode de calcul par intégrale double est choisi notamment dans le cas d'écrans thermiques déportés tels que les merlons ou encore les déports dus à la zone de préparation.

3.1 Facteur de vue analytique

Cette formule de facteur de vue est générique et permet de traiter les cas avec et sans vent ainsi que toutes les positions de cibles possibles, notamment, verticale, horizontale et latérale.

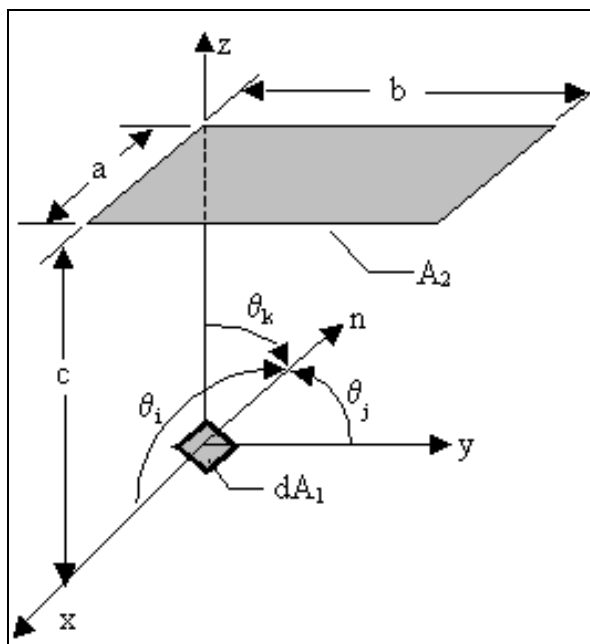


Figure 5. Schéma pour le calcul analytique du facteur de vue.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} B \times \cos \theta_i + \tan^{-1} A \times \cos \theta_j + \frac{A \cos \theta_k - \cos \theta_i}{(1 + A^2)^{1/2}} \tan^{-1} \frac{B}{(1 + A^2)^{1/2}} \right. \\ \left. + \frac{B \cos \theta_k - \cos \theta_j}{(1 + B^2)^{1/2}} \tan^{-1} \frac{A}{(1 + B^2)^{1/2}} \right]$$

Où $A = a/c$; $B = b/c$

Cette formule ne peut pas être utilisée lorsque le plan formé par la cible coupe la flamme. Si tel est le cas, le facteur de vue est déterminé par la méthode intégrale.

3.2 Facteur de vue par calcul intégral

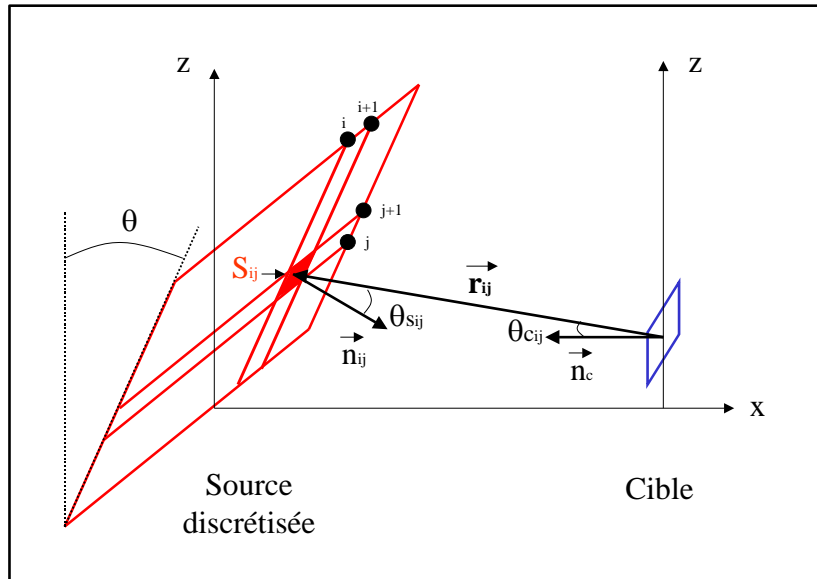


Figure 6. Schéma pour le calcul intégral du facteur de vue avec la cible verticale.

Pour déterminer le facteur de vue par un calcul d'intégrales, les positions des surfaces planes représentant le front de flamme et la cible, sont totalement déterminées par les paramètres suivants :

- inclinaison du front de flamme par rapport à la verticale,
- distance horizontale de la cible par rapport à la base du front de flamme,
- hauteur et abscisse de la cible par rapport à la base du front de flamme.

La surface source (flamme) est discrétisée en $n \times m$ surfaces élémentaires, puis un facteur de vue (cible verticale) est calculé sur chacune de ces surfaces. Le facteur de vue (cible verticale) final recherché, sur une cible supposée de surface unitaire, correspond à la somme de ces derniers telle que :

$$F_{S \rightarrow C}^V = \sum_{ij} F_{S_{ij} \rightarrow C}^V = \sum_{ij} \frac{\cos \theta_{sij} \cdot \cos \theta_{cij} dS_{ij}}{\pi \cdot r_{ij}^2}$$

$$F_{S \rightarrow C}^V = \sum_{ij} \frac{|(\vec{r}_{ij} \cdot \vec{n}_{ij}) \cdot (\vec{r}_{ij} \cdot \vec{n}_C)| dS_{ij}}{\pi \cdot \|\vec{r}_{ij}\|^4}$$

En procédant de même pour déterminer le facteur de vue avec une cible horizontale et latérale, on obtient respectivement $F_{S \rightarrow C}^H$ et $F_{S \rightarrow C}^L$.

3.3 Calcul du flux reçu par une cible

Quelle que soit la méthode utilisée, analytique ou intégrale, la cible élémentaire est matérialisée par 5 faces susceptibles de recevoir un flux : 2 faces latérales (1 et 1'), 2 verticales (2 et 2') et 1 horizontale (3) (Figure 7).

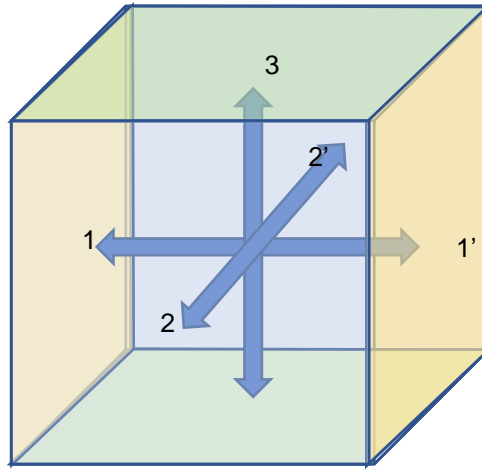


Figure 7. Schéma de la cible élémentaire.

Les flux reçus par 2 cibles opposées (1 et 1') ou (2 et 2') sont comparés 2 à 2 et le maximum des 2 flux est conservé pour calculer la norme 2 des différents flux telle que :

$$Flux = \sqrt{\max(Flux1; Flux1')^2 + \max(Flux2; Flux2')^2 + (Flux3)^2}$$

Où Flux1 et Flux1' sont les flux reçus par les faces latérales, Flux2 et Flux2' sont les flux reçus par les faces verticales et Flux3 est le flux reçu par la face horizontale supérieure.

Un exemple de calcul est proposé ci-après pour une cible se déplaçant autour d'une cellule.

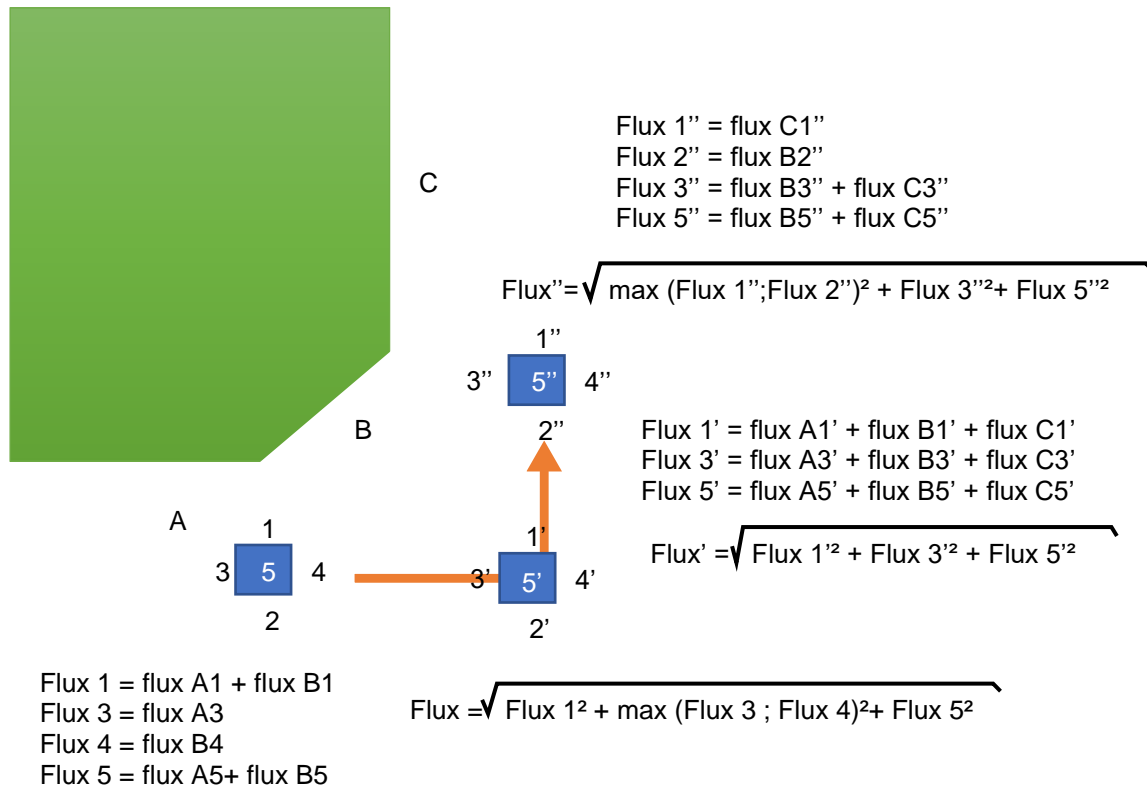


Figure 8. Déplacement de la cible autour des cellules pour calculer le flux reçu en chaque point

4 La prise en compte d'un écran thermique

4.1 Rappel sur le rôle des écrans thermiques

Les écrans jouent un rôle protecteur pour les cibles potentielles en masquant partiellement ou totalement les surfaces émettrices, Figure 9.

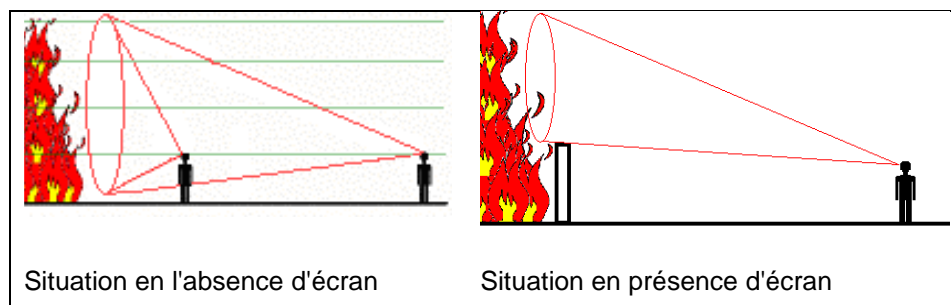


Figure 9. Rôle protecteur des écrans thermiques.

Ils jouent ce rôle d'autant mieux qu'ils sont placés loin de la source et donc près de la cible, Figure 10

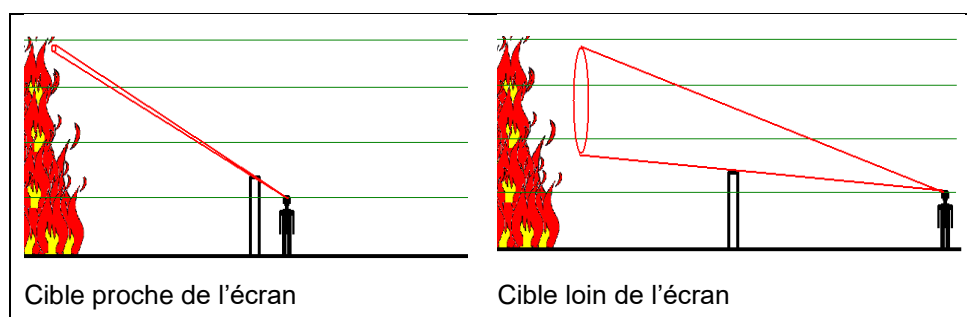


Figure 10. Position de la cible pour un rôle optimal de l'écran thermique

Les éléments qui peuvent être considérés comme écrans sont, entre autres, les merlons ou murs déportés, les dénivelés, les parois périphériques stables au feu pendant la durée de l'incendie ou les murs résiduels après effondrement. Dans ce dernier cas, il est utile de s'interroger sur le comportement de ce mur lors de l'incendie. Ceci est précisé au paragraphe suivant.

4.2 Evolution des parois

Les dispositions constructives des bâtiments interviennent en constituant des écrans en partie basse des flammes. Suivant leur résistance au feu, les parois sont susceptibles de masquer la partie basse de la flamme sur tout ou partie de la hauteur initiale de la paroi.

4.2.1 Caractéristiques d'une paroi

Toute façade se compose de deux éléments, d'une part la structure support et d'autre part, la paroi proprement dite. Dans certains cas, la structure support est intégrée dans la paroi.

Les structures utilisées pour la construction d'entrepôts sont actuellement de type : autostable, poteau acier, portique acier, poteau béton ou portique béton, poteau et portique bois. Une telle structure est caractérisée par sa durée de stabilité au feu sous incendie normalisé, notée R dans la suite et exprimée en minutes. Cette durée de stabilité au feu est estimée en ayant recours à l'arrêté du 22 mars 2004 du Ministère de l'Intérieur, principalement par référence aux méthodes de calcul DTU ou Eurocodes, parfois à partir d'un résultat expérimental.

Les parois utilisées pour la construction d'entrepôts sont actuellement de type : bardage métallique simple ou double peau, panneaux sandwich avec un isolant interne incombustible ou non, béton armé ou cellulaire, maçonnerie (parpaings, briques) et écran thermique métallique.

Des fixations sont utilisées pour maintenir les parois sur la structure support. La durée d'efficacité de ces fixations (dans l'hypothèse d'une sollicitation selon l'incendie normalisé) est notée Y dans la suite et exprimée en minutes.

Toute paroi possède une inertie thermique qui va ralentir la propagation de la chaleur vers sa face non exposée au feu et une étanchéité aux flammes et gaz chauds qui va occulter le rayonnement thermique du feu. Ainsi, la température de la paroi lors d'un incendie restera, pendant un certain temps, suffisamment basse pour considérer son rayonnement négligeable. Cette durée d'isolation thermique est celle définie par l'arrêté du 22 mars 2004 (dans l'hypothèse d'une sollicitation selon l'incendie normalisé) et est notée I, exprimée en minutes.

Au-delà de cette durée, la paroi va continuer à s'échauffer jusqu'au moment où son étanchéité n'est plus assurée. Des flammes sont alors susceptibles d'être visibles au travers de la paroi ou de passer par les interstices créés. Cette durée d'étanchéité, telle que définie par l'arrêté du 22 mars 2004 (dans l'hypothèse d'une sollicitation selon l'incendie normalisé) est notée E et est exprimée en minutes. En règle générale, la paroi doit faire l'objet d'un essai de résistance au feu sous incendie normalisé, pour évaluer les grandeurs I et E correspondant à la durée d'isolation thermique et à la durée d'étanchéité aux flammes indiquées dans le rapport d'essai. De la même manière, lorsque le mode de fixation est indiqué, la durée Y est alors égale au degré de stabilité au feu mesuré.

Cas particulier :

Les parois auto-stables sont un cas particulier dans le sens où elles forment un tout sans distinction possible entre la structure porteuse et la paroi. Ses caractéristiques se limitent alors à I, E et R.

4.2.2 Echauffement de la façade et flux thermique induit

Lorsqu'un incendie se développe dans une cellule sollicitant thermiquement une façade, tant que la durée I n'est pas atteinte, la façade n'émet pas un rayonnement significatif et elle fait office de barrière radiative.

Le décompte de la durée d'efficacité d'une façade, en ce qui concerne ses critères R, E, I et Y ne débute que lorsque la paroi est sollicitée thermiquement soit à partir du moment où le flashover a lieu dans la cellule, soit à partir du moment où l'effondrement de la toiture atteint les bords de l'entrepôt.

A partir de l'instant où le critère I est atteint, l'échauffement se fait progressivement du haut de la façade vers le bas. Ce comportement reflète l'augmentation de l'épaisseur de la couche chaude liée au développement de l'incendie à l'intérieur de la cellule.

Il a été retenu que la zone échauffée s'étend jusqu'au bas de la façade à la vitesse de 0.5 m.min^{-1} sur toute sa largeur et ce quel que soit le type de paroi (Figure 11). Concernant la température en face non exposée, il est fait l'hypothèse qu'elle croît linéairement de 160°C (soit une émittance de $2,0 \text{ kW.m}^{-2}$) à 500°C (soit une émittance de 20 kW.m^{-2}) entre I et E minutes. La température de 160°C correspond au critère d'élévation de température de 140°C avec une température initiale de 20°C , conformément à la définition du critère d'isolation thermique lors d'un essai normalisé. La température de 500°C fait référence à la température moyenne maximale observée lors de l'essai à grande échelle FLUMilog via les caméras thermiques. Pour calculer le flux induit par cet échauffement, l'émissivité des parois est prise égale à 0,7, telle que définie dans les parties feu des Eurocodes.

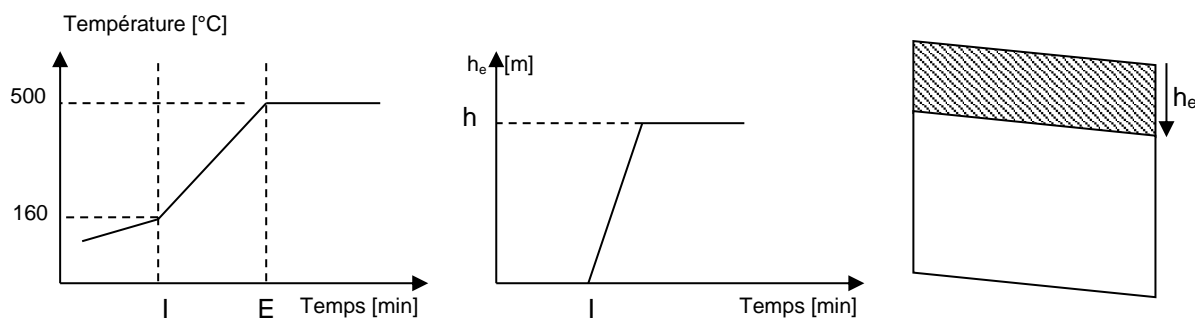


Figure 11. Schéma descriptif de l'échauffement d'une façade

Les deux situations suivantes sont possibles :

- Soit $R > \min [E, Y]$:
Le flux induit est ajouté au rayonnement des flammes tant que $\min [E, Y]$ n'est pas atteint, ensuite on considère que la paroi n'est plus à même de faire écran au rayonnement du feu (soit parce qu'elle n'est plus étanche, soit parce qu'elle s'est décrochée de la structure support).
- Soit $R \leq \min [E, Y]$:
Le flux induit est ajouté au rayonnement tant que la paroi n'a pas atteint la hauteur résiduelle (hauteur de la paroi lorsque le support de la paroi s'est affaissé, cf. paragraphe suivant). Ensuite, on considère que la paroi qui s'est repliée sur elle-même a aménagé un espace où la combustion est fortement réduite, dans ce cas elle est alors opaque au rayonnement des flammes et sans flux induit.

4.2.3 Hauteur de la façade

Lorsqu'un incendie se développe dans une cellule sollicitant thermiquement une façade, la hauteur de cette façade ne commencera à décroître que lorsque la stabilité de l'ossature support n'est plus assurée, c'est-à-dire après la durée R , Figure 12.

Il est rappelé que la structure est considérée comme sollicitée soit à partir du moment où, soit, le flashover a lieu dans la cellule, soit, à partir du moment où l'effondrement de la toiture atteint les bords de l'entrepôt.

La vitesse d'affaissement de la paroi est fonction de la ductilité de la structure support et du système statique de la structure. Pour un poteau acier (sans liaison notable avec des poutres ou traverses), elle est estimée à $0,05 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$ sauf dans le cas d'une paroi comportant un isolant combustible où elle est alors de $0,1 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$. Pour un poteau étant partie intégrante d'un portique acier, elle est estimée à $0,1 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$ sauf dans le cas d'une paroi comportant un isolant combustible où elle est alors de $0,2 h_{\text{paroi}} \cdot \text{min}^{-1}$, car le poteau sera entraîné par l'effondrement des poutres ou traverses. Pour une structure béton, du type poutre, portique ou mur auto-stable, il est estimé que l'effondrement est quasi instantané.

L'affaissement de la façade se poursuit jusqu'à ce que la hauteur résiduelle $h_{\text{rés}}$ soit atteinte. Celle-ci dépend également de la ductilité et du mode de ruine de la structure support : $0,3 h$ pour un poteau acier, $0,4 h$ pour un portique acier, $0,1 h$ pour un poteau béton ou un portique béton.

Pour les éléments suffisamment ductiles, tels que les poteaux métalliques support de parois métalliques ou d'éléments préfabriqués en béton normal ou béton cellulaire, il y a également lieu de tenir compte qu'une fois affaissée, la paroi va partiellement recouvrir les matériaux combustibles adjacents à la façade et ainsi provoquer un recul de la flamme. Ce recul est estimé à $0,15 h$ pour une façade stabilisée par un poteau acier sans liaison notable avec des poutres ou traverses et à $0,4 h$ pour une façade stabilisée par des portiques acier, où h est la hauteur initiale de la paroi en mètre.

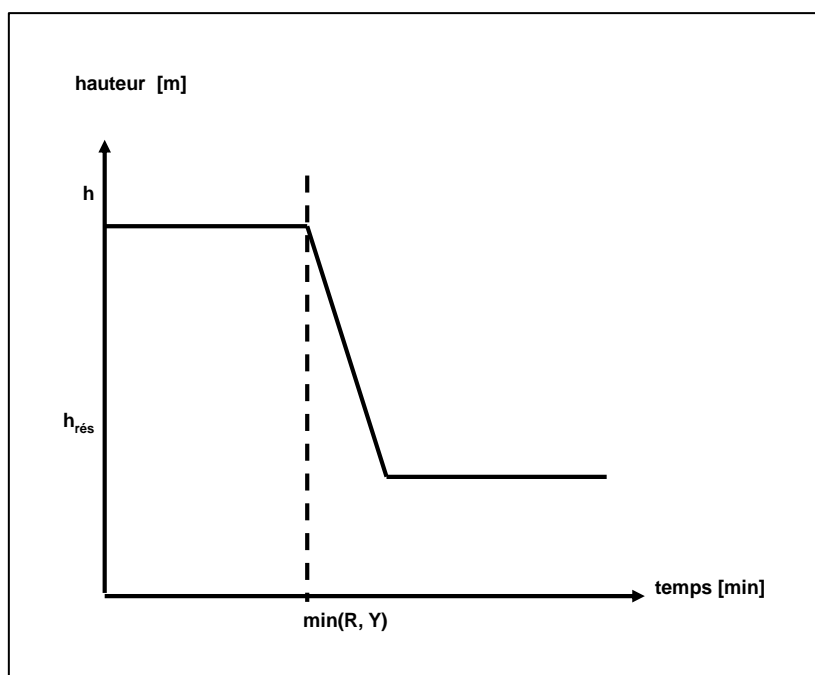


Figure 12. Hauteur de la paroi au cours du temps

Si un déport latéral ou une zone de préparation est présente, c'est le maximum entre cette valeur et le recul induit par l'effondrement de la paroi qui est utilisé pour positionner la flamme.

Le tableau suivant récapitule les hypothèses retenues pour les différents matériaux constituant les parois selon les critères décrits au paragraphe §4.2.2.

4.2.4 Cas des zones de préparation et déports importants

Il convient de souligner que si l'extension du déport latéral ou de la zone de préparation est supérieure à la hauteur initiale de la paroi alors cette dernière reste en place pendant toute la durée du feu quelles que soient les valeurs de R, E et Y mais le flux induit par la paroi est quand même ajouté. En effet, pour une telle zone de déport, le flux thermique reçu par les parois est suffisamment réduit pour assurer sa tenue pendant toute la durée de l'incendie. Par exemple, la Figure 13 montre la réduction du flux thermique sur la paroi est d'une cellule générée par la prolongation de la zone de déport. Dans le cas présenté, un déport équivalent à 2 fois la hauteur de la paroi est suffisante pour éviter l'effondrement de cette paroi. En revanche, des longueurs inférieures n'évitent pas la chute de ce mur.

Cette hypothèse n'est valable qu'en l'absence de stockage sur cette zone de déport. Au-delà d'un volume de marchandises supérieur à l'équivalent de 2 camions, la zone ne peut plus être considérée comme une zone de déport et doit être intégrée au calcul des flux thermiques.

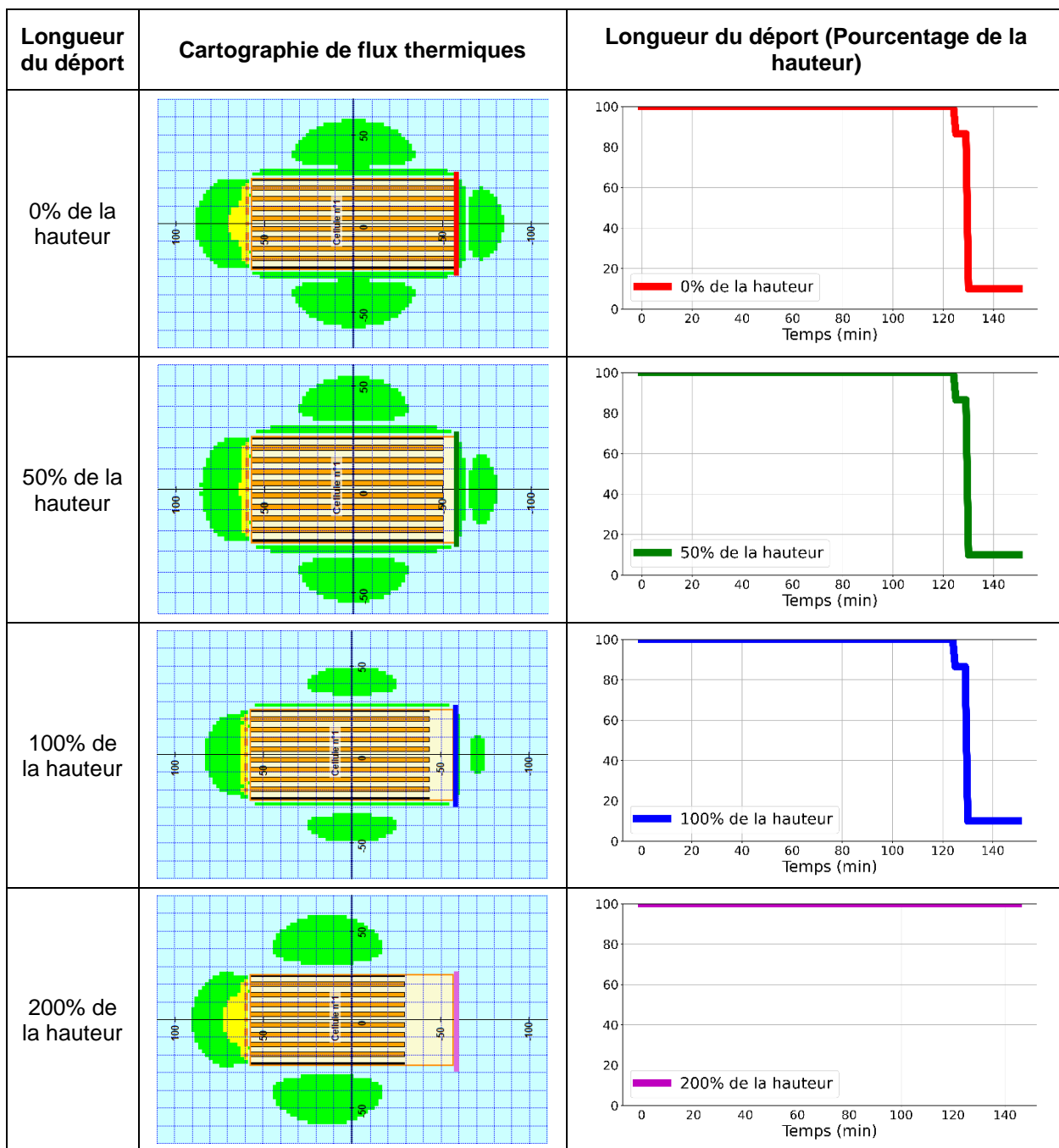


Figure 13. Flux thermique reçu par la paroi à l'opposé de la zone de dépôt.

Structure support	Paroi						
	Rayonnement de la paroi		Effacement de la paroi si R > MIN [E, Y]	Déformation de la paroi à partir de R			
	Paroi stable	Paroi effondrée avec hauteur résiduelle		Hauteur résiduelle	Vitesse affaissement (m/min)	Largeur de recouvrement (m)	
						Paroi ductile (acier)	Paroi peu ductile (béton ou maçonnerie)
Poteau acier	Entre I et MIN [E, Y] si R > min [E, Y]	Pas de rayonnement	A partir de MIN [E, Y]	0.3 h	0,05 h ¹	0.15 h	0
Portique acier				0.4 h	0,1 h ¹	0.4h	0
Poteau béton/bois				0.1 h	0.9 h	0	0
Portique béton/bois				0.1 h	0.9 h	0	0
Auto-stable béton			A partir de E	0.1 h	0.9 h	-	0

Tableau 2. Tableau de synthèse des parois

Durées d'efficacité :

- Paroi : E min et I min
- Fixation : Y min
- Structure support : R min
- t^* : instant où la paroi atteint la hauteur résiduelle

¹ Valeur à multiplier par deux pour une paroi comportant un isolant combustible

Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des données disponibles sur un certain nombre de sinistres. Pour chaque sinistre, une fiche descriptive avec photos est fournie en annexe. Si aucune information n'est disponible, la case est laissée vide.

Référence	Structure + paroi	Paroi					Annexe
		Stabilité du support	Support stable	support effondré			
			% effacé des parois	Hauteur résiduelle		Largeur de recouvrement	
				h_{\min}	h_{\max}		
F1	béton + bardage double peau	NON	-	30%	50%	0.3 h	A
F2	béton	OUI	0% - 100%	-	-	-	B
F3	métallique + briques	OUI	0% - 20%	-	-	-	C
F4	métallique + parpaings	OUI	0% - 10%	-	-	-	C
F5	métallique + bardage simple peau	NON	-	30%	90%	0.4 h	D
F6	métallique + bardage simple peau	NON	-	20%	70%	-	D
F7	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	75%	0.3 h	D
Face Au Risque -372	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	50%	-	D
Face Au Risque -387	métallique + bardage simple peau	NON	-	50%	50%	0.25 h	D
Face Au Risque -359	métallique + bardage double peau	NON	-	40%	70%	0.2 h	E
F8	métallique + bardage double peau	NON	-	50%	50%	0.3 h	E
F9	métallique + bardage double peau	NON	-	25%	80%	0.25 h	D

Tableau 3. Tableau descriptif du comportement des parois

4.3 Cas des écrans thermiques déportés : merlons et zone de préparation dont la largeur est supérieure à la hauteur de la paroi

Un écran thermique a la propriété d'arrêter le rayonnement et par conséquent de diminuer le flux reçu par une cible située dans sa zone d'ombre. Sont considérés comme écran thermique dans FLUMillog les parois, soit sur leur hauteur totale soit au niveau de la hauteur résiduelle ou encore les merlons, ces derniers pouvant représenter d'autres obstacles sous réserve de leur stabilité au flux thermique incident. La zone d'ombre correspond à la projection sur la surface émettrice de la surface du merlon (Figure 14). A cette zone d'ombre, est associé un facteur de vue qui est retranché à celui calculé pour la surface émettrice seule.

Soit f_e le facteur de forme entre la surface émettrice et la cible et f_o le facteur de forme de la surface projetée S_o du merlon sur S_e . Le facteur de forme global est alors $f = f_e - f_o$.

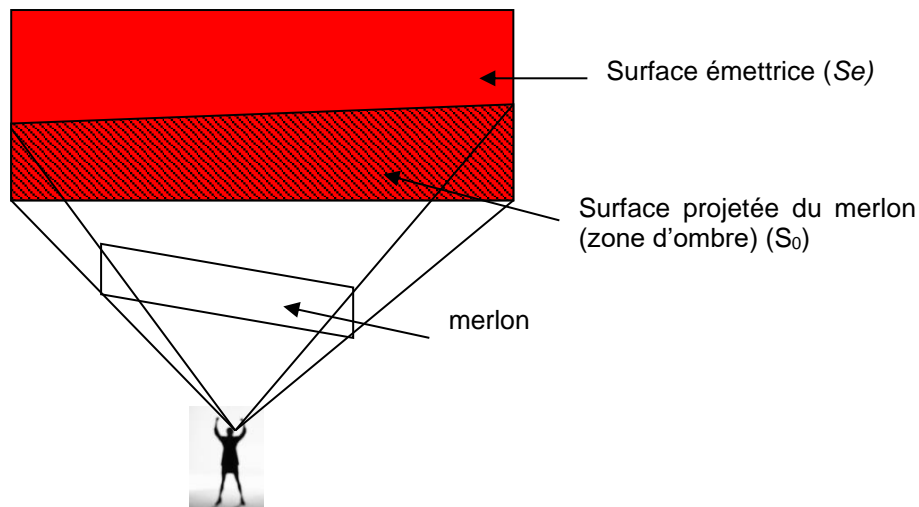


Figure 14. Schéma descriptif de l'influence d'un écran thermique

5 Propagation à 3 cellules

5.1 Scénarios de propagation

5.1.1 Types de scénarios

Selon la nature des produits entreposés dans les cellules, 2 types de situation peuvent se produire.

1^{er} cas : Scénario sans propagation

Dans ce cas, il n'y a pas de propagation aux cellules voisines, ceci est illustré sur la Figure 15.

1^{er} cas : la durée de l'incendie est inférieure à la résistance des murs séparatifs

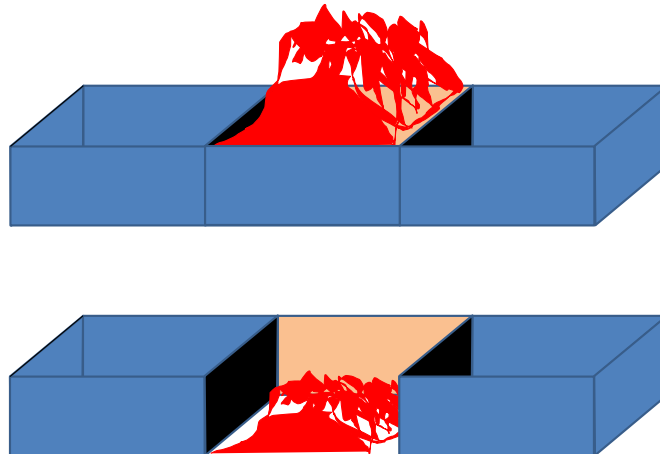


Figure 15. Schéma de propagation du feu dans le cas où l'incendie est plus court que la durée de résistance des parois – pas de propagation

2^{ème} cas : Scénario avec propagation

Dans ce cas, la propagation est considérée dès que cette durée est atteinte. Ceci est illustré sur la Figure 16 et la Figure 17.

2^{ème} cas : la durée de l'incendie est supérieure à la résistance des murs séparatifs

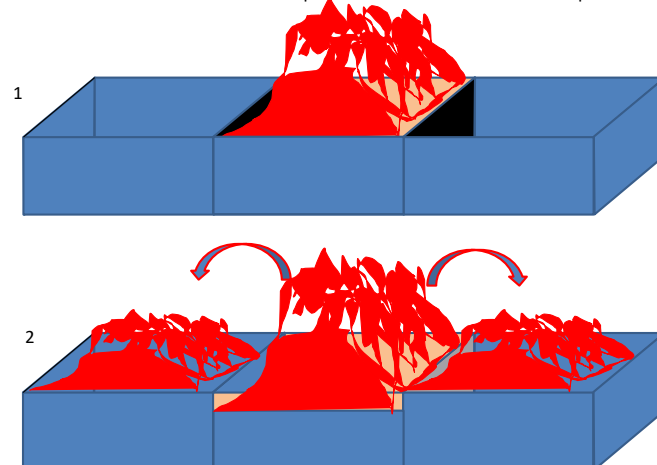


Figure 16. Le feu se propage aux deux cellules voisines dès lors que les murs séparatifs ne sont plus en mesure de jouer leur rôle (temps au-delà de leur degré REI)

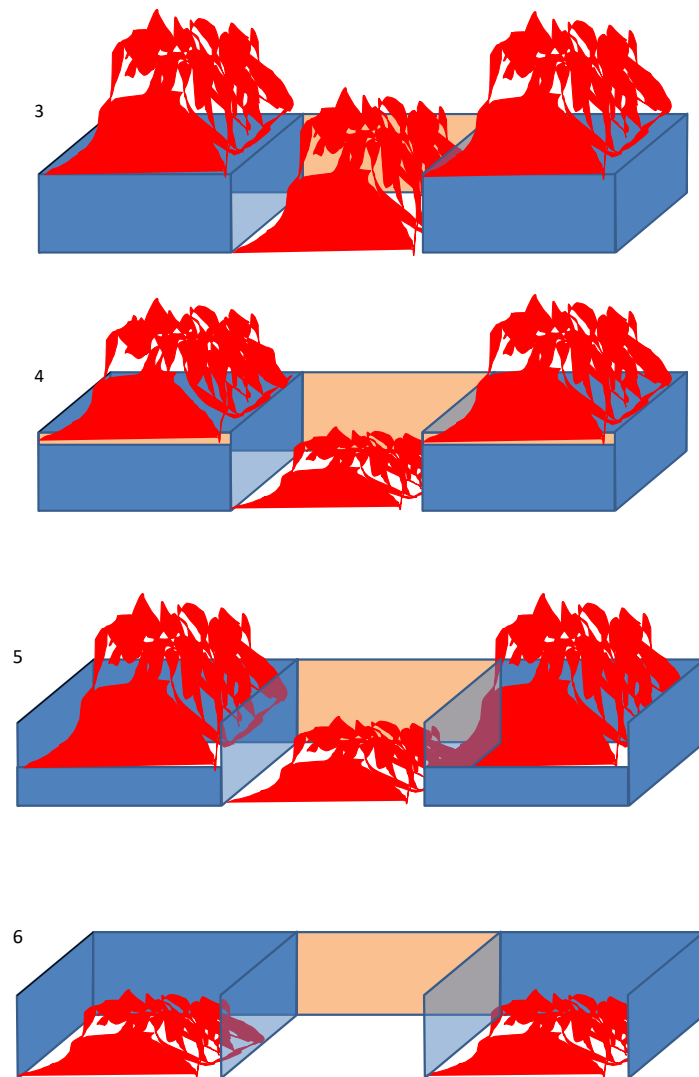


Figure 17. Schéma de propagation d'un incendie d'une cellule à ses voisines

Le principe du calcul consiste alors à calculer les flux pour chaque cellule dans un environnement élargi à l'espace présent en vis-à-vis de chaque façade.

Compte tenu de la présence des parois séparatrices qui vont empêcher la propagation pendant la durée REI, il faut sommer les flux après les avoir déphasés sur cet espace. Ceci est représenté schématiquement sur la Figure 18.

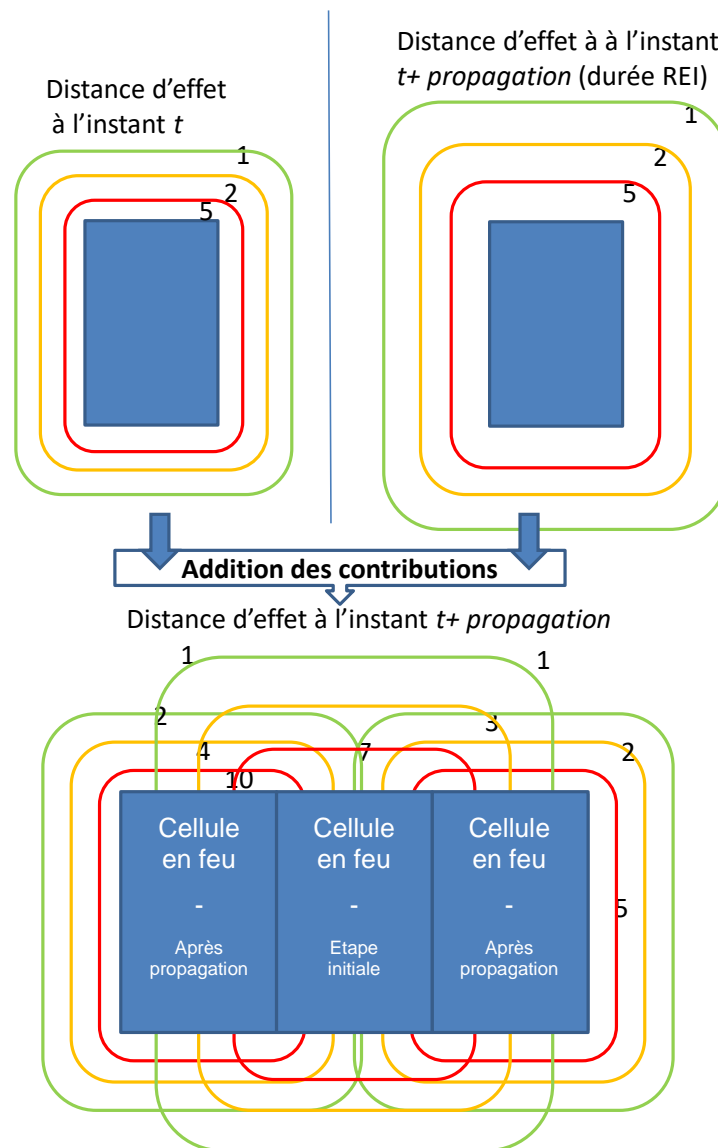


Figure 18. Calcul pratique des conséquences d'une propagation d'un incendie – étape 1

5.1.2 Définition de scénarios par typologie de combustible

Dans certains cas, l'utilisateur de FLUMilog peut comparer la durée de feu calculée par le logiciel Flumilog avec la durée de résistance au feu des parois afin de juger la pertinence de modéliser la propagation d'un incendie. Toutefois, une approche basée seulement sur ce critère est très prudente car elle ne prend pas en compte la nature réelle de l'agression thermique sur la paroi, en comparaison des caractéristiques d'un feu normalisé. Afin de limiter le caractère majorant de l'approche, une approche par typologie de combustible est proposée sur le Tableau 4 pour les cellules construites avec des parois REI 120 (FLUMilog, 2020).

Dans cette approche, les rubriques 1510 et 1511 sont considérés comme des combustibles avec des charges combustibles limitées ou adaptées aux normes de résistance au feu. Pour ce type de combustibles, la modélisation des scénarios de propagation n'est pas nécessaire seulement si toutes les conditions indiquées dans le Tableau 4 pour cette rubrique sont atteintes. Ce critère est également valide pour les palettes avec des puissances et charges calorifiques égales ou inférieures. En revanche, il convient de prendre en compte le risque de propagation en cas de départ de feu dans la cellule contenant des liquides inflammables ou des aérosols.

Nature du stockage	Conditions nécessaires	Modélisation du scénario de propagation
Rubrique 1511	-	Non
Rubrique 1510	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance de la toiture inférieure à 30 min • Pas de stockage densifié • Surface inférieure à 12 000 m² • Hauteur inférieure à 23 m 	Non
Rubrique 2662	-	Oui
Palettes expérimentales ou par composition	Comparaison de la puissance et charge calorifique à celles des produits 1511 et 1510 et application des règles correspondantes	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Oui</u> : Si la puissance ou la charge calorifique de la palette sont supérieures à celles de la rubrique 1510. • <u>Non</u> : Si la puissance ou la charge calorifique de la palette sont inférieures à celles de la rubrique 1510.
Liquides inflammables et/ou aérosols	-	Oui

Tableau 4. Evaluation de la pertinence de la modélisation de scénarios de propagation selon le type de combustible (FLUMilog, 2020)

Il convient de rappeler que cette approche nécessite la présence de parois REI 120 avec, si des ouvertures y sont présentes, des fermetures automatiques de degré au moins équivalent. De plus, toute dégradation de la paroi (présence d'ouverture non équipées de dispositif automatique de fermeture, passage de canalisation non coupe-feu, interactions potentielles avec la structure principale, ...) devra conduire à modéliser un scénario d'incendie propagé.

5.2 Détermination des flux maximums

A partir des éléments décrits dans les paragraphes précédents, il est possible de calculer à chaque instant le flux reçu en tout point de l'environnement et de les comparer aux seuils réglementaires. Un exemple de calcul réalisé avec la méthode est présenté ci-après.

Le calcul des flux se fait en deux temps, on considère d'abord la situation sans vent puis la situation avec vent.

Procédure de calcul des flux sans vent :

Comme indiqué au paragraphe §3.2, la cible est un cube élémentaire. Il faut donc considérer les flux élémentaires reçus sur chacune des faces latérales ainsi que sur la face supérieure. La première étape passe alors par le calcul de ces 5 flux élémentaires en tout point du domaine et ce à chaque instant. Dans le cas d'un entrepôt multi-cellules, cette étape est effectuée pour chaque cellule et les flux élémentaires sont additionnés en tenant compte des éventuels décalages temporels induits par la propagation entre cellule. L'application de la formule du paragraphe §3.2 donne alors le flux en tout point du domaine et à chaque instant. Il ne reste plus qu'à prendre le maximum observé sur toute la durée de l'incendie toujours en chaque point du domaine.

Procédure de calcul des flux avec vent :

La même procédure est appliquée mais cette fois-ci avec une flamme inclinée pour toutes les cellules. Le résultat est donc un champ de flux maximum pour la situation avec vent.

La dernière partie du calcul consiste à prendre le maximum de ces deux valeurs en tout point du domaine. Un exemple de résultats est fourni sur la Figure 19.

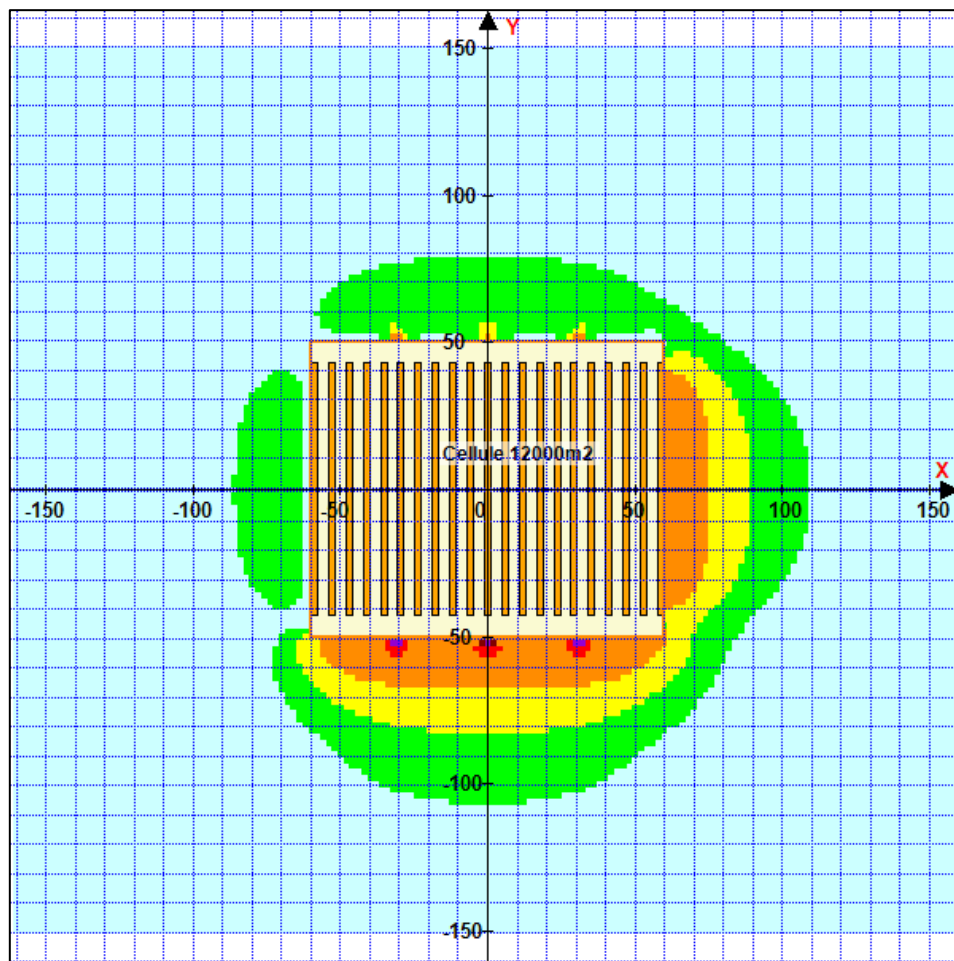


Figure 19. Exemple de cartographie de flux obtenue avec l'outil FLUMilog.

6 Références

- Bagster, D., & Pitblado, R. (1989). Thermal hazards in the process industry. *Chemical Engineering Progress*, 85(7), 69-75.
- Brzustowski, T. A., & Sommer, Jr., E. C. (1973). Predicting Radiant Heating from Flares. In *Proceedings-Division of Refining* (Vol. 53). American Petroleum Institute.
- FLUMilog. (2020). *Note de propagation*. <https://www.flumilog.fr/faq>
- Lannoy, A. (1984). *Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre : Études déterministe et probabiliste du scénario d'accident, prévention des effets de surpression* (Vol. 1). Paris : Electricité de France.
- Wayne, D. (1991). An economical formula for calculating atmospheric infrared transmissivities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 4(2), 86-92.

