



# Evaluation des flux thermiques

*Société DEL SIGNORE*



# Evaluation des flux thermiques

Société DEL SIGNORE

## Version du document :

Référence : 70014.01 RN002  
Version: 0  
Date : 17/01/17  
Élaboration : Adrien Bouzonville  
Contact : [abouzonville@atmoterra.com](mailto:abouzonville@atmoterra.com)  
Statut : Confidentiel

## Distribution :

### **Société DEL SIGNORE**

Att : DEL SIGNORE Hervé  
2 rue Jean CORONA  
69120 Vaulx en Velin  
[ets.del-signore@orange.fr](mailto:ets.del-signore@orange.fr)

### **RPHEnvironnement**

Philippe Rossignol  
[rossignol.ph@wanadoo.fr](mailto:rossignol.ph@wanadoo.fr)

## Le rapport sera cité de la manière suivante :

ATMOTERRA, 2017, Evaluation des flux thermiques de la Société Del Signore pour le site de Vaulx en Velin (69). Rapport d'ATMOTERRA pour la Société Del Signore. Réf. 70014.01-RN002. 17 Janvier 2017

---

### **ATMOTERRA SAS**

Société par Actions Simplifiées au capital de 7 000,00 €  
Immatriculée au RCS Nantes 820 330 314 – Code APE 7490B – N° TVA Intracom FR 74820330314  
Siège social : 80 impasse des Nymphéas, 44300 NANTES, FRANCE  
Tel: +33 9 84 16 27 84 | Fax : +33 9 89 16 27 84 | Mobile: +33 6 51 59 61 38 | Email : [contact@atmoterra.com](mailto:contact@atmoterra.com)

# Sommaire

1 Introduction et méthodologie.....	5
1.1 Objet de l'étude.....	5
1.2 Méthodologie.....	5
1.3 Rappel des valeurs seuils des effets thermiques.....	6
1.3.1 Valeurs de référence relatives aux effets sur les structures.....	6
1.3.2 Valeurs de référence relatives aux effets sur l'homme.....	7
2 Hypothèses et approches considérées.....	7
2.1 Généralités concernant le calcul du flux thermique reçu par une cible.....	7
2.2 Hypothèses considérées pour les conditions atmosphériques.....	8
2.3 Hypothèse concernant le pouvoir émissif de la flamme.....	8
2.4 Hypothèse concernant la vitesse de combustion surfacique.....	10
2.5 Hauteur de flamme.....	12
2.6 Angle d'inclinaison de la flamme.....	12
2.7 Facteur de vue cylindrique avec inclinaison de flamme.....	13
2.8 Transmissivité atmosphérique.....	14
3 Caractéristiques du stockage et hypothèses retenues.....	15
3.1 Implantation du stock.....	15
3.2 Caractérisation du stockage.....	15
3.3 Paramètres retenus.....	15
3.4 Photos du stockage.....	16
4 Résultats de la modélisations des effets thermiques.....	16

## Index des tableaux

Tableau 1.1 : Seuils des effets thermiques sur les structures.....	6
Tableau 1.2 : Seuils des effets thermiques sur l'homme.....	7
Tableau 2.1 : Récapitulatif des données atmosphériques utilisées pour la modélisation.....	8
Tableau 2.2: Valeurs d'essais pour la vitesse de combustion surfacique (produits liquides/gaz)...	11
Tableau 2.3: Valeurs d'essais pour la vitesse de combustion surfacique (produits solides).....	11
Tableau 4.1: Distances correspondant aux valeurs seuils réglementaires pour le flux thermique	16

## Index des illustrations

Figure 1 : géométrie de la Cible et de la flamme.....	13
Figure 2: Implantation du stock de produit combustible.....	15
Figure 3: Vue du stock de produits combustibles.....	16

# 1 Introduction et méthodologie

## 1.1 Objet de l'étude

Dans le cadre du dossier de régularisation de l'activité de l'entreprise DEL SIGNORE à Vaulx en Velin (69), une modélisation des effets thermiques a été demandée par la société RPH Environnement. L'objectif de cette modélisation est d'évaluer les flux thermiques générés par l'incendie du stock de matière combustible présente sur le site, dans le cadre de l'Etude de Dangers.

Les objectifs du présent document sont les suivants:

- Evaluer les effets thermiques des phénomènes dangereux identifiés lors de l'analyse de risque;
- Comparer ces distances d'effets avec les valeurs seuils applicables;
- Evaluer la possibilité d'effets domino entre les différentes installations.

Les formules de calculs utilisés dans la présente étude ont été développées depuis plus de 40 ans pour modéliser les feux de liquide inflammables. En adaptant certains paramètres (vitesse de combustion surfacique, hauteur de la flamme,...), il est possible d'utiliser ces formules pour modéliser également les feux de solides, de bâtiments, d'entrepôts.

Cette démarche est celle proposée par l'INERIS en l'absence de formules spécifiques.

## 1.2 Méthodologie

L'approche présentée ci-dessous est conforme à la démarche présentée dans le guide suivant :

- "Modélisation des effets thermiques dus à un feu de nappe d'hydrocarbures liquides" - Septembre 2006 - Groupe de Travail Dépôt de Liquides Inflammables- GTDLI version 01
- "Methods for the calculation of physical effects" - Yellow Book - TNO -1997

Les calculs s'appuient en particulier sur les guides suivants:

- "ENTREPÔTS DE MATIERES COMBUSTIBLES - Guide d'application de l'arrêté ministériel du 5 août 2002 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts soumis à autorisation sous la rubrique 1510"
- OMEGA 4 – "Modélisation d'un incendie affectant un stockage de générateurs d'aérosols" - Direction des Risques Accidentels – INERIS - Septembre 2002
- INERIS – Guide OMEGA 16 – DRA – N° 46055-CL57149
- « OMEGA – 2 – Feux de nappe – Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels » – (DRA-006)- INERIS 2002 ;

- « Entrepôts et détection incendie » – INERIS. PKu – 19 février 2004 – 46059 ;

Cette démarche utilise également les conditions de modélisations et les valeurs réglementaires mentionnées dans la réglementation:

- Circulaire DPPR/SEI2/CB-06-0388 du 28/12/06 relative à la mise à disposition du guide d'élaboration et de lecture des études de dangers pour les établissements soumis à autorisation avec servitudes et des fiches d'application des textes réglementaires récents
- Arrêté du 29/09/05 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation

### 1.3 Rappel des valeurs seuils des effets thermiques

Les valeurs seuils permettant d'apprécier les effets thermiques sur les hommes et les structures sont issues de l'annexe 2 de l'Arrêté du 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

#### 1.3.1 Valeurs de référence relatives aux effets sur les structures

Rayonnement thermique	Effets
5 kW/m <sup>2</sup>	seuil des destructions de vitres significatives ;
8 kW/m <sup>2</sup>	<b>seuil des effets domino</b> et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures ;
16 kW/m <sup>2</sup>	seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton ;
20 kW/m <sup>2</sup>	seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton ;
200 kW/m <sup>2</sup>	seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

Tableau 1.1 : Seuils des effets thermiques sur les structures

### 1.3.2 Valeurs de référence relatives aux effets sur l'homme

Rayonnement thermique	Effets
3 kW/m <sup>2</sup>	<b>seuil des effets irréversibles</b> délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
5 kW/m <sup>2</sup>	<b>seuil des effets létaux</b> délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » ;
8 kW/m <sup>2</sup>	<b>seuil des effets létaux significatifs</b> délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine ».

Tableau 1.2 : Seuils des effets thermiques sur l'homme

## 2 Hypothèses et approches considérées

### 2.1 Généralités concernant le calcul du flux thermique reçu par une cible

La formule générique du flux thermique émis par un feu de diamètre  $D_{eq}$  et reçu par une cible située à  $r$  mètres du feu est :

$$\phi = \phi_0 \times F(r) \times \Gamma(r)$$

Avec

- $\phi_0$  : Pouvoir émissif de la flamme qui correspond à la puissance rayonnée par unité de surface de la flamme.
- **F(r)** : Facteur de vue. Facteur purement géométrique qui traduit l'énergie émise par un feu et reçue par une cible.
- **Γ(r)** : Transmissivité atmosphérique. Ce facteur permet d'intégrer l'influence de l'air sur le flux émis. En effet, une partie du flux est absorbée par l'air (plus particulièrement par l'eau et le CO<sub>2</sub>), entre le front de flamme et la cible. Ce facteur est indépendant de la surface en feu et du produit mis en jeu.

## 2.2 Hypothèses considérées pour les conditions atmosphériques.

Les données considérées pour les modélisations sont les suivantes :

Hypothèses considérées pour la modélisation des effets thermiques	
Modèle utilisé	Feu de cuvette d'hydrocarbure => assimilée à un feu de solide de surface équivalente (TNO)
Température de l'atmosphère	15 °C
Humidité relative	70%
Vitesse du vent à 10 m d'altitude	5 m/s
Quantité de CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère	0.03%

Tableau 2.1 : Récapitulatif des données atmosphériques utilisées pour la modélisation

Ces données correspondent aux exigences réglementaires actuelles (Circulaire DPPR/SEI2/CB-06-0388 du 28/12/06)

## 2.3 Hypothèse concernant le pouvoir émissif de la flamme

Plusieurs approches permettent de déterminer le pouvoir émissif de la flamme. Ces approches ont été discutées par le Groupe de Travail Dépôt de Liquides Inflammables (GTDLI) permettant de convenir d'une approche en fonction des différentes configurations..

Peu de données bibliographiques sont disponibles concernant le pouvoir émissif d'une flamme de matériaux solides.

*"Les risques liés aux stockages de matières combustibles varient en fonction du type de combustible (vitesse de combustion et potentiel calorifique), de l'état (divisé ou pas), du mode de stockage (racks, masse)..."*

- *Les ordres de grandeurs usuels des paramètres de calcul à prendre en compte sont les suivants :- vitesse de combustion : 15 à 30 g/m<sup>2</sup>.s ;*
- *flux surfacique des flammes : 25 à 40 kW/m<sup>2</sup> ;*
- *hauteur des flammes plafonnées à 3 fois la hauteur utile sous ferme en pied de poutre.*

*Pour le cas d'un entrepôt "généraliste", on se calera sur les valeurs maximales."*

Source : "ENTREPÔTS DE MATIERES COMBUSTIBLES - Guide d'application de l'arrêté ministériel du 5 août 2002 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts soumis à autorisation sous la rubrique 1510"

*"Les valeurs maximales de flux thermiques atteints au cours de l'incendie, mesurées à quelques mètres du foyer, sont de l'ordre de :*

- *50 kW/m<sup>2</sup> pour les trois palettes de laque,*
- *55 kW/m<sup>2</sup> pour les six palettes de laque,*
- *16 kW/m<sup>2</sup> pour les trois palettes d'insecticide,*
- *90 kW/m<sup>2</sup> pour les six palettes de déodorant,*
- *60 kW/m<sup>2</sup> pour les neuf palettes de laque,*

*Notons qu'il s'agit là des valeurs maximales observées, correspondant à des pics mesurés sur d'une courte durée relativement à la durée de l'incendie."*

Source : OMEGA 4 – "Modélisation d'un incendie affectant un stockage de générateurs d'aérosols" - Direction des Risques Accidentels – INERIS - Septembre 2002

Des essais de combustion et de mesure des flux thermiques ont également été réalisés par Tewarson & Pion en 1976. Ils ont pu mettre en évidence les valeurs suivantes:

- 23,8 kW/m<sup>2</sup> pour le bois de sapin,
- 30 kW/m<sup>2</sup> pour cartons,
- 32,6 kW/m<sup>2</sup> pour le polyéthylène.
- 30 kW/m<sup>2</sup> pour le coton
- 30 kW/m<sup>2</sup> pour le polyamide

## 2.4 Hypothèse concernant la vitesse de combustion surfacique

Des informations concernant la vitesse de combustion peuvent être obtenues auprès de l'INERIS – Guide OMEGA 16 – DRA – N° 46055-CL57149. Il apparaît, d'après l'INERIS que la vitesse de combustion constitue un facteur d'influence important pour les modélisations d'incendie.

Pour mémoire la vitesse de combustion ( $m''$ ) est définie comme la masse de solide ou de liquide brûlée par unité de surface et de temps ( $g/m^2/s$ ).

Etant donné :

- la diversité des familles d'aliments au feu et les incertitudes qui peuvent demeurer concernant leur composition chimique effective, et leur état physique,
- la répartition de ces aliments au feu dans le stockage, leur proximité et leur comportement au feu,
- l'influence des conditions ambiantes (température, hygrométrie, ventilation et circulation des gaz, flux thermique),
- la disparition de certains matériaux non combustibles par évaporation ou décomposition, selon une cinétique non facilement quantifiable,
- les modes de stockage et de conditionnement employés pour chaque famille : plus ou moins dense, contenants de nature diverse...
- la difficulté à prévoir le déroulement du feu (descriptif des flammes, surfaces concernées, combustion en fûts ou après épandage, etc.),
- l'intervention des secours et l'arrosage du feu modifiant les conditions « normales » de combustion des produits,
- et enfin la méconnaissance éventuelle des caractéristiques « brutes » de combustion de certains types de produits,

il paraît difficile de déterminer pour chaque famille de produits une vitesse spécifique de combustion et de lui associer ainsi, en rapportant à la surface d'entreposage et à la quantité concernées, une durée de « combustion ». Ceci est pourtant la méthode qui permettra d'aboutir à l'estimation la plus fine de la vitesse de combustion. Lorsque cette méthode n'est pas applicable, il est alors possible :

- soit de réaliser des essais à petite et moyenne échelle, la difficulté ensuite étant d'extrapoler les résultats obtenus à une échelle supérieure,
- soit de retenir une approche forfaitaire sur la base du retour d'expérience.

A titre d'exemple, dans la mesure où la littérature ne fournit aucune valeur suffisamment fondée quant aux vitesses de combustion respectives des produits impliqués dans les différents scénarios identifiés, l'INERIS par expérience et en se basant sur des essais qu'il a menés

relativement à des produits phytosanitaires, retient de façon forfaitaire deux hypothèses pour les entrepôts de phytosanitaires :

- **une forte vitesse de combustion (30 g/m<sup>2</sup>/s)** qui conduit à d'importants débits de fumées toxiques sont considérés. Toutefois, la puissance thermique est aussi implicitement importante de sorte que le panache de fumées s'élève, la dispersion des produits toxiques s'opérant ainsi en altitude.
- **une faible vitesse de combustion (10g/m<sup>2</sup>/s)**, le débit de fumées toxiques est alors réduit et la dispersion de ces fumées s'opère à plus basse altitude, en raison de la puissance thermique elle-même réduite.

La vitesse de combustion de certains produits bruts a été évaluée d'après la littérature:

0,035 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le fioul lourd	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS)
0,038 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le kerosene	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS) Le Kerosène est obtenu par distillation d'hydrocarbures avec avec un interval de distillation compris entre 150 °C et 250 °C. Le point éclair est supérieur à 55°C.
0,039 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	Huile pour transformateur	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS)
0,048 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour l'éther de pétrole	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS)
0,055 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le gasoil	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS)
0,075 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS)
0,085 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	Benzène (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS)

Tableau 2.2: Valeurs d'essais pour la vitesse de combustion surfacique (produits liquides/gaz)

0.010 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour un entrepôt de phytosanitaires (faible vitesse de combustion / feu couvant)	l'INERIS – Guide OMEGA 16 – DRA – N° 46055-CL57149
0.013 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le bois de sapin	Tewarson & Pion, 1976
0.014 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le polyéthylène	Tewarson & Pion, 1976
0,020 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le Polyméthylméthacrylate (polyester solide) ou le polystyrène	BABRAUSKAS, 1983 (repris dans le Guide Ω 2 de l'INERIS)
0,030 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le coton	Tewarson & Pion, 1976
0,030 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour le polyamide	Tewarson & Pion, 1976
0.030 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour un entrepôt de phytosanitaires (forte vitesse de combustion / incendie développé)	l'INERIS – Guide OMEGA 16 – DRA – N° 46055-CL57149
0.050 kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	pour les cartons	Tewarson & Pion, 1976

Tableau 2.3: Valeurs d'essais pour la vitesse de combustion surfacique (produits solides)

## 2.5 Hauteur de flamme

La détermination de la longueur de la flamme est différente, selon la présence ou non de vent. Les formules utilisées par l'ensemble des experts sont les formules de Thomas (avec et sans vent). Afin de respecter les hypothèses réglementaires (vitesse du vent égale à 5m/s) la corrélation de Thomas a été considérée pour un vent supérieur à 1 m/s.

Corrélation de Thomas lorsque le vent est >1 m/s :

$$\frac{L_f}{D} = 55 \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_{\text{air}} \sqrt{gD}} \right)^{0,67} \cdot u^*{}^{-0,21}$$

avec :  $u_w$ , la vitesse du vent (m/s)

$D_{eq}$  = Diamètre de la nappe en feu

$\rho_{\text{air}}$ , la masse volumique de l'air ambiant (kg/m<sup>3</sup>)

$\dot{m}''$  : débit massique de combustion par unité de surface de la nappe en feu (kg/m<sup>2</sup>/s)

$g$  : l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Afin de tenir compte de la hauteur du stockage produit considéré, la longueur de la flamme ( $L_f$ ) a été augmentée comme suit:

$$L_f = H_{\text{stock}} + L_{\text{Thomas}}$$

avec :  $L_f$ , la hauteur de la flamme retenue pour la suite du calcul (m);

$H_{\text{stock}}$ , hauteur du stockage ou du bâtiment considéré (m);

$L_{\text{Thomas}}$ , la hauteur de la flamme calculée selon la formule de Thomas (m);

*Cette approche augmente la surface de la flamme solide considérée, ce qui constitue une approche majorante pour les distances d'effets calculées.*

## 2.6 Angle d'inclinaison de la flamme

La corrélation permettant de déterminer l'angle d'inclinaison d'une flamme est la corrélation de Welker and Sliepcevich, présentée ci-dessous :

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

avec : Fr: Nombre de Froude 
$$Fr = \frac{u_w^2}{Deq \times g}$$

Re: Nombre de Reynolds 
$$Re = \frac{Deq \times u_w \times \rho_{air}}{\mu_{air}}$$

$\rho_v$  : Masse spécifique du produit en phase vapeur, à sa température d'ébullition (2.56 kg/m<sup>3</sup> pour essence)

$\rho_{air}$  : Masse volumique de l'air : 1,161 kg/m<sup>3</sup>

$\mu_{air}$  : viscosité dynamique de l'air ambiant ( $1.9 \times 10^{-5}$  (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>))

## 2.7 Facteur de vue cylindrique avec inclinaison de flamme

Le facteur de vue cylindrique pour une flamme inclinée, est comme pour le facteur de vue d'un cylindre vertical, fonction :

- du diamètre et de la longueur de la flamme,
- de la distance r entre la flamme et la cible,

mais, il est également fonction de l'angle  $\theta$  d'inclinaison de la flamme.

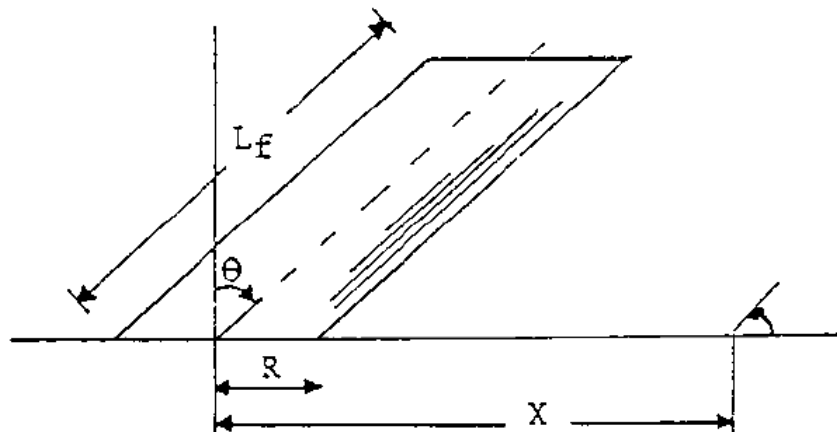


Figure 1 : géométrie de la Cible et de la flamme

Les formules associées à ce modèle et développées par Mudan sont présentées dans le guide bleu de l'UFIP ainsi que dans le Yellow book du TNO.

$$F_m = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$$

avec :

$$\pi F_v = -E \tan^{-1} D + E \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1+a \sin \theta)}{AB} \right] \tan^{-1} \left( \frac{AD}{B} \right)$$

$$\frac{\cos \theta}{C} + \left[ \tan^{-1} \left( \frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right]$$

$$\pi F_h = \tan^{-1} \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right]$$

$$\left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1+ab \sin \theta)}{AB} \right] \tan^{-1} \left( \frac{AD}{B} \right)$$

$$a = L/R \text{ (} L_b/R \text{ or } L_f/R \text{)} \quad (-)$$

$$b = X/R \quad (-)$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \times a \times (b+1) \times \sin \theta)} \quad (-)$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \times a \times (b-1) \times \sin \theta)}$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \times \cos^2 \theta)} \quad (-)$$

$$D = \sqrt{((b-1)/(b+1))} \quad (-)$$

$$E = (a \times \cos \theta)/(b - a \times \sin \theta) \quad (-)$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)} \quad (-)$$

## 2.8 Transmissivité atmosphérique

Le GTDLI (Groupe de Travail sur les Dépôts de Liquides Inflammables) a choisi de retenir la corrélation de Bagster pour quantifier le coefficient d'atténuation atmosphérique, (corrélation utilisée par le TNO, DNV (Phast) et l'UFIP - L'Union Française des Industries Pétrolières) avec :

- une humidité moyenne de 70%
- une température de 15°C

La transmissivité atmosphérique est calculée en un point situé à une distance  $r$  du centre de la source par la Corrélation de Bagster :

$$\Gamma(r) = 2,02 \times (P_{\text{VAP}(H_2O)} \times r)^{-0,09}$$

$$\text{avec } P_{\text{VAP}(H_2O)} = HR \times T_{\text{VAP}(H_2O)}$$

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

### 3 Caractéristiques du stockage et hypothèses retenues

#### 3.1 Implantation du stock

Les produits combustibles dans l'installation sont stockés dans la partie Sud-Est du site dans le bâtiment.

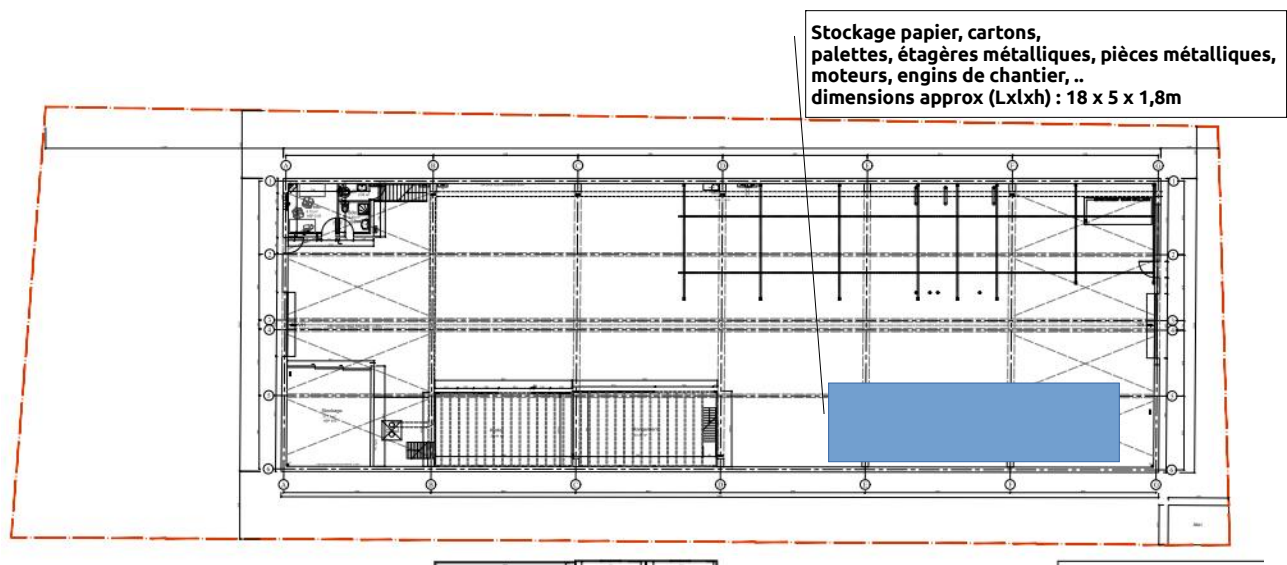


Figure 2: Implantation du stock de produit combustible  
Ce stockage se situe le long du mur sud (mur béton + bardage métallique).

#### 3.2 Caractérisation du stockage

Le stockage consiste en du stockage provisoire de :

- Stockage papier, cartons,
- quelques palettes,
- des étagères métalliques,
- des pièces métalliques,
- des moteurs et engins de chantier, ..

Les dimensions approximatives sont : (Lxlxh) : 18 x 5 x 1,8m

#### 3.3 Paramètres retenus

Considérant le type de produits stockés (présence importante de produits non combustible) et l'emplacement du stockage (contre le mur de façade Sud, limitant la circulation et les entrées d'air dans le stock), les valeurs suivantes ont été retenues :

- la vitesse de combustion surfacique retenue est :  $0.020 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  (La valeur moyenne pour un entrepôt de phytosanitaires a donc été considérée. )
- la valeur du flux surfacique des flammes retenue est :  $25 \text{ kW/m}^2$  (la valeur basse pour un entrepôt de produit inflammable du Guide de lecture de l'AM du 05/08/02)

### 3.4 Photos du stockage

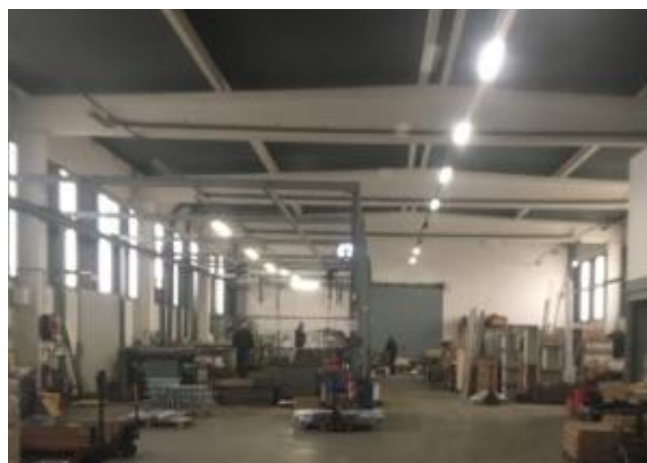


Figure 3: Vue du stock de produits combustibles

## 4 Résultats de la modélisations des effets thermiques

Les feuilles de calculs montrant l'évolution du flux thermique reçu avec la distance à la source sont présentées en Annexe 1.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous:

Scénario considéré	Distances par rapport au bord de la surface en feu ou les valeurs seuils des effets thermiques mentionnés dans l'Arrêté du 29 septembre 2005 sont atteintes					
	3 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	8 kW/m <sup>2</sup>	16 kW/m <sup>2</sup>	20 kW/m <sup>2</sup>	200 kW/m <sup>2</sup>
Incendie généralisé du stockage de matériaux	9,5	6,4	3,8	0.3	na	na

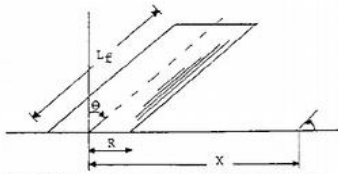
Tableau 4.1: Distances correspondant aux valeurs seuils réglementaires pour le flux thermique

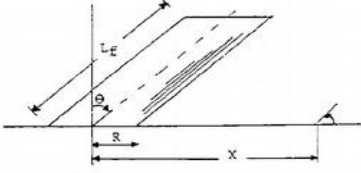
**NB :** les distances d'effet pour le seuil réglementaires sont calculés par rapport au bord de la surface de stockage considérée.

# ANNEXE 1

-

## Feuilles de calcul des effets thermiques

Données concernant le terme source				
Distance par rapport au bord	X	9,50	[m]	INERIS - OMEGA -16 - Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Surface du stockage Guide de lecture de l'AM du 05/08/02 (Entrepôts de stockage) AM et Guide UFIP
Distance Cible / Centre de la source	X	14,85	[m]	
Débit massique de combustion	m"	0,02	[kg/m²/s]	
Surface en feu considérée	S	90	[m²]	
Rayon de la surface équivalente	R	5,35	[m]	
Hauteur du stock de produit combustible	H <sub>stock</sub>	1,80	[m]	
Pouvoir émissif de la flamme	Φ <sub>o</sub>	25	[kW/m²]	
Vitesse du vent à 10 m d'altitude	Uw	5	[m/s]	
Calcul de la hauteur de flamme				
Formule de Thomas avec un vent de 5 m/s :				
Hauteur de la flamme (Thomas)	L <sub>thomas</sub>	6,06	[m]	$\frac{L_f}{D} = 55 \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0,67} \cdot u^{*-0,21}$
Hauteur de la flamme incluant H <sub>stock</sub>	L <sub>f</sub>	7,86	[m]	
Calcul de l'angle d'inclinaison de la flamme				
Corrélation de Welker and Sliepcevic (TNO - Yellow Book)				
$v = 61105,26 \text{ m}^2/\text{s}$ (Viscosité cinématique de l'air) $Re = 0,000876149$ $Fr_{10} = 0,238004175$				
$Fr_{10} = u_w^2 / (g \times D)$				
ainsi, on obtient:				
$\tan \theta / \cos \theta = 0,666 \times (Fr_{10})^{0,333} \times (Re)^{0,117}$				
$\Theta = \arcsin(((4 \times c^2 + 1)^{1/2} - 1) / (2 \times c))$				
alors:				
Inclinaison de la flamme	θ°	9	[°]	
Inclinaison de la flamme	θ	0,176527387	rad	
Calcul du facteur de vue				
				
$a = L/R \text{ (} L_f/R \text{ or } L_f/R \text{)}$ $b = X/R$ $A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \times a \times (b+1) \times \sin \theta)}$ $B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \times a \times (b-1) \times \sin \theta)}$ $C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \times \cos^2 \theta)}$ $D = \sqrt{((b-1)/(b+1))}$ $E = (a \times \cos \theta) / (b - a \times \sin \theta)$ $F = \sqrt{(b^2 - 1)}$ $F_v = 0,135672427$ $F_h = 0,054876007$ $F_{max} = \sqrt{(F_v^2 + F_h^2)}$				
$F_{max} = 14,635\%$				
Calcul de l'atténuation atmosphérique				
$\Gamma(r) = 2,02 \times (HR \times T_{vap(H_2O)} \times r)^{-0,09}$				
$\Gamma(r) = 83,927\%$				
Calcul du flux thermique reçu par une cible				
La formule générique du flux thermique émis par un feu de diamètre Deq et reçu par une cible située à r mètres du feu est : $F = \Phi_o \times F(r) \times \Gamma(r)$				
Φ <sub>o</sub> : Pouvoir émissif de la flamme qui correspond à la puissance rayonnée par unité de surface de la flamme. F(r) : facteur de vue, Facteur purement géométrique qui traduit l'énergie émise par un feu et reçue par une cible. Γ(r) : Transmissivité atmosphérique. Ce facteur permet d'intégrer l'influence de l'air sur le flux émis.				
$\Phi = 3,07 \text{ [kW/m}^2\text{]}$				

Données concernant le terme source				
Distance par rapport au bord	X	6,40	[m]	INERIS - OMEGA -16 - Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Surface du stockage Guide de lecture de l'AM du 05/08/02 (Entrepôts de stockage) AM et Guide UFIP
Distance Cible / Centre de la source	X	11,75	[m]	
Débit massique de combustion	m"	0,02	[kg/m²/s]	
Surface en feu considérée	S	90	[m²]	
Rayon de la surface équivalente	R	5,35	[m]	
Hauteur du stock de produit combustible	H <sub>stock</sub>	1,80	[m]	
Pouvoir émissif de la flamme	Φ <sub>o</sub>	25	[kW/m²]	
Vitesse du vent à 10 m d'altitude	U <sub>w</sub>	5	[m/s]	
Calcul de la hauteur de flamme				
Formule de Thomas avec un vent de 5 m/s :				
Hauteur de la flamme (Thomas)	L <sub>thomas</sub>	6,06	[m]	$\frac{L_f}{D} = 55 \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0,67} \cdot u^{*-0,21}$
Hauteur de la flamme incluant H <sub>stock</sub>	L <sub>f</sub>	7,86	[m]	
Calcul de l'angle d'inclinaison de la flamme				
Corrélation de Welker and Sliepcevich (TNO - Yellow Book)				
$v = 61105,26 \text{ m}^2/\text{s}$ (Viscosité cinématique de l'air) $Re = 0,000876149$ $Fr_{10} = 0,238004175$				
$Fr_{10} = u_w^2 / (g \times D)$				
ainsi, on obtient:				
$\tan \Theta / \cos \Theta = 0,666 \times (Fr_{10})^{0,333} \times (Re)^{0,117}$				
$\Theta = \arcsin(((4 \times c^2 + 1)^{1/2} - 1) / (2 \times c))$				
alors:				
Inclinaison de la flamme	Θ°	9	[°]	
Inclinaison de la flamme	Θ	0,176527387	rad	
Calcul du facteur de vue				
				
$a = L/R \text{ (} L_f/R \text{ or } L_f/R \text{)}$ $b = X/R$ $A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \times a \times (b+1) \times \sin \Theta)}$ $B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \times a \times (b-1) \times \sin \Theta)}$ $C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \times \cos^2 \Theta)}$ $D = \sqrt{((b-1)/(b+1))}$ $E = (a \times \cos \Theta) / (b - a \times \sin \Theta)$ $F = \sqrt{(b^2 - 1)}$ $F_v = 0,204791347$ $F_h = 0,108183187$ $F_{max} = \sqrt{(F_v^2 + F_h^2)}$				
<b>Fmax = 23,161%</b>				
Calcul de l'atténuation atmosphérique				
$\Gamma(r) = 2,02 \times (HR \times T_{vap(H_2O)} \times r)^{-0,09}$				
<b>Corrélation de Bagster</b> <b>Γ(r) = 85,714%</b>				
Calcul du flux thermique reçu par une cible				
La formule générique du flux thermique émis par un feu de diamètre Deq et reçu par une cible située à r mètres du feu est : $f = \Phi_o \times F(r) \times \Gamma(r)$				
Φ <sub>o</sub> : Pouvoir émissif de la flamme qui correspond à la puissance rayonnée par unité de surface de la flamme. F(r) : facteur de vue, Facteur purement géométrique qui traduit l'énergie émise par un feu et reçue par une cible. Γ(r) : Transmissivité atmosphérique. Ce facteur permet d'intégrer l'influence de l'air sur le flux émis.				
<b>Φ = 4,96 [kW/m²]</b>				

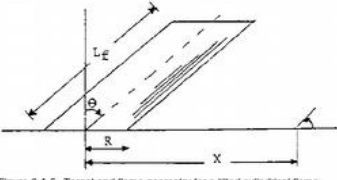
Données concernant le terme source			
Distance par rapport au bord	X	3,80	[m]
Distance Cible / Centre de la source	X	9,15	[m]
Débit massique de combustion	m"	0,02	[kg/m²/s]
Surface en feu considérée	S	90	[m²]
Rayon de la surface équivalente	R	5,35	[m]
Hauteur du stock de produit combustible	H <sub>stock</sub>	1,80	[m]
Pouvoir émissif de la flamme	Φ <sub>o</sub>	25	[kW/m²]
Vitesse du vent à 10 m d'altitude	U <sub>w</sub>	5	[m/s]

INERIS - OMEGA -16 - Toxicité et dispersion des fumées d'incendie  
Surface du stockage  
Guide de lecture de l'AM du 05/08/02 (Entrepôts de stockage)  
AM et Guide UFIP

Calcul de la hauteur de flamme			
Formule de Thomas avec un vent de 5 m/s :			
Hauteur de la flamme (Thomas)	L <sub>thomas</sub>	6,06	[m]
Hauteur de la flamme incluant H <sub>deck</sub>	L <sub>f</sub>	7,86	[m]

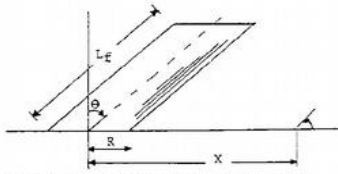
$$\frac{L_f}{D} = 55 \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0,67} \cdot u^{* - 0,21}$$

Calcul de l'angle d'inclinaison de la flamme			
Corrélation de Welker and Sliepcevich (TNO - Yellow Book)			
v = 61105,26 m²/s		(Viscosité cinématique de l'air)	
Re = 0,000876149			
Fr10 = 0,238004175			
ainsi, on obtient:			
C(θ) = tan θ / cos θ = 0,181200127			
alors:			
		$Fr_{10} = u_w^2 / (g \times D)$	
		$\tan \theta / \cos \theta = 0,666 \times (Fr_{10})^{0,333} \times (Re)^{0,117}$	
		$\Theta = \arcsin(((4 \times c^2 + 1)^{1/2} - 1) / (2 \times c))$	
Inclinaison de la flamme	θ°	9	[°]
Inclinaison de la flamme	θ	0,176527387	rad

Calcul du facteur de vue			
 <p>Figure 6.A.5 Target and flame geometry for a tilted cylindrical flame</p>			
a =	1,46802517	C =	√(1 + (b² - 1) × cos² θ)
b =	1,70978557	D =	√((b - 1)/(b + 1))
A =	2,846200096	E =	(a × cos θ) / (b - a × sin θ)
B =	1,514240405	F =	√(b² - 1)
C =	1,6923507	F <sub>v</sub> =	0,303709732
D =	0,511795096	F <sub>h</sub> =	0,198046496
E =	0,995336391	F <sub>max</sub> =	36,258%
F =	1,386854966		
		F <sub>max</sub> =	√(F <sub>v</sub> ² + F <sub>h</sub> ²)

Calcul de l'atténuation atmosphérique	
Γ(r) = 2,02 × (HR × T <sub>VAP(H2O)</sub> × r) <sup>-0,09</sup>	Corrélation de Bagster
Γ(r) =	87,664%

Calcul du flux thermique reçu par une cible	
La formule générique du flux thermique émis par un feu de diamètre Deq et reçu par une cible située à r mètres du feu est :	
f = Φ <sub>o</sub> × F(r) × Γ(r)	
Φ <sub>o</sub> : Pouvoir émissif de la flamme qui correspond à la puissance rayonnée par unité de surface de la flamme.	
F(r) : facteur de vue, facteur purement géométrique qui traduit l'énergie émise par un feu et reçue par une cible.	
Γ(r) : Transmissivité atmosphérique. Ce facteur permet d'intégrer l'influence de l'air sur le flux émis.	
Φ =	7,95 [kW/m²]

Données concernant le terme source				
Distance par rapport au bord	X	0,30	[m]	INERIS - OMEGA -16 - Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Surface du stockage Guide de lecture de l'AM du 05/08/02 (Entrepôts de stockage) AM et Guide UFIP
Distance Cible / Centre de la source	X	5,65	[m]	
Débit massique de combustion	m"	0,02	[kg/m²/s]	
Surface en feu considérée	S	90	[m²]	
Rayon de la surface équivalente	R	5,35	[m]	
Hauteur du stock de produit combustible	H <sub>stock</sub>	1,80	[m]	
Pouvoir émissif de la flamme	Φ <sub>o</sub>	25	[kW/m²]	
Vitesse du vent à 10 m d'altitude	Uw	5	[m/s]	
Calcul de la hauteur de flamme				
Formule de Thomas avec un vent de 5 m/s:				
Hauteur de la flamme (Thomas)	L <sub>thomas</sub>	6,06	[m]	$\frac{L_f}{D} = 55 \cdot \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_{air} \sqrt{gD}} \right)^{0,67} \cdot u^{*-0,21}$
Hauteur de la flamme incluant H <sub>acc</sub>	L <sub>f</sub>	7,86	[m]	
Calcul de l'angle d'inclinaison de la flamme				
Corrélation de Welker and Sliepcevic (TNO - Yellow Book)				
$v = 61105,26 \text{ m}^2/\text{s}$ (Viscosité cinématique de l'air) $Re = 0,000876149$ $Fr_{10} = 0,238004175$				
ainsi, on obtient:				
$C(\theta) = \tan \theta / \cos \theta = 0,181200127$ $\tan \theta / \cos \theta = 0,666 \times (Fr_{10})^{0,333} \times (Re)^{0,117}$ $\theta = \arcsin(((4 \times c^2 + 1)^{1/2} - 1)/(2 \times c))$				
alors:				
Inclinaison de la flamme	θ°	9	[°]	
Inclinaison de la flamme	θ	0,176527387	rad	
Calcul du facteur de vue				
				
$a = L/R \text{ (L}_p/R \text{ or } L_f/R)$ $b = X/R$ $A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \times a \times (b+1) \times \sin \theta)}$ $B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \times a \times (b-1) \times \sin \theta)}$ $C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \times \cos^2 \theta)}$ $D = \sqrt{((b-1)/(b+1))}$ $E = (a \times \cos \theta)/(b - a \times \sin \theta)$ $F = \sqrt{(b^2 - 1)}$ $F_v = 0,50284891$ $F_h = 0,480594847$ $F_{max} = \sqrt{(F_v^2 + F_h^2)}$				
Fmax = 69,558%				
Calcul de l'atténuation atmosphérique				
$\Gamma(r) = 2,02 \times (HR \times T_{vap(H_2O)} \times r)^{-0,09}$ $\Gamma(r) = 91,549\%$				
Corrélation de Bagster				
Calcul du flux thermique reçu par une cible				
La formule générique du flux thermique émis par un feu de diamètre Deq et reçu par une cible située à r mètres du feu est :				
$f = \Phi_o \times F(r) \times \Gamma(r)$				
Φ <sub>o</sub> : Pouvoir émissif de la flamme qui correspond à la puissance rayonnée par unité de surface de la flamme.				
F(r) : facteur de vue, Facteur purement géométrique qui traduit l'énergie émise par un feu et reçue par une cible.				
Γ(r) : Transmissivité atmosphérique. Ce facteur permet d'intégrer l'influence de l'air sur le flux émis.				
Φ = 15,92 [kW/m²]				

## ANNEXE 2

-

### Représentation cartographique des zones d'effets

