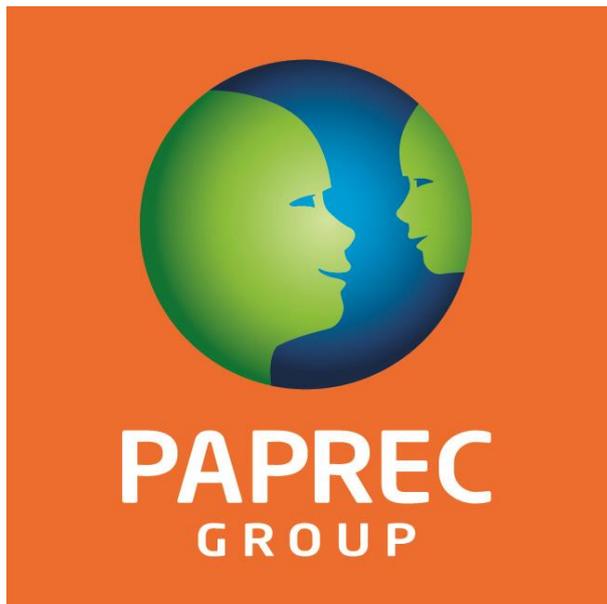




MODELISATION DES FLUX THERMIQUES



COVED ENVIRONNEMENT AGENCE DE SENS

RECYCLER POUR DEMAIN

PAPREC GROUP - 7, rue du Docteur Lancereaux - 75 008 PARIS
Tél. : (33) 01 42 99 43 10 - Fax : (33) 01 42 99 43 31 - www.paprec.com

Siège social : 7, rue du Docteur Lancereaux - 75 008 Paris - SAS au capital de 124 269 550 € - 489 455 360 RCS Paris - Code NAF : 6420 Z - N° Intracommunautaire : FR 74 489 455 360

Informations sur le rapport

Intitulé de l'étude :	Modélisation des flux thermiques
Dénomination de la société :	COVED Environnement
Dénomination du site :	Agence de Sens
Adresse de l'établissement :	Z.I des Sablons – 6 Rue de la Fosse aux Saumons 89 100 SENS
Interlocuteur :	M. Lucas LUPPI Ingénieur environnement
Téléphone :	01 43 11 08 34
Email :	lucas.luppi@paprec.com

Gestion des révisions

Indice	Date	Emetteur	Approbateur
0	28/08/2023	Lucas LUPPI Ingénieur environnement	Louis DECHERF Responsable de centre

SOMMAIRE

1. Introduction	6
2. Evaluation des conséquences d'un incendie sur les stockages	6
2.1 Produits mis en œuvre	6
2.2 Choix des scénarios	8
2.3 Choix du logiciel	9
3. Méthodologie de calcul	10
3.1 Valeurs de référence relatives aux seuils d'effet thermique	10
3.2 Equation générale	11
3.3 Flux émis en surface de flamme (radiance)	11
3.4 Hauteur de flamme	13
3.5 Diamètre équivalent	13
3.6 Estimation du taux massique surfacique de combustion m (kg/m ² .s)	14
3.7 Coefficient de transmission atmosphérique	15
3.8 Facteur de configuration	15
4. Résultats des simulations	16
4.1 Scénario 1 : Incendie généralisé des ilots 1 à 4	16
4.1.1 Rappel des hypothèses	16
4.1.2 Résultats	17
4.2 Scénario 2 : Incendie généralisé des ilots 5 à 10	19
4.2.1 Rappel des hypothèses	19
4.2.2 Résultats	20
4.3 Scénario 3 : Incendie généralisé des ilots 11 à 14	22
4.3.1 Rappel des hypothèses	22
4.3.2 Résultats	23
4.4 Scénario 4 : Incendie généralisé des ilots 15 et 16	25
4.4.1 Rappel des hypothèses	25
4.4.2 Résultats	25
4.5 Scénario 5 : Incendie généralisé des ilots 17 à 22	27
4.5.1 Rappel des hypothèses	27
4.5.2 Résultats	28
4.6 Scénario 6 : Incendie de l'ilot 23	30
4.6.1 Rappel des hypothèses	30
4.6.2 Résultats	30
5. Conclusion	32

FIGURES

Figure 1 : Plan des stockages du site de Sens.....	7
Figure 2 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 1	16
Figure 3 : Flux thermiques dans le scénario 1	17
Figure 4 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 2	19
Figure 5 : Flux thermiques dans le scénario 2.....	21
Figure 6 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 3	22
Figure 7 : Flux thermiques dans le scénario 3.....	23
Figure 8 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 4	25
Figure 9 : Flux thermiques dans le scénario 4.....	26
Figure 10 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 5	27
Figure 11 : Flux thermiques dans le scénario 5.....	28
Figure 12 : Localisation de l'îlot modélisé dans le scénario 6.....	30
Figure 13 : Flux thermiques dans le scénario 6.....	31

TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau des stocks du site de Sens	8
Tableau 2 : Valeurs de référence relatives au seuil d'effet thermique	10
Tableau 3 : Emissivités des matériaux	12
Tableau 4 : Taux de combustion surfacique des matériaux	14
Tableau 5 : Caractéristiques des ilots du scénario 1	16
Tableau 6 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 1	17
Tableau 7 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 1	18
Tableau 8 : Caractéristiques des ilots du scénario 2	19
Tableau 9 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 2	20
Tableau 10 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 2	21
Tableau 11 : Caractéristiques des ilots du scénario 3	22
Tableau 12 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 3	23
Tableau 13 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 3	24
Tableau 14 : Caractéristiques des ilots du scénario 4	25
Tableau 15 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 4	25
Tableau 16 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 4	26
Tableau 17 : Caractéristiques des ilots du scénario 5	27
Tableau 18 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 5	28
Tableau 19 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 5	29
Tableau 20 : Caractéristiques de l'îlot du scénario 6	30
Tableau 21 : Hauteur de flamme de l'îlot du scénario 6	30
Tableau 22 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 6	31

Notations

Symbole	Signification	Unité de mesure
Φ	Radiation moyenne reçue par une cible	kW/m ²
Φ_0	Radiation émise à la surface de la flamme (pouvoir émissif, émittance)	kW/m ²
τ	Transmission atmosphérique ou coefficient d'absorption dans l'atmosphère	[-]
F	Facteur de configuration, appelé également facteur de vue	[-]
m''	Taux de combustion	(kg/s)
FR	fraction radiative	[-]
ΔH_c	Chaleur de combustion	[-]
S_f	Surface rayonnante de la flamme	m ²
A	Surface de combustible solide	m ²
V_p	Vitesse de régression	m/s
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques	
TNO	Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée	
H	Hauteur moyenne de la flamme	m
D_{eq}	Diamètre équivalent de la surface impliquée dans l'incendie	m
ρ_0	Densité de l'air ambiant	kg/m ³
\dot{m}	Débit ou taux massique surfacique de combustion	kg /m ² .s ¹
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
L	Longueur de la zone de feu	m
l	Largeur de la zone de feu	m
\dot{m}_i	Taux massique surfacique de combustion du combustible i	kg/m ² .s
x_i	Fraction pondérale du combustible i impliqué dans l'incendie	[-]
PV	pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air	Pa
x	distance du point d'observation au front de flamme	[m]

1. Introduction

L'objectif de la présente étude est d'analyser les effets sur l'homme et l'environnement en termes de flux thermiques, en cas d'incendie des îlots de stockage avec détermination des mesures compensatoires associées si nécessaire.

2. Evaluation des conséquences d'un incendie sur les stockages

2.1 Produits mis en œuvre

La figure ci-dessous montre le plan des stockages susceptibles d'être présents sur le site :

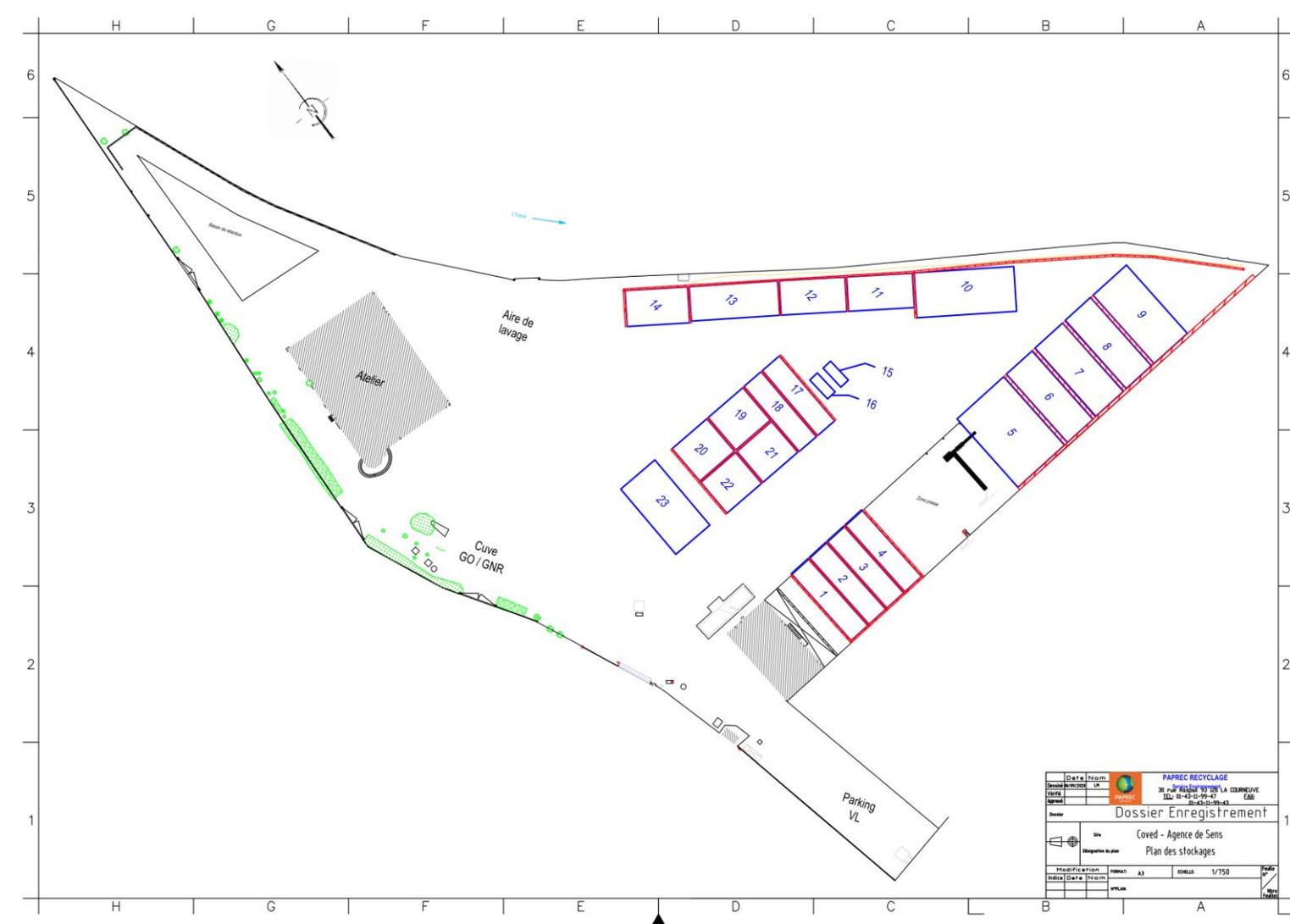


Figure 1 : Plan des stockages du site de Sens

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des différents ilots de stockages :

N° ilot	Rubrique ICPE	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)
1	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	100	2	200
2	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	100	2	200
3	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	100	2	200
4	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	100	2	200
5	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	285,6	3,4	971,0
6	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	157,1	3,4	534,1
7	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	169,3	3,4	575,7
8	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	155,0	3,4	527,1
9	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	204,0	2,3	469,2
10	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	223,5	2,3	514,0
11	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	112,4	2,3	258,6
12	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	112,4	2,3	258,6
13	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	151,5	2,3	348,4
14	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	112,0	2,3	257,6
15	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	13,3	2,2	29,3
16	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	13,3	2,2	29,3
17	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	95,0	2,3	218,5
18	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	95,0	2,3	218,5
19	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	96,9	2,3	222,9
20	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	96,9	2,3	222,9
21	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	91,8	2,3	211,1
22	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	91,8	2,3	211,1
23	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	190,0	2,3	437,0

Tableau 1 : Tableau des stocks du site de Sens

2.2 Choix des scénarios

Sur les sites de gestion de déchets, le plan des stockages est susceptible d'évoluer régulièrement en fonction des consignes d'exploitation, des marchés etc... Afin d'éviter de revoir le plan à chaque modification de catégorie de déchets stockés, le plan a été établi en prenant en compte les rubriques ICPE et non pas les catégories de déchets. Cette approche est cohérente en termes de gestion des risques notamment pour les déchets non dangereux. En effet, les rubriques 2713, 2714 et 2716 concernent des déchets non dangereux présentant des risques similaires. D'ailleurs, l'arrêté ministériel de prescriptions générales applicable à ces rubriques est commun aux trois rubriques 2713, 2714 et 2716 ainsi qu'à la rubrique 2711. A ce titre, les modélisations des flux thermiques des ilots de stockage de déchets non dangereux ont été réalisées en prenant la situation la plus majorante à savoir le stockage de plastiques polyéthylène (PE). Le raisonnement est similaire pour les déchets dangereux. Les modélisations des flux thermiques des ilots de stockage de déchets dangereux ont été réalisées en prenant la situation la plus majorante à savoir le stockage d'acétone.

Cela permet de démontrer que peu importe la catégorie de déchets stockée, le risque incendie est maîtrisé.

Dans le cadre de cette étude, les 7 scénarii pris en compte sont :

- Scénario 1 : Incendie généralisé des ilots 1 à 4
- Scénario 2 : Incendie généralisé des ilots 5 à 10
- Scénario 4 : Incendie généralisé des ilots 11 à 14
- Scénario 5 : Incendie généralisé des ilots 15 à 18
- Scénario 6 : Incendie généralisé des ilots 19 à 23.

Avant d'arriver à ce scénario majeur, rappelons tout d'abord qu'en période d'activité, un début d'incendie peut être maîtrisé par l'intervention du personnel à l'aide des moyens d'extinctions.

L'évaluation du niveau de risque réalisée ci-après suppose qu'il n'y ait aucune intervention des services d'incendie et de secours qui permet en réalité de réduire les flux thermiques émis par l'incendie, ce qui est extrêmement majorant.

2.3 Choix du logiciel

Le logiciel FLUMILOG, développé en partenariat entre l'INERIS, le CTICM et le CNPP en association également avec l'IRSN et EFECTIS France, a été conçu pour les activités type entrepôts logistiques où les stockages sont homogènes contrairement aux stockages présents sur les sites de gestion des déchets. Si le logiciel FLUMILOG permet aisément de reproduire la configuration des stockages à l'air libre, il est, en revanche plus complexe voire quasi-impossible d'y reproduire la configuration des stockages sous bâtiment (nombre de cellules limité à trois, largeur des allées entre les ilots limités à 20 m, ...).

Ainsi, nous avons fait le choix d'utiliser l'outil FLUIDYN décrit ci-dessous, qui permet de reproduire une configuration se rapprochant le mieux de la configuration réelle. Pour information, il est communément admis que les résultats issus du logiciel FLUIDYN sont plus majorants que ceux du logiciel FLUMILOG.

La réalisation de cette étude par le logiciel FLUIDYN reste conforme à l'article 5 de l'arrêté du 06 juin 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations soumises à enregistrement sous les rubriques 2711, 2713, 2714 et 2716 qui stipule que « les distances sont au minimum soit celles calculées par la méthode FLUMILOG (...) soit celles calculées par des études spécifiques ».

3. Méthodologie de calcul

Le calcul des flux thermiques est effectué à l'aide du logiciel **FLUIDYN-PANFIRE**. Il s'agit d'un logiciel de mécanique des fluides tridimensionnel, développé par la société **FLUIDYN**, pour l'évaluation des impacts des incendies, de stockages de produits solides et liquides, sur l'environnement. Le logiciel **FLUIDYN-PANFIRE** calcule en 3D les flux thermiques engendrés par l'incendie de matériaux entreposés. En effet, l'utilisation des modèles analytiques et empiriques n'est plus possible pour approcher des scénarii présentant des géométries complexes incluant éventuellement des éléments coupe-feu et de nombreux produits de stockages différents, et nécessitant des visualisations des résultats dans l'espace.

Le logiciel **FLUIDYN-PANFIRE** propose plusieurs modèles pour calculer les flux thermiques, afin de pouvoir s'adapter à tous les types de scénarii proposés : feux solides en racks ou en vrac, feux de nappes en cuvette de rétention, feux à l'intérieur de bâtiments. Le logiciel tient également compte de l'effet d'ombre des murs coupe-feu, des sprinklers et des rideaux d'eau et de la topographie.

3.1 Valeurs de référence relatives aux seuils d'effet thermique

Sur l'homme, l'impact du rayonnement thermique se caractérise par des brûlures. Celles-ci qui peuvent aller du simple érythème à la brûlure du troisième degré, sont plus ou moins graves selon la surface de peau lésée, la localisation ou l'âge du blessé.

Sur les matériaux, le rayonnement thermique va avoir des incidences variables selon la nature du matériau, son pouvoir d'absorption, son aptitude à former des produits volatils et inflammables lorsqu'il est chauffé et la présence ou non de flammes qui pourraient enflammer ces vapeurs. Les déchets combustibles vont, en fonction de la durée d'exposition, être pro lysés ou s'enflammer. Les structures non combustibles (verre, étal, etc...) vont subir une dégradation mécanique, allant de la simple déformation à la rupture.

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

	Valeurs	Commentaires
<i>Effets sur l'homme</i>	8 kW/m ²	Seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone de dangers très graves pour la vie humaine
	5 kW/m ²	Seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone de dangers graves pour la vie humaine
	3 kW/m ²	Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine (brûlure du premier degré au bout d'environ une minute et douleur en une vingtaine de secondes)
<i>Effets sur les structures</i>	200 kW/m ²	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes
	20 kW/m ²	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton
	16 kW/m ²	Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
	8 kW/m ²	Seuil des effets domino correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures
	5 kW/m ²	Seuil de destruction de vitres significatives

Tableau 2 : Valeurs de référence relatives au seuil d'effet thermique

Les critères pour la détermination des zones de dangers thermiques et l'analyse des effets dominos sont donc le flux de 8 kW/m² (effet dominos) et le flux de 5 kW/m² et 3 kW/m² (zone de dangers effets sur l'homme).

3.2 Equation générale

Le logiciel **PANFIRE-FLUIDYN** utilise un modèle de type flamme solide. La flamme est assimilée à un volume opaque de géométrie simple (cylindre, parallélépipède rectangle...) dont les surfaces rayonnent uniformément.

La flamme est supposée rayonnée uniformément sur toute sa surface, ce qui revient à considérer une température de flamme et une composition homogène sur toute la hauteur de la flamme.

L'équation générale pour calculer le flux thermique reçu par une cible peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \tau \cdot F$$

avec :

Φ = Radiation moyenne reçue par une cible en kW/m² à la distance x de la source

Φ_0 = Radiation émise à la surface de la flamme en kW/m²

τ = Transmission atmosphérique (sans dimension)

F = Facteur de configuration (sans dimension, appelé également facteur de vue)

Pour le calcul des flux thermiques, trois données importantes doivent ainsi être déterminées :

- Le facteur de configuration appelé également facteur de vue, ce facteur traduit en définitive l'angle solide sous lequel la cible perçoit la flamme. Les facteurs de vue sont basés sur la méthodologie de l'UFIP (Guide méthodologique pour la réalisation des études de dangers (*Guide Bleu*) édité par le GESIP en juillet 2002), qui a été expertisé par l'INERIS.
- Le pouvoir émissif de la flamme, soit la puissance rayonnée par unité de surface de flamme,
- Le coefficient d'atténuation atmosphérique, c'est-à-dire la fraction du rayonnement thermique émis par la flamme absorbée par l'atmosphère.

Pour le calcul de ces paramètres, il faut, au préalable, les caractéristiques du feu qui sont :

- la hauteur de la flamme,
- la vitesse de combustion (ou taux massique surfacique de combustion).

3.3 Flux émis en surface de flamme (radiance)

Le « flux émis en surface de la flamme » est également appelé « émissivité », « pouvoir émissif » ou « émittance ». Il est calculé par la relation suivante :

$$\Phi_0 = \frac{m' \times FR \times \Delta H_c}{S_f}$$

où :

- Φ_0 : pouvoir émissif d'une flamme
- m' : taux de combustion (kg/s)
- FR: fraction radiative (-)

- ΔH_c : Chaleur de combustion (J/kg)
- S_f : surface rayonnante de la flamme (m²)

Remarque :

Le taux de combustion m'' pour les feux solides est donnée par la formule :

$$m'' = A \rho V_p$$

où

A : surface de combustible solide (m²)

ρ : densité du combustible solide (kg/m³)

V_p : vitesse de régression (m/s). Elle dépend du type de combustible

En pratique, cette formule s'avère souvent difficile à appliquer pour de multiples raisons (température de la flamme difficile à mesurer, vitesse de régression difficile à mesurer, présence de fumées jouant un rôle d'écran). C'est pourquoi, pour estimer le pouvoir émissif des flammes, le logiciel **FLUIDYN-PANFIRE** permet en outre :

- Soit d'utiliser les valeurs expérimentales disponibles dans la littérature (TNO, INERIS),
- Soit décider a priori d'un pouvoir émissif moyenné sur toute la hauteur des flammes, le plus souvent pris aux alentours de 30 kW/m².

Dans le cadre de la présente étude, nous avons pris comme valeur de la radiation émise par la flamme les valeurs expérimentales disponibles dans la littérature (TNO, INERIS) ou par défaut la valeur de 30kW/m² en cas où il n'existe pas de valeurs publiées dans la littérature.

A titre indicatif, les émissivités de composés courants décrites dans la littérature sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Matériaux	Radiance (kW/m ²)	Source
Aérosols	100	INERIS - Modélisation d'un incendie affectant un stockage de générateurs d'aérosols - Sept. 2002
Bois, papier, cartons	23,8	DRYSDALE - <i>An introduction to fire dynamics</i> - 2nd edition
Ethanol	12	INERIS - <i>TE EDD entrepôt FM LOGISTIC</i> - Juillet 2004
Gazole	29	INERIS - <i>TE EDD entrepôt FM LOGISTIC</i> - Juillet 2004
Cosmétiques	30	INERIS - <i>TE EDD entrepôt de stockage de produits cosmétiques - Société CENTREX</i> - Sept. 1999
Polyéthylène	30	INERIS - <i>TE EDD entrepôt Katoen Natie Berre Logistique</i> - Mars 02
Polypropylène	28	DRYSDALE - <i>An introduction to fire dynamics</i> - 2nd edition
PVC	30	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - Third Edition
Produits alimentaires secs	20	INERIS - <i>TE EDD PRD distripole de Thionville</i> - Mars 2001

Tableau 3 : Emissivités des matériaux

A noter par ailleurs que ces valeurs sont issues d'essais sur des petites quantités ou surfaces en feu. Dans le cas d'un feu réel mettant en jeu des surfaces de plusieurs milliers de m², les observations montrent que le flux thermique est réduit en raison de l'absorption du rayonnement par les fumées. Par ailleurs, la cinétique de combustion est limitée par l'apport d'oxygène qui ne peut se faire que sur le périmètre de la surface en feu. On peut dès lors considérer que la valeur retenue est majorante.

3.4 Hauteur de flamme

La hauteur de flamme pour un feu est fonction :

- du taux de combustion
- de la surface du feu
- de la densité de l'air ambiant.

Le logiciel **FLUIDYN-PANFIRE** permet l'utilisation de plusieurs formulations permettant le calcul de la hauteur de flamme. Dans le cadre de cette étude, la formulation de Thomas a été retenue pour les différents stockages.

$$\frac{H}{D_{eq}} = 42 \left(\frac{\dot{m}}{\rho_0 \sqrt{g \cdot D_{eq}}} \right)^{0.61}$$

- avec
- H = Hauteur moyenne de flamme en mètre
 - D_{eq} = Diamètre équivalent de la surface impliquée dans l'incendie (foyer actif) en mètre
 - ρ_0 = Densité de l'air ambiant en kg.m⁻³ (environ 1,22 kg/m³ à 20°C)
 - \dot{m} = Débit masse surfacique en kg.m⁻².s⁻¹
 - g = Accélération de la pesanteur en m.s⁻² ($g = 9.81$)

Afin de calculer la hauteur de flamme, il est donc nécessaire de connaître le diamètre équivalent.

Remarque :

Les résultats obtenus concernant les hauteurs des flammes seront présentés pour chaque scénario.

3.5 Diamètre équivalent

Le logiciel PANFIRE-FLUIDYN permet de calculer automatiquement le diamètre équivalent de la flamme selon la formule suivante :

$$D_{eq} = \frac{4 \times S}{2 \times (L + l)}$$

- où
- D_{eq} : diamètre équivalent [m]
 - S : surface au sol ou de la cuvette de rétention [m²]
 - L : longueur de la zone de feu [m]
 - l : largeur de la zone de feu [m]

Remarque :

Le diamètre équivalent, calculé de cette manière, peut ne pas être représentatif des caractéristiques du feu dans le cas de stockages allongés (Longueur/largeur > 5). Pour cette configuration, le diamètre équivalent du feu est égal à la plus petite largeur.

3.6 Estimation du taux massique surfacique de combustion \ddot{m} (kg/m².s)

Le débit massique surfacique (également appelée taux de combustion surfacique), noté \ddot{m} , est un paramètre nécessaire au calcul de la hauteur de flamme. Elle représente la quantité de combustible participant à l'incendie par unité de temps et de surface combustible au sol.

Le débit massique surfacique d'un composé solide donné n'est pas une constante ; elle dépend du renouvellement de l'air au voisinage de la flamme et des échanges thermiques avec le milieu ambiant.

Le taux de combustion surfacique d'un mélange de produits combustibles est obtenu à partir de la somme pondérée des taux massiques surfaciques de combustion de chacun des produits impliqués :

$$\ddot{m} = \sum x_i \ddot{m}_i$$

avec :

x_i : fraction pondéral du combustible i impliqué dans l'incendie (sans dimension)

$$x_i = \frac{\ddot{m}_i}{\text{masse totale de substances combustibles stockées}}$$

\ddot{m}_i : taux massique surfacique de combustion du combustible i (kg/m².s)

En outre, lorsque les produits combustibles sont entreposés au sol et de façon espacée, mais pas suffisamment pour garantir la non propagation du feu, le taux massique surfacique de combustion est pondéré par un facteur correspondant au pourcentage de surface effectivement occupée par les combustibles.

Les taux de combustion surfacique de nombreux composés courants ont été déterminés expérimentalement par différents organismes et sont décrits dans la littérature. Le tableau ci-dessous présente à titre indicatif les caractéristiques de certains produits génériques :

Matériaux	Taux de combustion surfacique (g/m ² .s)	Source
Acétone	41	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - 2nd Edition
Bois, papier, carton	14	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - Third Edition
Essence	48	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - 2nd Edition
Ethanol	15	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - 2nd Edition
Pneu	16	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - 2nd Edition
Ether de pétrole	48	INERIS - <i>Etude de scénarios dangereux en stations-service</i> - Oct. 02
Polyéthylène	26	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - Third Edition
Polypropylène	18	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - 2nd Edition
PVC	16	SFPE - <i>Handbook of Fire Protection Engineering</i> - Third Edition

Tableau 4 : Taux de combustion surfacique des matériaux

Assez peu de données sont disponibles dans la littérature au sujet des taux de combustion surfaciques et les flux émis par les flammes lors d'incendie de matériaux solides.

1. Au vu de la surface importante mise en jeu, nous précisons que cette approche est théorique et ne prend pas en compte le fait que le feu progresse et se déplace horizontalement dans le bâtiment. Il est en effet peu probable que l'incendie soit à son régime maximal simultanément sur toute la surface de la cellule considérée. Le calcul réalisé est donc majorant.

2. La cinétique d'un incendie de matière combustible solide est beaucoup plus lente que celle d'un incendie de liquides inflammables. Les effets de rayonnement thermique qui sont indiqués ci-après, pourraient éventuellement être constatés ½ h à 1 h après la détection de l'incendie. Ce décalage entre détection et constat des effets laisse à l'entreprise et aux personnels de secours le moyen de réagir et de placer la zone en situation de sécurité.

3.7 Coefficient de transmission atmosphérique

La radiation de la flamme vers l'environnement est partiellement atténuée tout au long de son parcours dans l'air. Ceci est le fait de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et des poussières qui absorbent et dissipent une partie des radiations émises. La vapeur d'eau est le principal facteur d'absorption.

Le coefficient de transmission atmosphérique (τ) correspond donc à la fraction de chaleur transmise à l'atmosphère.

Le logiciel permet de déterminer l'absorption atmosphérique du flux rayonné par une relation de la forme (Corrélation de Bagster):

$$\tau = 2.02 * (PV * x)^{-0.09}$$

où	τ :	coefficient d'absorption dans l'atmosphère	[-]
	PV :	pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air	[Pa]
	x :	distance du point d'observation au front de flamme	[m]

Le logiciel permet de calculer ce facteur par un simple renseignement du taux d'humidité de l'air ambiant.

3.8 Facteur de configuration

Le facteur de vue F, fonction de l'angle solide sous lequel la cible reçoit le rayonnement, a été évalué selon la méthodologie développée la méthodologie de l'UFIP (Guide méthodologique pour la réalisation des études de dangers (*Guide Bleu*) édité par le GESIP en juillet 2002), qui a été expertisé par l'INERIS.

Dans les calculs, la cible qui reçoit le flux est supposée verticale et placée soit :

- Pour les effets sur l'homme, à une hauteur de 1,5 m par rapport au sol,

Pour les effets sur les structures (effets dominos), à une hauteur égale à la hauteur des équipements à proximité, susceptibles d'être impactés (hauteur maximale de stockage).

4. Résultats des simulations

4.1 Scénario 1 : Incendie généralisé des ilots 1 à 4

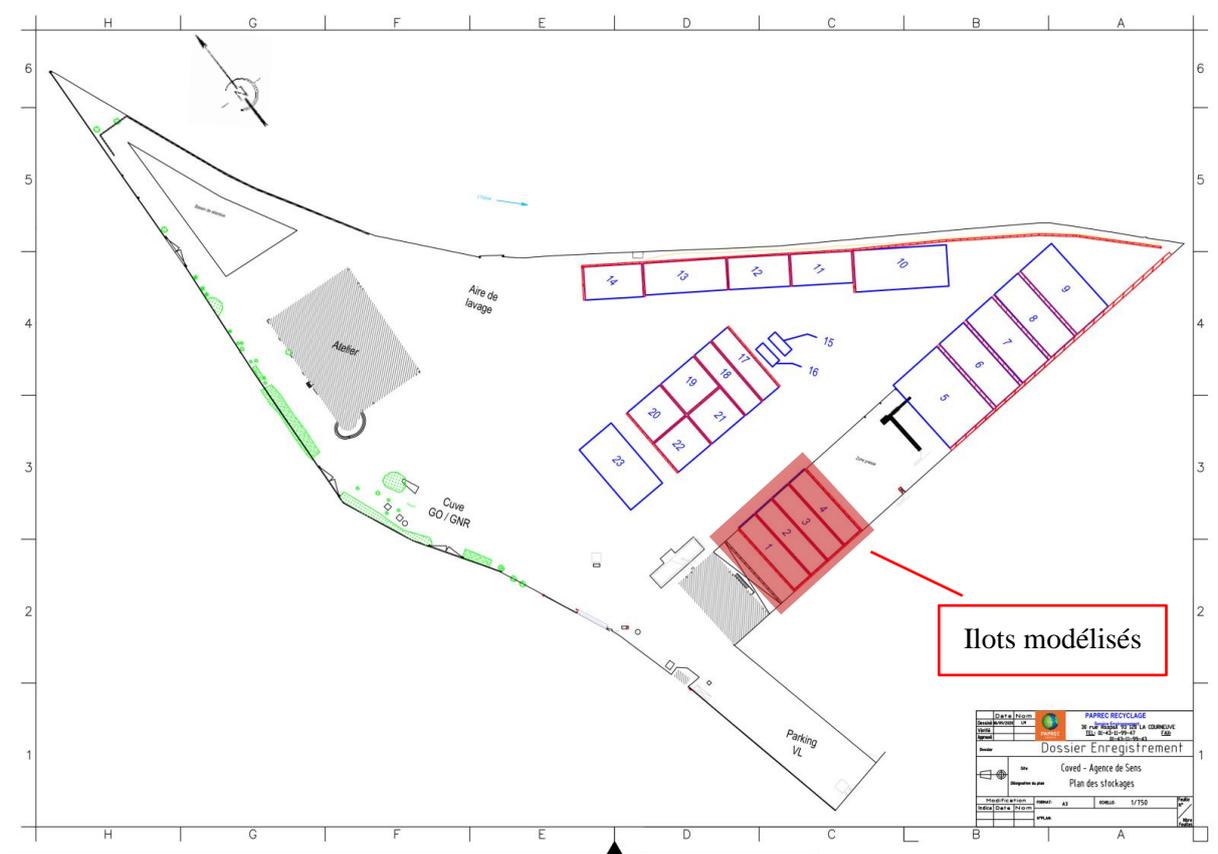


Figure 2 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 1

4.1.1 Rappel des hypothèses

Le tableau suivant montre les caractéristiques de ces ilots de stockage :

Rubriques	N° Ilot	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Radiance (W/m ²)
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	1	100	2	200	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	2	100	2	200	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	3	100	2	200	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	4	100	2	200	26	30 000

Tableau 5 : Caractéristiques des ilots du scénario 1

4.1.2 Résultats

La hauteur de flamme de l'ilot de stockage a été déterminée selon la corrélation de THOMAS :

N° Ilot	Rubriques	Hauteur Flamme selon corrélation de Thomas (m)
1	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	8,19 m écrêtée à 5 m*
2	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	8,19 m écrêtée à 5 m*
3	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	8,19 m écrêtée à 5 m*
4	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	8,19 m écrêtée à 5 m*

* D'après la méthode de calcul Fluidyn, et plus particulièrement d'après le rapport intitulé « Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôts – Partie A », la hauteur de flamme engendrée par un incendie ne peut pas être supérieure à 2,5 fois la hauteur du stockage en feu.

Tableau 6 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 1

Le plan suivant montre une représentation graphique des différents flux étudiés, à savoir les flux de 3, 5 et 8 kW/m² :

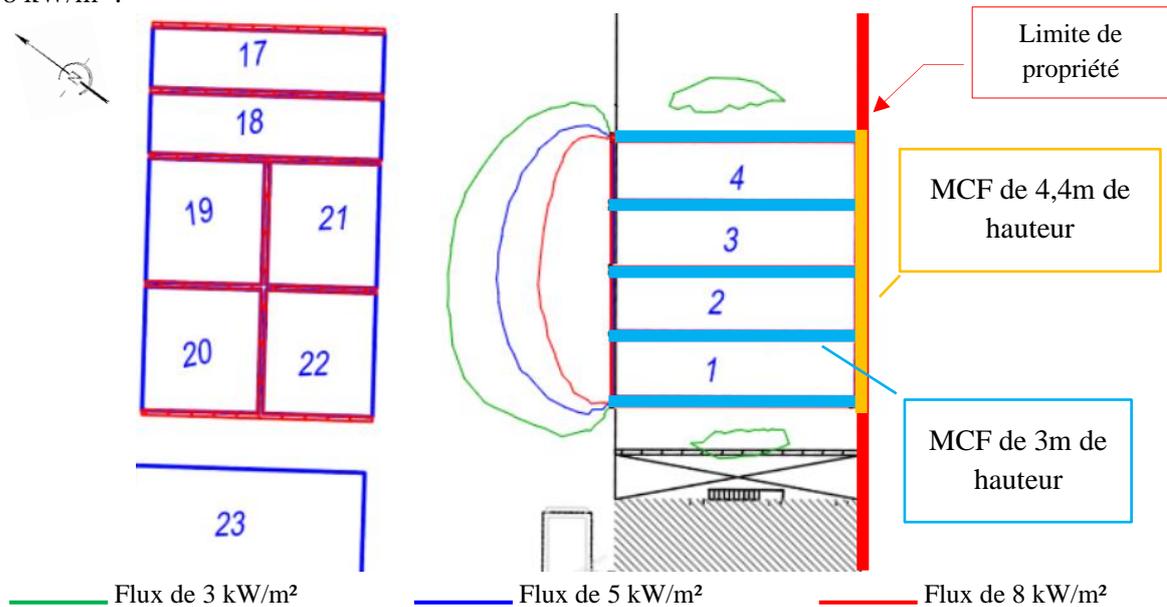


Figure 3 : Flux thermiques dans le scénario 1

Le tableau suivant montre les distances maximales atteintes par les différents flux à partir des 4 faces des îlots de stockage :

Scénario 1		Distances maximales atteintes pour chaque face du stockage (m)			
Faces		Nord	Sud	Est	Ouest
Flux thermiques reçues	8 kW/m ²	2,45	0	0	0
	5 kW/m ²	3,30	0	0	0
	3 kW/m ²	8,13	0	1,17	4,10

Tableau 7 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 1

Commentaires :

- Les flux de 3 kW/m², 5 kW/m² et 8 kW/m² ne sortent pas des limites de propriété.
- Le flux de 8 kW/m² ne touche aucun îlot de stockage. Il n'a donc pas d'effet domino.

Il n'y a donc pas nécessité de mettre en place des mesures compensatoires.

4.2 Scénario 2 : Incendie généralisé des ilots 5 à 10

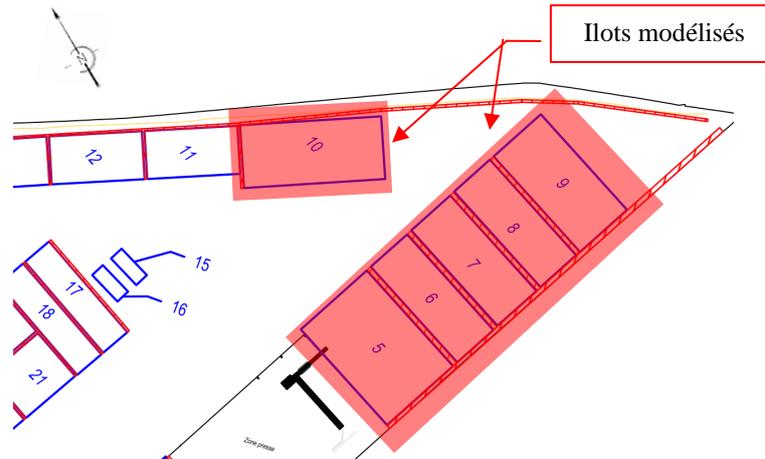


Figure 4 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 2

4.2.1 Rappel des hypothèses

Le tableau suivant montre les caractéristiques de ces ilots de stockage :

Rubriques	N° Ilot	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Radiance (W/m ²)
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	5	285,6	3,4	971,0	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	6	157,08	3,4	534,1	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	7	169,32	3,4	575,7	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	8	155,04	3,4	527,1	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	9	155,04	3,4	469,2	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	10	223,5	2,3	514,05	26	30 000

Tableau 8 : Caractéristiques des ilots du scénario 2

4.2.2 Résultats

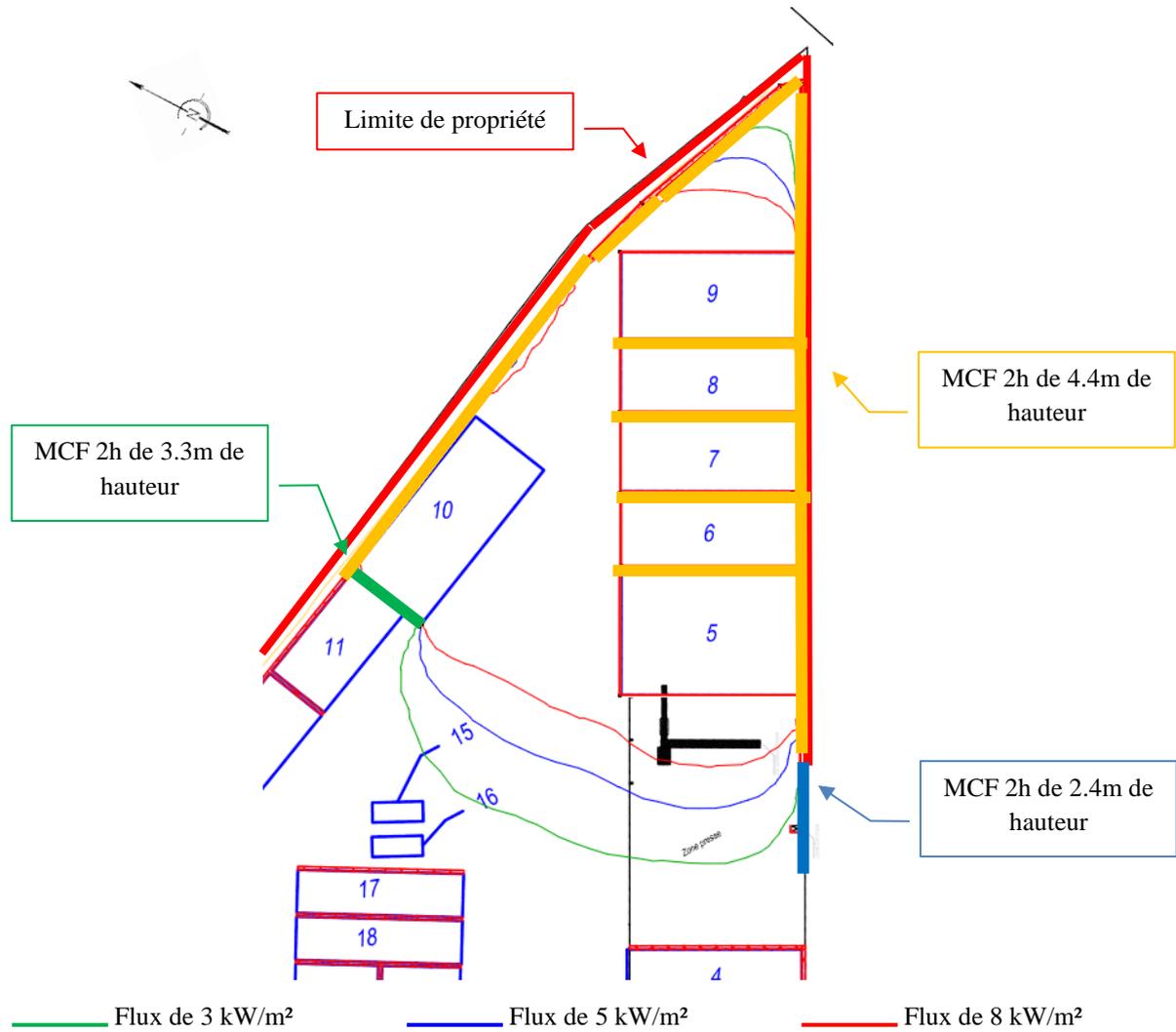
La hauteur de flamme des ilots de stockage a été déterminée selon la corrélation de THOMAS :

N° Ilot	Rubriques	Hauteur Flamme selon corrélation de Thomas (m)
5	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	17,6 m écrêtée à 8,5 m*
6	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	11,8 m écrêtée à 8,5 m*
7	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	14,6 m écrêtée à 8,5 m*
8	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	11,7 m écrêtée à 8,5 m*
9	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	14,6 m écrêtée à 5,75 m*
10	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	14,8 m écrêtée à 5,75 m*

* D'après la méthode de calcul Fluidyn, et plus particulièrement d'après le rapport intitulé « Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôts – Partie A », la hauteur de flamme engendrée par un incendie ne peut pas être supérieure à 2,5 fois la hauteur du stockage en feu.

Tableau 9 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 2

Le plan suivant montre une représentation graphique des différents flux étudiés, à savoir les flux de 3, 5 et 8 kW/m² :


Figure 5 : Flux thermiques dans le scénario 2

Le tableau suivant montre les distances maximales atteintes par les différents flux à partir des 4 faces des îlots de stockage :

Scénario 2		Distances maximales atteintes pour chaque face du stockage (m)			
Faces		Nord	Sud	Est	Ouest
Flux thermiques reçues	8 kW/m ²	0	0	0	5,53
	5 kW/m ²	0	0	0	10,7
	3 kW/m ²	0	0	0	18,0

Tableau 10 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 2
Commentaires :

- Les flux de 3 kW/m², 5 kW/m² et 8 kW/m² ne sortent pas des limites de propriété au Nord-Est.
- Le flux de 8 kW/m² ne touche aucun îlot de stockage. Il n'a donc pas d'effet domino.

Il n'y a donc pas nécessité de mettre en place des mesures compensatoires.

4.3 Scénario 3 : Incendie généralisé des ilots 11 à 14

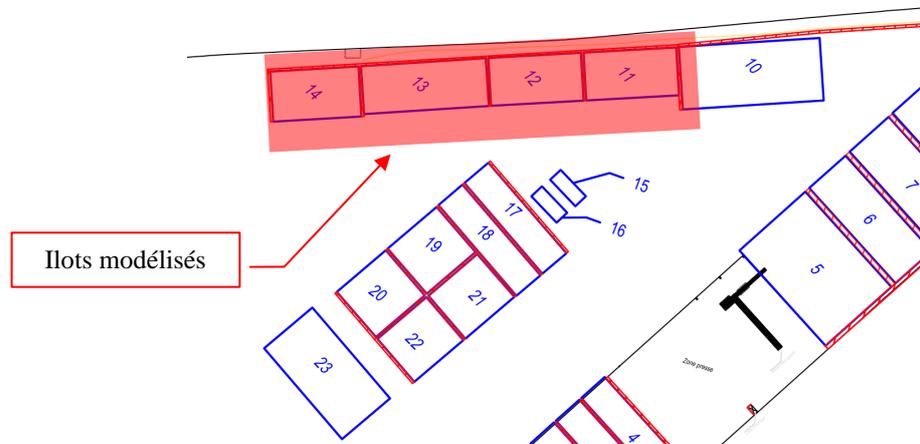


Figure 6 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 3

4.3.1 Rappel des hypothèses

Le tableau suivant montre les caractéristiques de ces ilots de stockage :

Rubriques	N° Ilot	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Radiance (W/m ²)
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	11	112,455	2,3	258,6	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12	112,455	2,3	258,6	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	13	151,47	2,3	348,4	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	14	112	2,3	257,6	26	30 000

Tableau 11 : Caractéristiques des ilots du scénario 3

4.3.2 Résultats

La hauteur de flamme de l'îlot de stockage a été déterminée selon la corrélation de THOMAS :

N° Ilot	Rubriques	Hauteur Flamme selon corrélation de Thomas (m)
11	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12,4 m écrêtée à 5,75 m*
12	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12,4 m écrêtée à 5,75 m*
13	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	10,6 m écrêtée à 5,75 m*
14	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12,4 m écrêtée à 5,75 m*

* D'après la méthode de calcul Fluidyn, et plus particulièrement d'après le rapport intitulé « Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôts – Partie A », la hauteur de flamme engendrée par un incendie ne peut pas être supérieure à 2,5 fois la hauteur du stockage en feu.

Tableau 12 : Hauteur de flamme des îlots du scénario 3

Le plan suivant montre une représentation graphique des différents flux étudiés, à savoir les flux de 3, 5 et 8 kW/m² :

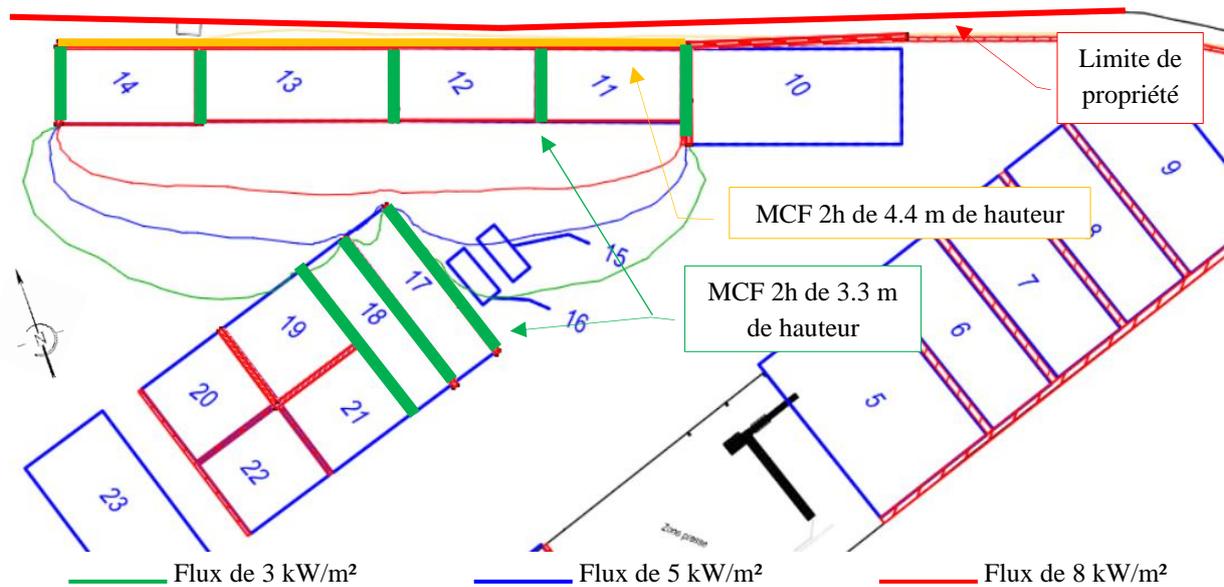


Figure 7 : Flux thermiques dans le scénario 3

Le tableau suivant montre les distances maximales atteintes par les différents flux à partir des 4 faces de stockage :

Scénario 3		Distances maximales atteintes pour chaque face du stockage (m)			
Faces		Nord	Sud	Est	Ouest
Flux thermiques reçues	8 kW/m ²	0	3,69	0	0
	5 kW/m ²	0	5,82	0	0
	3 kW/m ²	0	9,12	0	0

Tableau 13 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 3

Commentaires :

- Les flux de 3 kW/m², 5 kW/m² et 8 kW/m² ne sortent pas des limites de propriété.
- Le flux de 8 kW/m² ne touche aucun îlot de stockage. Il n'a donc pas d'effet domino.

Il n'y a donc pas nécessité de mettre en place des mesures compensatoires.

4.4 Scénario 4 : Incendie généralisé des ilots 15 et 16

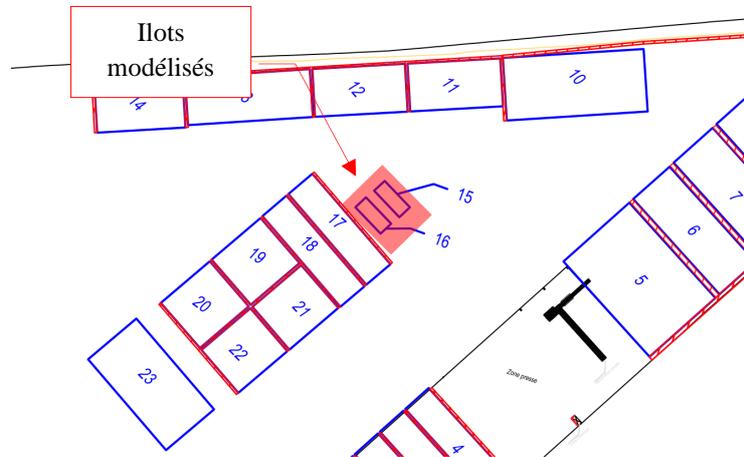


Figure 8 : Localisation des ilots modélisés dans le scénario 4

4.4.1 Rappel des hypothèses

Le tableau suivant montre les caractéristiques de ces ilots de stockage :

Rubriques	N° Ilot	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Radiance (W/m ²)
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	15	13,34	2,2	29,3	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	16	13,34	2,2	29,3	26	30 000

Tableau 14 : Caractéristiques des ilots du scénario 4

4.4.2 Résultats

La hauteur de flamme des ilots de stockage a été déterminée selon la corrélation de THOMAS :

N° Ilot	Rubriques	Hauteur Flamme selon corrélation de Thomas (m)
15	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	5,8 m écrêtée à 5.5 m*
16	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	5,8 m écrêtée à 5.5 m*

* D'après la méthode de calcul Fluidyn, et plus particulièrement d'après le rapport intitulé « Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôts – Partie A », la hauteur de flamme engendrée par un incendie ne peut pas être supérieure à 2,5 fois la hauteur du stockage en feu.

Tableau 15 : Hauteur de flamme des ilots du scénario 4

Le plan suivant montre une représentation graphique des différents flux étudiés, à savoir les flux de 3, 5 et 8 kW/m² :

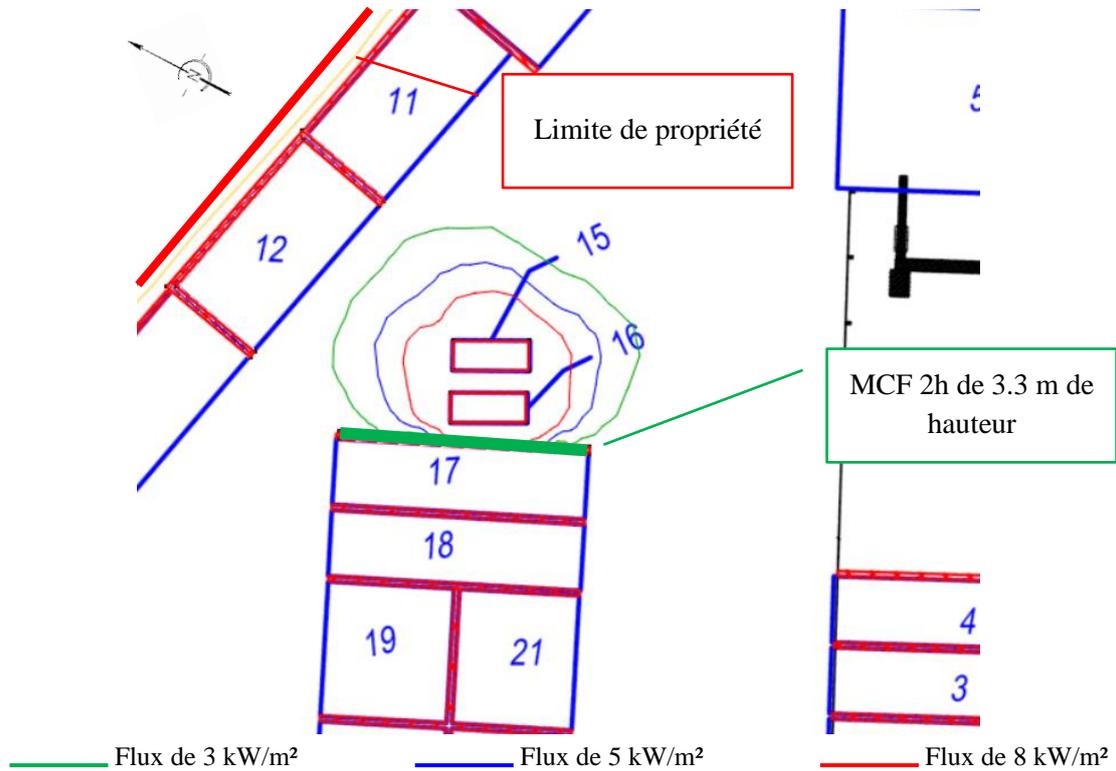


Figure 9 : Flux thermiques dans le scénario 4

Le tableau suivant montre les distances maximales atteintes par les différents flux à partir des 4 faces des îlots de stockage :

Scénario 4		Distances maximales atteintes pour chaque face du stockage (m)			
Faces		Nord	Sud	Est	Ouest
Flux thermiques reçues	8 kW/m ²	2,80	2,06	2,37	1,40
	5 kW/m ²	5,24	2,15	3,86	1,40
	3 kW/m ²	8,28	2,15	6,80	1,40

Tableau 16 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 4

Commentaires :

- Les flux de 3 kW/m², 5 kW/m² et 8 kW/m² ne sortent pas des limites de propriété.
- Le flux de 8 kW/m² ne touche aucun îlot de stockage. Il n'a donc pas d'effet domino.

Il n'y a donc pas nécessité de mettre en place des mesures compensatoires.

4.5 Scénario 5 : Incendie généralisé des îlots 17 à 22

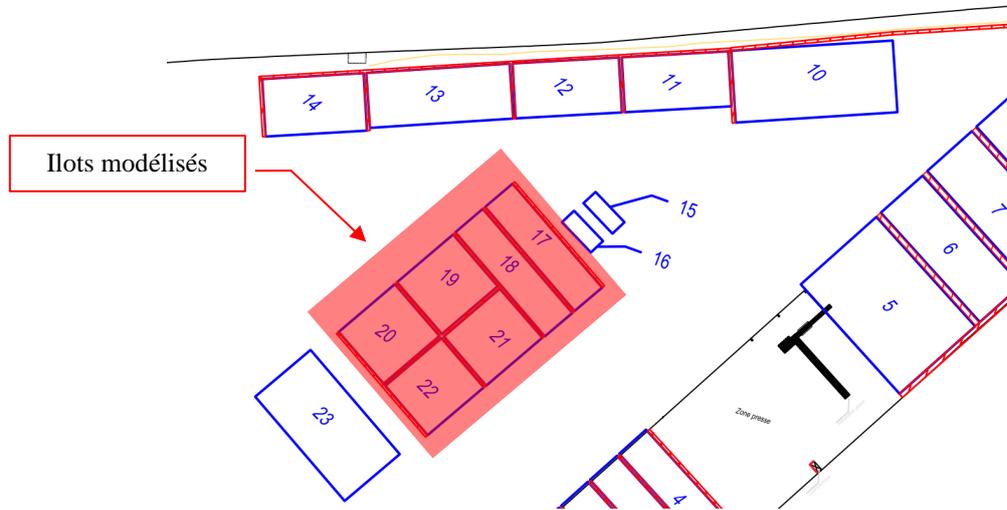


Figure 10 : Localisation des îlots modélisés dans le scénario 5

4.5.1 Rappel des hypothèses

Le tableau suivant montre les caractéristiques de ces îlots de stockage :

Rubriques	N° Ilot	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Radiance (W/m ²)
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	17	95	2,3	218,5	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	18	95	2,3	218,5	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	19	96,9	2,3	222,9	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	20	96,9	2,3	222,9	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	21	91,8	2,3	211,1	26	30 000
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	22	91,8	2,3	211,1	26	30 000

Tableau 17 : Caractéristiques des îlots du scénario 5

4.5.2 Résultats

La hauteur de flamme des îlots de stockage a été déterminée selon la corrélation de THOMAS :

N° Ilot	Rubriques	Hauteur Flamme selon corrélation de Thomas (m)
17	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	8,5 m écrêtée à 5,75 m*
18	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	8,5 m écrêtée à 5,75 m*
19	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12,2 m écrêtée à 5,75 m*
20	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12,2 m écrêtée à 5,75 m*
21	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12,0 m écrêtée à 5,75 m*
22	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	12,0 m écrêtée à 5,75 m*

* D'après la méthode de calcul Fluidyn, et plus particulièrement d'après le rapport intitulé « Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôts – Partie A », la hauteur de flamme engendrée par un incendie ne peut pas être supérieure à 2,5 fois la hauteur du stockage en feu.

Tableau 18 : Hauteur de flamme des îlots du scénario 5

Le plan suivant montre une représentation graphique des différents flux étudiés, à savoir les flux de 3, 5 et 8 kW/m² :

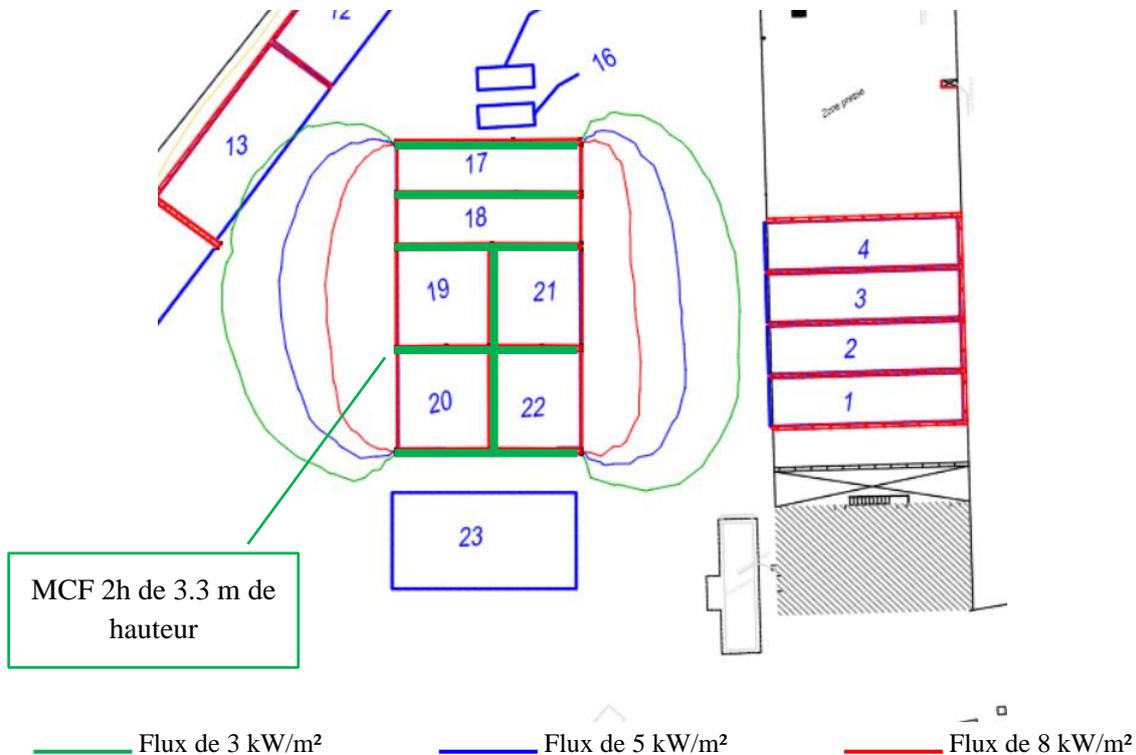


Figure 11 : Flux thermiques dans le scénario 5

Le tableau suivant montre les distances maximales atteintes par les différents flux à partir des 4 faces des ilots de stockage :

Scénario 5		Distances maximales atteintes pour chaque face du stockage (m)			
Faces		Nord	Sud	Est	Ouest
Flux thermiques reçues	8 kW/m ²	0	0	1,38	1,07
	5 kW/m ²	0	0	2,68	2,52
	3 kW/m ²	0	0	5,43	5,08

Tableau 19 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 5

Commentaires :

- Les flux de 3 kW/m², 5 kW/m² et 8 kW/m² ne sortent pas des limites de propriété.
- Le flux de 8 kW/m² ne touche aucun îlot de stockage. Il n'a donc pas d'effet domino.

Il n'y a donc pas nécessité de mettre en place des mesures compensatoires.

4.6 Scénario 6 : Incendie de l'îlot 23

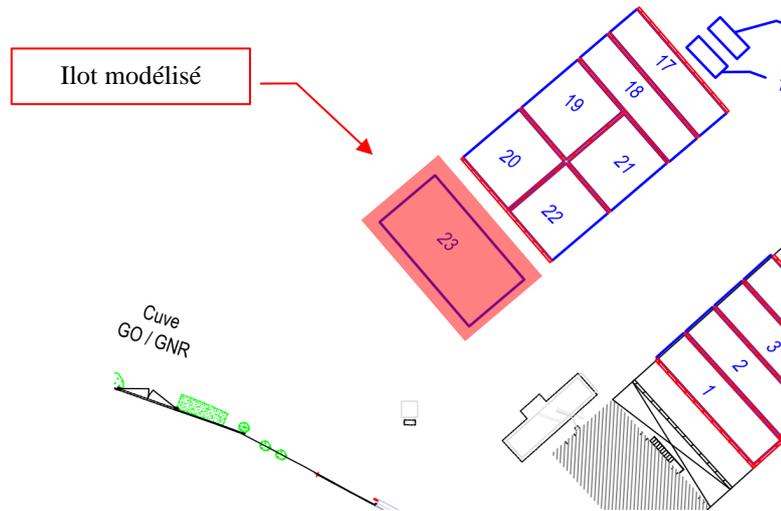


Figure 12 : Localisation de l'îlot modélisé dans le scénario 6

4.6.1 Rappel des hypothèses

Le tableau suivant montre les caractéristiques de cet îlot de stockage :

Rubriques	N° Ilot	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Radiance (W/m ²)
1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	23	190	2,3	437	26	30 000

Tableau 20 : Caractéristiques de l'îlot du scénario 6

4.6.2 Résultats

La hauteur de flamme des îlots de stockage a été déterminée selon la corrélation de THOMAS :

N° Ilot	Rubriques	Hauteur Flamme selon corrélation de Thomas (m)
23	1532/2516/2517/2710-2/2711/2713/2714/2715/2716	14,38 m écrêtée à 5,75 m*

* D'après la méthode de calcul Fluidyn, et plus particulièrement d'après le rapport intitulé « Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôts – Partie A », la hauteur de flamme engendrée par un incendie ne peut pas être supérieure à 2,5 fois la hauteur du stockage en feu.

Tableau 21 : Hauteur de flamme de l'îlot du scénario 6

Le plan suivant montre une représentation graphique des différents flux étudiés, à savoir les flux de 3, 5 et 8 kW/m² :

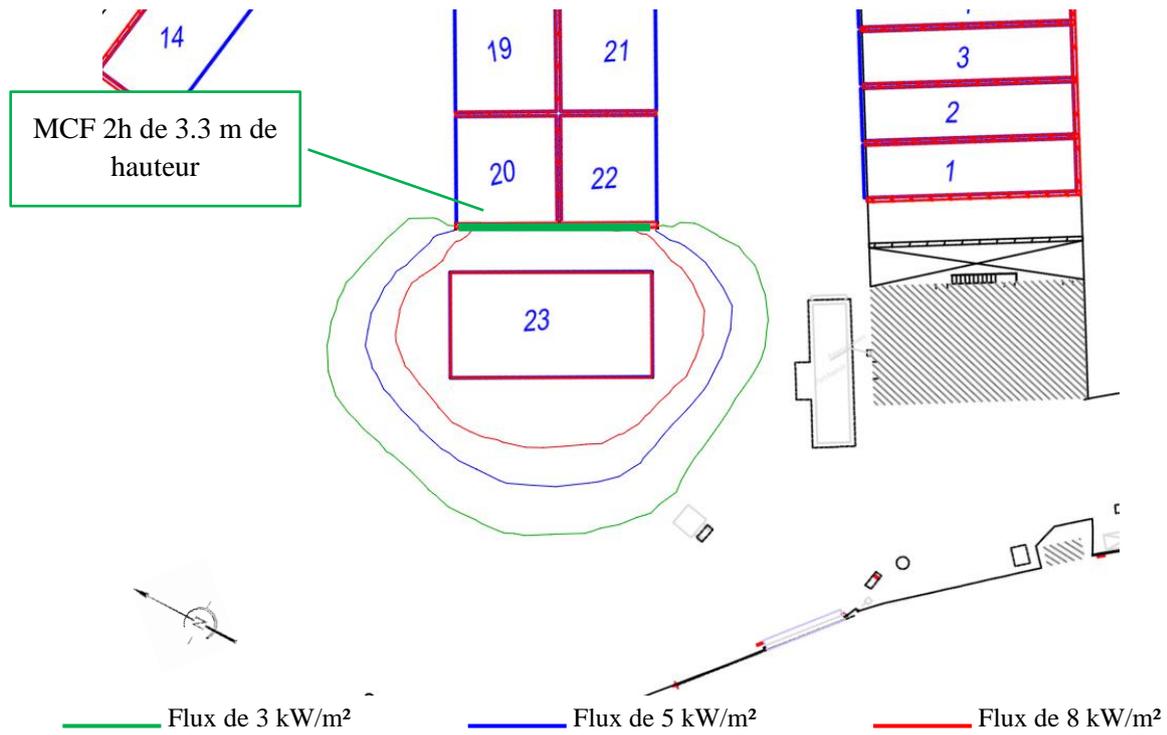


Figure 13 : Flux thermiques dans le scénario 6

Le tableau suivant montre les distances maximales atteintes par les différents flux à partir des 4 faces de stockage :

Scénario 6		Distances maximales atteintes pour chaque face du stockage (m)			
Faces		Nord	Sud	Est	Ouest
Flux thermiques reçues	8 kW/m ²	2,28	2,62	2,78	3,22
	5 kW/m ²	3,78	4,71	4,45	5,72
	3 kW/m ²	7,05	8,77	7,41	10,2

Tableau 22 : Distances atteintes par les flux thermiques dans le scénario 6

Commentaires :

- Les flux de 3 kW/m², 5 kW/m² et 8 kW/m² ne sortent pas des limites de propriété.
- Le flux de 8 kW/m² ne touche aucun îlot de stockage. Il n'a donc pas d'effet domino.

Il n'y a donc pas nécessité de mettre en place des mesures compensatoires.

5. Conclusion

Pour l'ensemble des scénarios, les résultats obtenus montrent que, grâce à l'éloignement des sous-ensembles des ilots entre eux, aux murs coupe-feu existants, **le risque incendie est maîtrisé sur le site de COVED à Sens.**