

GIRUS GE – Grenoble (38)

*Modélisation des fumées d'incendie d'un entrepôt de
stockage de marchandises diverses – Brebières (62)*

Février 2018

Rapport n° 92604/C

GIRUS

43, Avenue du Vieux Chêne
38 240 MEYLAN
Téléphone : 04 76 18 17 86

Antea Group

Région SUD

Pôle Environnement Dossiers réglementaires, Audit et Conseil



ENVIRONNEMENT

Parc Napollon – 400, avenue du Passe-Temps
Bât. C – 13676 AUBAGNE Cedex
Tél. : 04 42 08 70 70
Fax. : 04 42 08 70 71

Sommaire

	Pages
1. INTRODUCTION	4
2. METHODES ET MOYENS DE CALCUL UTILISES POUR LA MODELISATION DES PHENOMENES DANGEREUX	5
2.1 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMÉES D'INCENDIE	5
2.1.1 Méthodes et moyens de calcul mis en application.....	5
2.1.2 Caractérisation des débits de polluants	6
2.1.3 Calcul de la puissance thermique totale \dot{Q}_t	7
2.1.4 Calcul de la hauteur d'émission des fumées et de l'air entraîné	7
2.1.5 Modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants	7
2.1.6 Seuils d'effets retenus dans le cadre de la modélisation des phénomènes dangereux 9	9
2.2 EVALUATION DE LA PERTE DE VISIBILITE ASSOCIEE A L'INCENDIE	12
2.2.1 Concentration volumique des suies.....	12
2.2.2 Critères de référence	12
2.2.3 Calcul de l'atténuation optique	12
2.2.4 Evaluation de la perte de visibilité	13
3. MODELISATION DU PHENOMENE DANGEREUX N°1	14
3.1 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMÉES D'INCENDIE	14
3.1.1 Estimation de la vitesse de combustion	14
3.1.2 Caractéristiques du terme source	17
3.1.3 Durée d'exposition	17
3.1.4 Evaluation de l'intensité des effets du phénomène dangereux n°1 - Conclusion	18
3.2 EVALUATION DE LA PERTE DE VISIBILITE ASSOCIEE A L'INCENDIE	20
3.2.1 Données d'entrée	20
3.2.2 Résultats.....	20
4. MODELISATION DU PHENOMENE DANGEREUX N°2	22
4.1 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMÉES D'INCENDIE	22
4.1.1 Caractéristiques du terme source	26
4.1.2 Durée d'exposition	27
4.1.3 Evaluation de l'intensité des effets du phénomène dangereux n°2 - Conclusion	28

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
merchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Conditions météorologiques retenues pour la modélisation.....	8
Tableau 2 : Valeurs de référence relatives aux seuils de toxicité aiguë	9
Tableau 3 : Valeurs seuils de toxicité aiguë à retenir en l'absence de connaissance en toxicologie	10
Tableau 4 : Seuils d'effets irréversibles pour des expositions de 60 minutes	11
Tableau 5 : Seuils des premiers effets létaux (SPEL) pour des expositions de 60 minutes.....	11
Tableau 6 : Seuils d'effets létaux significatifs (SELS) pour des expositions de 60 minutes.....	11
Tableau 7 : Distance de visibilité en fonction de la concentration en suies dans les fumées	13
Tableau 8 : Cellule n°2/3/4 – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type	14
Tableau 9 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°2.....	14
Tableau 10 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°3	15
Tableau 11 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°4	15
Tableau 12 : Quantités de matières combustibles présentes pour les 3 cellules n°5/6/7	15
Tableau 13 : Caractéristiques de combustion des produits présents	16
Tableau 14 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes ..	16
Tableau 15 : Débits massiques de polluants	17
Tableau 16 : PhD1 – Distances d'effets (au sol et en hauteur)	19
Tableau 17 : PhD1 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées	20
Tableau 18 : PhD1 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur).....	20
Tableau 19 : Cellules n°2/3/4 – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type	22
Tableau 20 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°1	23
Tableau 21 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°2.....	23
Tableau 22 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°3	24
Tableau 23 : Quantités de matières combustibles présentes pour les 3 cellules n°1/2/3	24
Tableau 24 : Caractéristiques de combustion des produits présents	25
Tableau 25 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes ..	25
Tableau 26 : Débits massiques de polluants	26
Tableau 27 : PhD2 – Distances d'effets (au sol et en hauteur)	29

Liste des Figures

Figure 1 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	18
Figure 2 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	18
Figure 3 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	18
Figure 4 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	21
Figure 5 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	21
Figure 6 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées.....	28
Figure 7 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	28
Figure 8 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	28

1. Introduction

Dans le cadre de la réalisation d'études de dangers d'un entrepôt situé à Brebières (62), GIRUS souhaite un appui technique pour la réalisation de l'étude de dispersion atmosphérique d'incendies de cellules de stockage de matières plastiques, marchandises diverses, liquides inflammables et générateurs d'aérosols, afin de pouvoir évaluer les éventuels effets toxiques et les risques de perte visibilité générés par les fumées de l'incendie.

Les 2 cas étudiés dans le présent rapport sont :

- Phénomène dangereux n°1 : Incendie généralisé de 3 cellules :
 - 1 cellule de stockage (n°3) d'environ 12 000 m² stockant des marchandises diverses (rubrique 1510) d'une contenance de 10 138 t,
 - 2 cellules de stockage (n°2 et n°4) d'environ 12 000 m² chacune, stockant des matières plastiques (rubriques 2662-2663) d'une contenance de 10 138 t chacune ;

- Phénomène dangereux n°2 : Incendie généralisé de 3 cellules :
 - 1 cellule de stockage (n°1) d'environ 6 000 m² (séparée en 2 sous-cellules 1 et 1') stockant des matières plastiques (rubriques 2662-2663), des liquides inflammables (rubrique 4331) et des générateurs d'aérosols (rubriques 4320/4321) pour des tonnages respectifs de 5 069 t, 500 t et 1 100 t,
 - 2 cellules de stockage (n°2 et n°3) d'environ 12 000 m² chacune, stockant des matières plastiques (rubriques 2662-2663) d'une contenance de 10 138 t chacune (matières plastiques majorantes par rapport aux marchandises diverses pour les émissions des fumées).

A noter que pour l'évaluation de la perte de visibilité générée par les fumées de l'incendie, seul le phénomène dangereux n°1 est étudié ; en effet, compte-tenu de la surface en feu majorante (36 000 m² contre 30 000 m² pour le PhD2), il sera majorant en terme de débit de fumées générées.

L'évaluation des effets toxiques est quant à elle bien réalisée pour les 2 Phd.

2. Méthodes et moyens de calcul utilisés pour la modélisation des phénomènes dangereux

2.1 Evaluation des effets toxiques des fumées d'incendie

2.1.1 Méthodes et moyens de calcul mis en application

La méthodologie d'évaluation des effets toxiques des fumées de l'incendie est basée sur le rapport INERIS Ω-16 « *Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets* ».

Sous l'effet d'une augmentation de température, les produits stockés sont susceptibles de conduire à la formation de substances toxiques telles que HF, HBr, HI, HCN, NO₂, HCl, CO, CO₂.

La composition des fumées va dépendre du produit et des atomes le constituant. Sous l'effet de la chaleur, la molécule va en effet se dissocier :

- le fluor, le chlore et le brome contenus dans les molécules halogénées se combinent alors avec l'hydrogène pour former de l'acide fluorhydrique, de l'acide chlorhydrique et bromhydrique ;
- l'azote, le carbone pour former de l'acide cyanhydrique, des oxydes d'azote et de carbone.

La démarche d'évaluation de la toxicité des fumées et de leur impact potentiel sur la santé repose sur :

- la définition du terme source (débit de polluant et consommation d'oxygène pour la combustion et donc d'air, surélévation du panache),
- la dispersion et la diffusion du polluant à l'atmosphère,
- l'évaluation des effets sur les populations (calcul des concentrations au sol sous l'axe du panache, comparaison aux seuils d'effets toxiques retenus).

2.1.2 Caractérisation des débits de polluants

Les composés élémentaires constitutifs d'un produit, au cours d'un incendie conduisent généralement à la formation des produits suivants :

- pour la combustion complète du carbone, à la formation de monoxyde et de dioxyde de carbone suivant un rapport molaire CO/CO₂ égal à 0,1 soit 0,21 g de CO par gramme de carbone,
- une part significative de l'azote (60 %) se recombine en azote moléculaire (N₂), le reste (40 %) étant converti à part égale en acide cyanhydrique (HCN) et en oxydes d'azote (NO₂),
- la totalité du soufre s'oxyde en dioxyde de soufre (SO₂), les autres espèces chimiques étant a priori moins toxiques,
- la totalité du chlore se transforme en acide chlorhydrique (HCl),
- la totalité du fluor se transforme en acide fluorhydrique (HF),
- la totalité du brome se transforme en acide bromhydrique (HBr),
- le phosphore reste piégé sous forme solide. Concernant les produits issus du phosphore, sa prise en compte est actuellement difficile en l'absence de données fiables.

Dans le cadre de l'étude, ces hypothèses peuvent être considérées comme majorantes, admettant l'absence de résidus solides de combustion. En réalité, du carbone, du soufre et de l'azote se retrouvent dans les imbrûlés, restant piégés sous forme solide.

Sur les bases précédentes, les émissions massiques en composés gazeux par masse unitaire de l'élément initial s'établissent conformément au tableau ci-dessous :

Pour 1 g de :	Substance dégagée	(g)
N	N ₂	1,21
	HCN	0,36
	NO ₂	0,64
C	CO	0,21
	CO ₂	3,33
S	SO ₂	2,00
Br	HBr	1,01
Cl	HCl	1,03
F	HF	1,05

Les débits d'émission Q exprimés en g/g de produit combustible peuvent se calculer de la façon suivante :

$$Q = \frac{C_{m(p)}}{M_m} \cdot \sum_i (n_i \cdot M_i \cdot Q_i)$$

Avec : C_{m(p)} : concentration massique de la matière active m dans le produit p,
 M_m : masse molaire de la matière active m,
 n_i : nombre d'atomes de l'élément i dans la matière active,
 M_i : masse molaire de l'élément i.

2.1.3 Calcul de la puissance thermique totale \dot{Q}_t

La puissance thermique totale est déterminée par la relation suivante :

$$\dot{Q}_t = m * S * PCI$$

Où :

m est la vitesse de combustion (en g/m²/s)

PCI est le Pouvoir Calorifique Inférieur (en J/g)

S est la surface en feu (m²)

2.1.4 Calcul de la hauteur d'émission des fumées et de l'air entraîné

La hauteur d'émissions des fumées est déterminée par la relation (Heskestad) :

$$L = 0,166 (10^3 * Q_c)^{0.4}$$

où Q_c est la puissance thermique convectée en MW (prise égale à 60 % de la puissance thermique totale \dot{Q}_t).

Le débit massique des fumées à la hauteur L peut être calculé à l'aide de la relation suivante :

$$D = 3,24 \cdot \dot{Q}_t$$

où \dot{Q}_t est la puissance thermique totale (en MW).

2.1.5 Modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants

Le calcul de la dispersion dans l'atmosphère est réalisé avec le logiciel PHAST (Process Hazard Analysis Software Tools), de DNV Technica, dans sa version 7.21.

PHAST utilise une méthode de dispersion gaz lourd et gaussienne. Le modèle prend en compte tous les aspects importants influençant le transport - diffusion des polluants, à savoir :

- les particularités de la topographie du site, par l'intermédiaire d'un paramètre de rugosité (fixé à 0,17 pour un environnement industriel et/ou urbain/semourban),
- des conditions météorologiques spécifiques,
- la nature des traceurs chimiques traditionnels qui pour la plupart existent en base de données permettant de constituer des mélanges de produits toxiques.

Les conditions météorologiques retenues seront celles définies pour les rejets verticaux et/ou en hauteur dans la fiche n°2 (sur la dispersion toxique) de la partie 1 de la circulaire du 10 mai 2010 *récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.*

Elles sont présentées dans le tableau ci-après.

Stabilité atmosphérique	A	B	C	D	E	F
Vitesse du vent (m/s)	3	3	5	5	10	3
T° ambiante (°C)	20	20	20	20	20	20
T° du sol (°C)	20	20	20	20	20	20
Humidité relative (%)	70	70	70	70	70	70
Rayonnement solaire (kW/m ²)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0

Tableau 1 : Conditions météorologiques retenues pour la modélisation

Hauteur de la couche d'inversion

Le modèle de dispersion Phast considère que la couche d'inversion de température (susceptible d'être observée) est « infranchissable » par le panache de fumées et que la dispersion ne s'opère que dans un volume limité les 2 plans horizontaux que constituent le sol et la couche d'inversion (située à l'altitude $Z_{\text{inversion}}$).

Toutefois, compte tenu de l'énergie thermo-cinétique initiale des fumées, dans le champ proche (typiquement les 100 premiers mètres), il est clair que malgré une inversion de température, le panache de fumées s'élèverait de toute façon.

Ainsi le fait de limiter la dispersion atmosphérique entre le sol et la couche d'inversion a pour conséquence de surestimer les concentrations à hauteur d'homme.

Pour déterminer une valeur de $Z_{\text{inversion}}$ défavorable au sens de la dispersion mais réaliste compte-tenu de la modélisation retenue ensuite, l'altitude critique Z_c , à partir de laquelle une couche d'inversion serait en mesure de stopper l'élévation des panaches malgré leurs énergies thermo-cinétiques restantes, doit être calculée.

Pour ce faire, on retient les corrélations proposées par Briggs qui permettent de calculer l'altitude de culmination d'un panache se dispersant dans une atmosphère très stable. Or une couche d'inversion de température est justement une zone de forte stabilité atmosphérique. Finalement, l'altitude Δh a été retenue comme correspondant à une bonne estimation de Z_c .

$$\Delta h = 2,6 \cdot \left(\frac{F_b}{u \cdot s} \right)$$

où le paramètre de flottabilité F_b vaut :

$$F_b = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho} \right) \cdot g \cdot r^2 \cdot w_s$$

et le paramètre de stabilité s vaut :

$$s = \frac{g}{T} \cdot \frac{d\theta}{dz}$$

avec ρ_s : densité des gaz rejetés à la cheminée,

ρ : densité de l'air,

r : le diamètre de la cheminée,

w_s : la vitesse des gaz rejetés à la cheminée,

g : l'accélération de la gravité,

T : la température ambiante,

θ : la température potentielle,

z : l'altitude.

2.1.6 Seuils d'effets retenus dans le cadre de la modélisation des phénomènes dangereux

Les seuils retenus dans le cadre de la modélisation des phénomènes dangereux sont définis par 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 des dangers des installations classées soumises à autorisation ».

Les conséquences d'un accident sont évaluées en termes de toxicité aiguë sur les populations exposées au passage d'un nuage de gaz toxique.

Les valeurs de référence retenues pour les installations classées sont présentées dans le tableau suivant.

Seuils de toxicité aiguë pour l'homme par inhalation			
	Types d'effets constatés	Concentration d'exposition	Référence
Exposition de 1 à 60 minutes	Effets Létaux Significatifs	SELS (CL 5 %)	Seuils de toxicité aiguë Emissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. 2003 (et ses mises à jour ultérieures)
	Premiers Effets Létaux	SPEL (CL 1 %)	
	Effets Irréversibles	SEI	
	Effets Réversibles	SER	

Tableau 2 : Valeurs de référence relatives aux seuils de toxicité aiguë

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
merchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Ces valeurs sont toujours associées à des durées d'exposition, le plus souvent de 1 à 60 minutes, mais dans certains cas, des valeurs sont disponibles pour des périodes plus longues (2 heures par exemple).

Ces valeurs, définies par le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), existent pour un certain nombre de substances. En revanche, dans certains cas, bien que le produit soit classé toxique, voire très toxique, il n'existe pas de valeur publiée par le Ministère relative à la toxicité aiguë. Dans ce cas, on utilise les valeurs internationales reconnues proposées dans le tableau du chapitre 1.1.11 de la partie 1 de la circulaire du 10 mai 2010¹, reprenant le guide pratique de l'INERIS « *Choix des valeurs de toxicité aiguë en cas d'absence de valeurs françaises* » de juillet 2009 :

	Durée d'exposition (min)						
	10	20	30	60	120	240	480
SELS (SEL 5%)	-	-	-	-	-	-	-
SPEL (SEL 1%)	AEGL-3	-	AEGL-3	ERPG-3 AEGL-3	-	AEGL-3	AEGL-3
SEI	AEGL-2	-	AEGL-2 (IDLH)	ERPG-2 AEGL-2	-	AEGL-2	AEGL-2

AEGL : Acute Exposure Guideline Levels de l'US-EPA

ERPG : Emergency Response Planning Guidelines de l'AIHA

IDLH : Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations du NIOSH

Tableau 3 : Valeurs seuils de toxicité aiguë à retenir en l'absence de connaissance en toxicologie

Dans le cas d'un mélange de plusieurs produits toxiques, il est d'usage de prendre un seuil équivalent qui dépend à la fois des concentrations des divers polluants dans le mélange et des seuils qui leur sont propres.

Enfin, dans le cadre des durées d'expositions différentes de celles données dans la littérature (ou pour tenir compte de la variation de la concentration pendant la durée de l'exposition), il est utilisé une équation qui permet d'évaluer la dose intégrée conduisant aux mêmes effets (effets létaux significatifs, premiers effets létaux ou effets irréversibles).

Cette équation (loi de Haber) est du type $Dose = C^n \times t$ où :

- C = concentration inhalée ou d'exposition (mg/m³ ou ppm),
- t = temps d'exposition (min),
- n = constante de Haber, spécifique à chaque produit.

¹ Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche, de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Les seuils de toxicité aiguë des composés considérés dans cette étude sont donnés ci-après (pour une durée d'exposition de 60 minutes) :

Substances dégagées	SEI	Référence de la valeur seuil retenue
	ppm	
CO	800	Seuils de toxicité aiguë – INERIS– DRC-09-103128-05616A
CO ₂	20 000	Pas de seuils de toxicité aigue en France Utilisation du Revised IDLH
HCl	40	Seuils de toxicité aiguë – INERIS– DRC-08-94398-11984A Extrapolation à 120 minutes par loi de Haber
HCN	ND	La détermination du SEI n'a pas été possible compte-tenu des études disponibles (Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-12727A)
NO ₂	40	Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-13333A

Tableau 4 : Seuils d'effets irréversibles pour des expositions de 60 minutes

Substances dégagées	SPEL	Référence de la valeur seuil retenue
	ppm	
CO	3 200	Seuils de toxicité aiguë – INERIS– DRC-09-103128-05616A
CO ₂	20 000	Pas de seuils de toxicité aigue en France De façon conservatrice et conformément au document INERIS « Oméga-16 - Toxicité et dispersion des fumées d'incendie : Phénoménologie et modélisation » de mars 2005, lorsqu'un des seuils n'est pas disponible, on retient le seuil correspondant à l'effet inférieur (par exemple, on utilise le SEI comme SEPL, et/ou le SEPL pour le SELS).
HCl	240	Seuils de toxicité aiguë – INERIS– DRC-08-94398-11984A
HCN	41	Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-12727A
NO ₂	70	Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-13333A

Tableau 5 : Seuils des premiers effets létaux (SPEL) pour des expositions de 60 minutes

Substances dégagées	SELS	Référence de la valeur seuil retenue
	ppm	
CO	3200	La détermination du SELS n'a pas été possible compte-tenu des études disponibles (Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-09-103128-05616A) De façon conservatrice et conformément au document INERIS « Oméga-16 - Toxicité et dispersion des fumées d'incendie : Phénoménologie et modélisation » de mars 2005, lorsqu'un des seuils n'est pas disponible, on retient le seuil correspondant à l'effet inférieur (par exemple, on utilise le SEI comme SEPL, et/ou le SEPL pour le SELS).
CO ₂	20 000	Pas de seuils de toxicité aigue en France De façon conservatrice et conformément au document INERIS « Oméga-16 - Toxicité et dispersion des fumées d'incendie : Phénoménologie et modélisation » de mars 2005, lorsqu'un des seuils n'est pas disponible, on retient le seuil correspondant à l'effet inférieur (par exemple, on utilise le SEI comme SEPL, et/ou le SEPL pour le SELS).
HCl	379	Seuils de toxicité aiguë – INERIS– DRC-08-94398-11984A
HCN	63	Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-12727A
NO ₂	73	Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-13333A

Tableau 6 : Seuils d'effets létaux significatifs (SELS) pour des expositions de 60 minutes

2.2 Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie

L'émission des fumées d'un incendie est accompagnée d'une émission de suies qui entraîne une atténuation de la visibilité. Cette perte visuelle est proportionnelle à la concentration (ou la fraction volumique) en suies.

La méthodologie d'évaluation de la perte de visibilité liée à l'émission des fumées d'un incendie est extraite du « Handbook for fire calculations and Fire Assessment in the Process Industry » (SCANDPOWER A/S – SINTEF – NBL, 1992).

2.2.1 Concentration volumique des suies

La méthode consiste à évaluer, dans un premier temps, le débit des fumées de combustion comprenant tout ce qui est produit par le feu : les gaz et les particules de suies.

Ce débit est calculé selon la méthodologie définie au paragraphe précédent.

La production de suies est proportionnelle à la vitesse de combustion (en kg/s) des produits en feu (évalué à partir de la composition des matériaux pris dans l'incendie).

A partir du rapport initial suies/fumées ainsi déterminé (ratio), on évalue la concentration volumique des suies à partir de la concentration volumique des fumées selon :

$$C_s^v = \text{ratio} \times \frac{\rho(\text{fumées})}{\rho(\text{suies})} \cdot C_f^v$$

Où : C_s^v est la concentration volumique des suies,
 C_f^v est la concentration volumique des fumées,
 $\rho(\text{fumées})$: masse volumique des fumées (kg/m³) : définie avec PHAST ;
 $\rho(\text{suies})$: masse volumique des suies (kg/m³) : 1200 kg/m³ (bibliographie).

2.2.2 Critères de référence

Il n'existe pas de critères précis permettant d'apprécier le moment à partir duquel la gêne devient manifeste. Sur les routes, des repères de distances sont utilisés par les agents afin de mettre en place une signalisation adaptée :

- Pour une visibilité comprise entre 50 et 100 m : affichage de consignes de prudence sur les supports fixes ;
- Pour une visibilité inférieure à 50 m : affichage sur supports fixes + signalisation mobile.

2.2.3 Calcul de l'atténuation optique

La loi de Beer-Lambert permet de relier l'intensité optique émergente I et l'intensité incidente I_0 à partir du coefficient d'extinction du milieu traversé $\Gamma_{(\lambda)}$ et de la longueur du trajet optique L selon la relation :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\Gamma_{\lambda} \cdot L} \quad (1)$$

La concentration volumique des suies est reliée au coefficient d'extinction par la relation :

$$C_s^v = \Gamma_\lambda \times \frac{\lambda}{c} [\text{m}^3/\text{m}^3] \quad (2)$$

Avec :

- λ longueur d'onde (les longueurs d'onde de la lumière visible par l'œil humain sont comprises entre 0,4 et 0,7 μm , la valeur de 0,55 μm est utilisée)
- c valeur moyenne du rapport du coefficient d'extinction de particules en suspension (la valeur de 7,0 est conseillée dans le Handbook édité par Scandpower)

La densité optique du milieu par mètre de longueur de trajet optique est définie comme suit :

$$\sigma = \frac{D}{L} = -\frac{1}{L} \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (3)$$

En combinant ces 3 relations, on peut récrire l'équation (3) :

$$\sigma = 5,5 \times C_v \quad [\text{m}^{-1}] \quad (4)$$

Avec C_v en cm^3/m^3 (ppm).

Le passage de la densité optique à la visibilité peut être effectué par cette corrélation empirique :

$$S = \frac{1}{\frac{D}{L}} \quad \text{pour un panneau que l'on éclaire [m]} \quad (6)$$

$$S = \frac{2,5}{\frac{D}{L}} \quad \text{pour un panneau émettant de la lumière [m]} \quad (7)$$

On a ainsi :

$$S = \frac{0,18}{C_s^v} \quad \text{pour un panneau que l'on éclaire [m]} \quad (8)$$

$$S = \frac{0,45}{C_s^v} \quad \text{pour un panneau émettant de la lumière [m]} \quad (9)$$

On obtient pour les panneaux que l'on éclaire (**cas le plus pénalisant**) :

Visibilité	< 50 m	< 100 m
Concentrations en suies	$3,6 \cdot 10^{-3}$ ppm	$1,8 \cdot 10^{-3}$ ppm

Tableau 7 : Distance de visibilité en fonction de la concentration en suies dans les fumées

2.2.4 Evaluation de la perte de visibilité

L'évaluation de la dispersion des concentrations en fumées/suies dans l'atmosphère (et la perte potentielle de visibilité associée) est ensuite réalisée avec le logiciel PHAST, en conservant les mêmes caractéristiques d'émissions, les mêmes conditions météorologiques et le même paramétrage du logiciel que pour l'évaluation des effets toxiques.

3. Modélisation du phénomène dangereux n°1

3.1 Evaluation des effets toxiques des fumées d'incendie

3.1.1 Estimation de la vitesse de combustion

Le scénario étudié est l'incendie généralisé de 3 cellules :

- 1 cellule de stockage (n°3) de 12 000 m² stockant des marchandises diverses (rubrique 1510) d'une contenance de 10 138 t,
- 2 cellules de stockage (n°2 et n°4) de 12 000 m² chacune, stockant des matières plastiques (rubriques 2662-2663) d'une contenance de 10 138 t chacune ;

Les palettes pèsent 600 kg, dont 30 kg de palette en bois et 570 kg de produit stockés. Les proportions de matériaux dans les différents types de palettes sont données ci-après.

Matériaux	Palette type 1510	Palette type 2662/2663
Bois	5 %	5 %
Papier/carton	70 %	-
Polypropylène (PP)	7,5 %	19 %
Polyéthylène (PE)	7,5 %	19 %
Polystyrène (PS)	7,5 %	19 %
PVC	2,5 %	19 %
Polyuréthane (PU)	-	19 %

Tableau 8 : Cellule n°2/3/4 – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type

Pour la cellule n°2, les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 16 896² palettes de type 2662/2663 présentes dans la cellule) :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)
Polypropylène (PP)	1 926
Polyéthylène (PE)	1 926
Polystyrène (PS)	1 926
PVC	1 926
Polyuréthane (PU)	1 926
Bois	507
Total	10 138

Tableau 9 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°2

² 16 896 palettes de 600 kg soit environ 10 138 tonnes

*GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C*

Pour la cellule n°3, les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 16 896³ palettes de type 1510 présentes dans la cellule) :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)
Polypropylène (PP)	760
Polyéthylène (PE)	760
Polystyrène (PS)	760
PVC	253
Bois	506
Papier carton	7096
Total	10 138

Tableau 10 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°3

Pour la cellule n°4, les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 16 896⁴ palettes de type 2662/2663 présentes dans la cellule) :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)
Polypropylène (PP)	1 926
Polyéthylène (PE)	1 926
Polystyrène (PS)	1 926
PVC	1 926
Polyuréthane (PU)	1 926
Bois	507
Total	10 138

Tableau 11 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°4

Globalement, les quantités totales de matières combustibles pour les **3 cellules** sont :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)
Polypropylène (PP)	4612,6
Polyéthylène (PE)	4612,6
Polystyrène (PS)	4612,6
PVC	4105,7
PU	3852,2
Bois	1520,6
Papier carton	7096,3
Total	30 413

Tableau 12 : Quantités de matières combustibles présentes pour les 3 cellules n°5/6/7

Les caractéristiques des combustibles présents sont les suivantes :

³ 16 896 palettes de 600 kg soit environ 10 138 tonnes

⁴ 16 896 palettes de 600 kg soit environ 10 138 tonnes

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
merchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Matériaux	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Source	PCI (MJ/kg)	Source
Polypropylène (PP)	14	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	43,4	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Polyéthylène (PE)	14	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	43,6	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Polystyrène (PS)	35	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	39,2	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
PVC	21,7	A study of the flammability of plastics in vehicle components and parts by A. Tewarson (Factory Mutual) October 1997	16,4	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Polyuréthane (PU)	26	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	23,2	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Bois	13	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	16,4	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Papier carton	48	Analyse des risques associés à l'industrie papetière, INERIS (pour carton)	21,5	Techniques de l'incendie et de la construction, INRS

Tableau 13 : Caractéristiques de combustion des produits présents

Le tableau suivant présente les résultats des caractéristiques de combustion moyennes du stockage en fonction de sa composition :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	PCI (MJ/kg)
Polypropylène (PP)	4612,6	14	43,4
Polyéthylène (PE)	4612,6	14	43,6
Polystyrène (PS)	4612,6	35	39,2
PVC	4105,7	21,7	16,4
PU	3852,2	26	23,2
Bois	1520,6	13	16,4
Papier, carton	7096,3	48	21,5
Caractéristiques moyennes de combustion du stockage		27,7	30,1

Tableau 14 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes

Les conséquences de l'incendie de ce stockage seront donc modélisées en retenant :

- une vitesse de combustion moyenne de **27,7 g/m²/s**,
- un pouvoir calorifique de **30,1 MJ/kg**.

3.1.2 Caractéristiques du terme source

La surface de la zone de stockage est de 36 000 m² (ensemble des 3 cellules de 12 000 m²).

Les débits de polluants sont calculés selon la méthodologie présentée au chapitre 2.1, en considérant une vitesse de régression moyenne de 27,7 g/m²/s. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Composé	CO ₂	CO	HCl	HCN	NO ₂	Fumées totales
Débit massique (en kg/s)	2 095	133,4	78,9	7,9	13,4	97 250

Tableau 15 : Débits massiques de polluants

Le débit total des fumées (polluants + air entraîné) est de 97 250 kg/s au sommet des flammes.

La hauteur d'émission des fumées toxiques, calculée selon méthodologie présentée au chapitre 2.1.3, est de 132 m.

3.1.3 Durée d'exposition

Selon le « *Glossaire des risques technologiques* » (partie 3 de la circulaire du 10 mai 2010), la cinétique est définie comme *la vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle, de l'événement initiateur aux conséquences sur les éléments vulnérables.*

La cinétique d'un phénomène dangereux pourra être qualifiée de lente dans son contexte si elle permet la mise en œuvre de mesures de sécurité suffisantes dans le cadre d'un plan d'urgence interne et externe, pour protéger les personnes à l'extérieur de l'installation avant qu'elles ne soient atteintes par les effets du phénomène dangereux.

Dans le cadre de l'étude, **la durée d'exposition considérée est de 60 minutes**, correspondant à la durée maximale d'exposition envisagée pour les seuils d'effets toxiques dans l'Arrêté Ministériel du 29/05/2005 (cf. Tableau 2 : Valeurs de référence relatives aux seuils de toxicité aiguë).

Avec les débits d'air et de produits toxiques, les seuils équivalents retenus pour une exposition de 60 minutes sont :

- SEI équivalent : 29 966 ppm,
- SPEL équivalent : 106 061 ppm,
- SELS équivalent : 126 270 ppm.

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

3.1.4 Evaluation de l'intensité des effets du phénomène dangereux n°1 - Conclusion

Les figures suivantes présentent les panaches de fumées (en coupe verticale dans le sens du vent) correspondant aux différents effets.

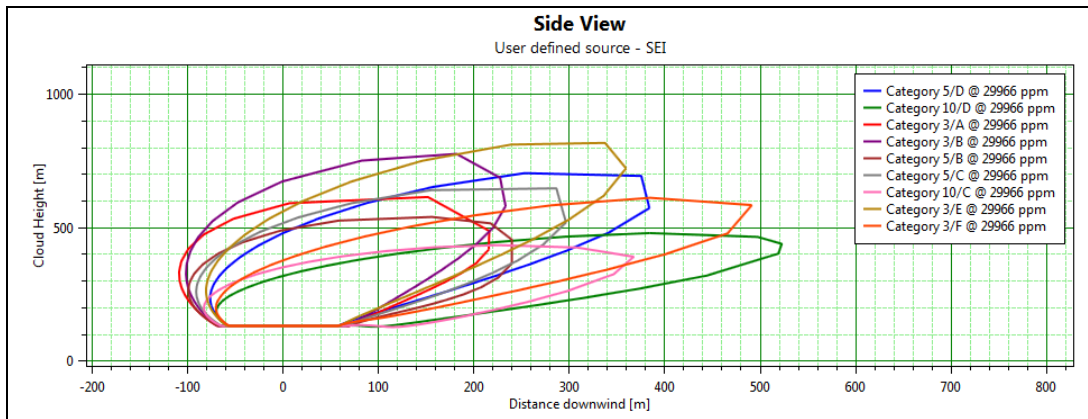


Figure 1 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

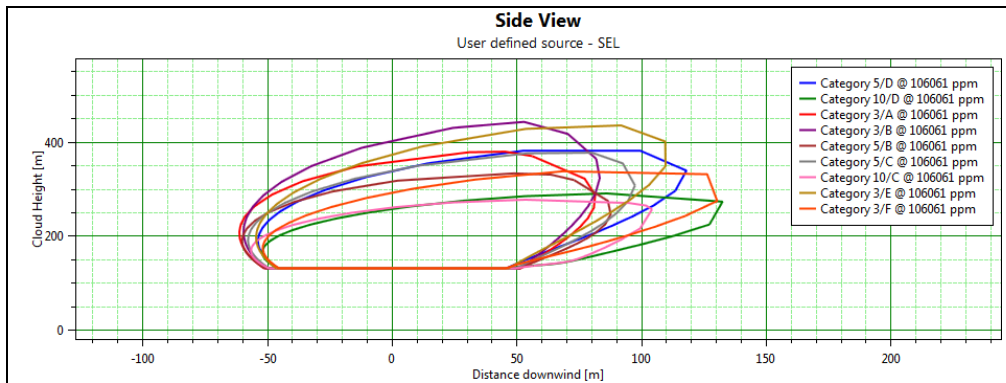


Figure 2 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

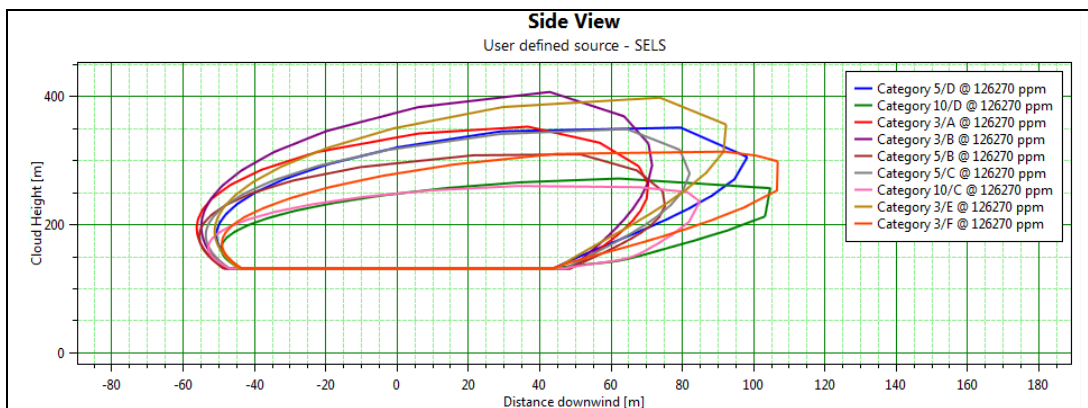


Figure 3 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Les distances d'effets pour une durée d'exposition de 60 minutes sont les suivantes :

Seuil	Distance
SEI	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet toxique n'est observé à hauteur d'homme (h < 2 m) • Hauteur minimale d'atteinte du seuil toxique : 128 m à 114 m de la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 521 m de la source à h = 438 m
SPEL	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet toxique n'est observé à hauteur d'homme (h < 2 m) • Hauteur minimale d'atteinte du seuil toxique : 132 m à la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 132 m de la source à h = 273 m
SELS	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet toxique n'est observé à hauteur d'homme (h < 2 m) • Hauteur minimale d'atteinte du seuil toxique : 132 m à la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 106 m de la source à h = 300 m

Tableau 16 : PhD1 – Distances d'effets (au sol et en hauteur)

Remarque concernant le choix du phénomène dangereux retenu

Il convient de noter que le phénomène dangereux « incendie généralisé de 3 cellules » a été retenu pour la présente modélisation car ce phénomène dangereux est majorant en terme de débit de génération de fumées (et donc de distances maximales SEI/SEL/SELS atteintes) par rapport à l'incendie d'une seule cellule.

Il est également majorant en termes de hauteur et de vitesse d'émissions des fumées. De fait, l'incendie d'une seule cellule pourrait générer des concentrations SEI/SEL/SELS à des hauteurs plus faibles que l'incendie généralisé de 3 cellules.

Cependant, le retour d'expérience Antea Group montre qu'il ne générerait pas d'effets toxiques au sol, seulement à partir de la hauteur d'émission des fumées (qui serait ici de 85 m dans le cas d'une cellule de 12 000 m²).

En résumé : l'incendie d'une seule cellule donnerait des distances d'effets SEI/SEL/SELS plus faibles mais à une altitude plus faible que l'incendie généralisé de 3 cellules, sans toutefois que ces concentrations ne soient atteintes à une altitude inférieure à 85 m.

3.2 Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie

3.2.1 Données d'entrée

- Débit des fumées : 97 250 kg/s ;
- Débit de suies : 89,75 kg/s (0,09⁵x débit massique de combustion) ;
- Ratio suies/fumées = 9,23.10⁻⁴ [kg/kg] ;
- ρ(fumées) : 0,66 kg/m³ (PHAST) ;
- ρ(suies) : 1 200 kg/m³.

D'où :

$$C^v_s = 5,08.10^{-7} C^v_f$$

Avec :

C^v_s : concentration volumique des suies (ppm)

C^v_f : concentration volumique des fumées (ppm)

Concentration en fumées à rechercher dans PHAST :

Visibilité	< 50 m	< 100 m
Concentrations en fumées	7 087 ppm	3 543 ppm

Tableau 17 : PhD1 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées

3.2.2 Résultats

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-après.

	Distance
Visibilité < 50 m	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de perte de visibilité au sol • Hauteur minimale d'atteinte du seuil de visibilité < 50 m : 110 m à 150 m de la source • Maximum en hauteur : 2 900 m à h = 1 091 m
Visibilité < 100 m	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de perte de visibilité au sol • Hauteur minimale d'atteinte du seuil de visibilité < 100 m : 34 m à 630 m de la source • Maximum en hauteur : 10 580 m à h = 1 091 m

Tableau 18 : PhD1 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur)

⁵ Valeur évaluée à partir des « ratios » de production de suies lors de la combustion des différents matériaux pris dans l'incendie (source : SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition – 2002)

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Les figures suivantes présentent les panaches de fumées (en coupe verticale dans le sens du vent) correspondant aux deux « seuils » de perte de visibilité (50 m et 100 m).

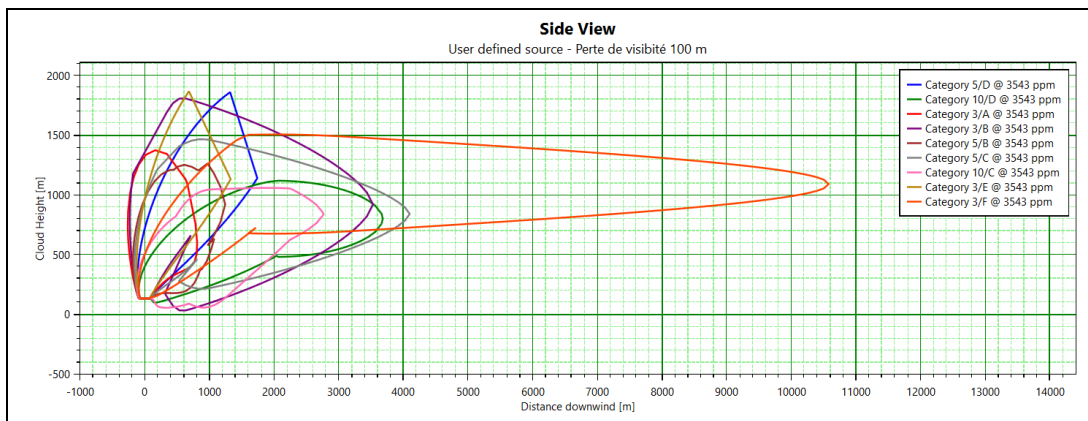


Figure 4 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

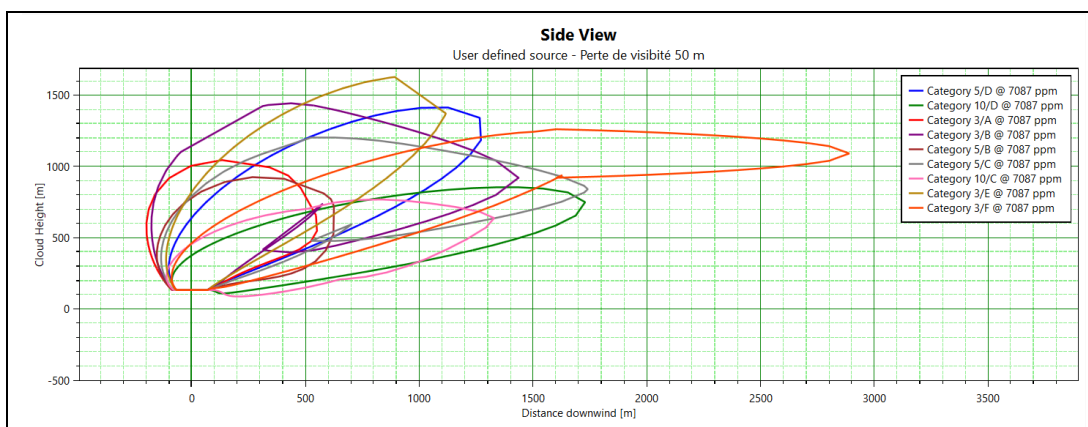


Figure 5 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

Remarque concernant le choix du phénomène dangereux retenu

Il convient de noter que le phénomène dangereux « incendie généralisé de 3 cellules » a été retenu pour la présente modélisation car ce phénomène dangereux est majorant en terme de débit de génération de fumées (et donc de distances maximales de pertes de visibilité atteintes) par rapport à l'incendie d'une seule cellule.

Il est également majorant en termes de hauteur et de vitesse d'émissions des fumées. De fait, l'incendie d'une seule cellule pourrait générer des pertes de visibilité à des hauteurs plus faibles que l'incendie généralisé de 3 cellules.

Cependant, le retour d'expérience Antea Group montre qu'il ne générerait pas de « pertes de visibilité inférieures à 50 ou 100 m » au niveau du sol (ces pertes de visibilité pourraient seulement être observées à partir d'une altitude supérieure à 20 m).

4. Modélisation du phénomène dangereux n°2

4.1 Evaluation des effets toxiques des fumées d'incendie

Le scénario étudié est l'incendie généralisé de 3 cellules :

- 1 cellule de stockage (n°1) de 6 000 m² (séparée en 2 sous-cellules 1 et 1') stockant des matières plastiques (rubriques 2662-2663), des liquides inflammables (rubrique 4331) et des générateurs d'aérosols (rubriques 4320/4321) d'une contenance respective de 5 069 t, 500 t et 1 100 t,
- 2 cellules de stockage (n°2 et n°3) de 12 000 m² chacune, stockant des matières plastiques (rubriques 2662-2663) d'une contenance de 10 138 t chacune.

Les proportions de matériaux dans les différents types de palettes sont données ci-après.

Matériaux	Palette type 2662/2663	Palette liquide inflammable	Palette générateurs aérosols ⁶
Bois	5 %	5 %	4,25 %
Papier/carton	-	5 %	2,25 %
Polypropylène (PP)	19 %	-	-
Polyéthylène (PE)	19 %	-	-
Polystyrène (PS)	19 %	-	-
PVC	19 %	-	1,7 %
PU	19 %	-	-
Liquide inflammable	-	90 %	50 %
Gaz propulseur (butane)	-	-	33,3 %
Métal	-	-	8,5 %

Tableau 19 : Cellules n°2/3/4 – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type

⁶ La composition d'une palette de générateurs d'aérosols est issue du rapport INERIS Oméga 4 « Modélisation d'un incendie affectant un stockage de générateurs d'aérosols » de septembre 2002 » / De manière majorante, il est considéré que tout le plastique est du PVC

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Pour la cellule n°1, les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 8 448 ⁷ palettes de type 2662/2663 présentes dans la cellule, de 500 tonnes de liquides inflammable et de 1 100 tonnes de générateur d'aérosols) :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)			TOTAL
	Matières plastiques	Liquides inflammables	Générateurs d'aérosols	
Polypropylène (PP)	963	-	-	963
Polyéthylène (PE)	963	-	-	963
Polystyrène (PS)	963	-	-	963
PVC	963	-	-	963
Polyuréthane (PU)	963	-	-	963
Bois	253	25	46,75	325
Liquide inflammable	-	450	550	1000
Papier carton	-	25	24,75	49,75
Gaz propulseur	-	-	366,3	366,3
Métal	-	-	93,5	93,5
Total	5 069	500	1100	6650

Tableau 20 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°1

Pour la cellule n°2, les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 16 896 ⁸ palettes de type 2663/2663 présentes dans la cellule) :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)
Polypropylène (PP)	1 926
Polyéthylène (PE)	1 926
Polystyrène (PS)	1 926
PVC	1 926
Polyuréthane (PU)	1 926
Bois	507
Total	10 138

Tableau 21 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°2

⁷ 8 448 palettes de 600 kg soit environ 5 069 tonnes

⁸ 16 896 palettes de 600 kg soit environ 10 138 tonnes

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Pour la cellule n°3, les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 16 896⁹ palettes de type 2662/2663 présentes dans la cellule) :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)
Polypropylène (PP)	1 926
Polyéthylène (PE)	1 926
Polystyrène (PS)	1 926
PVC	1 926
Polyuréthane (PU)	1 926
Bois	507
Total	10 138

Tableau 22 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule n°3

Globalement, les quantités totales de matières combustibles pour les **3 cellules** sont :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)
Polypropylène (PP)	4815
Polyéthylène (PE)	4815
Polystyrène (PS)	4815
PVC	4815
PU	4815
Bois	1339
Papier carton	50
Liquide inflammable (éthanol)	1000
Gaz propulseur (butane)	366
Métal	94
Total	26925

Tableau 23 : Quantités de matières combustibles présentes pour les 3 cellules n°1/2/3

⁹ 16 896 palettes de 600 kg soit environ 10 138 tonnes

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Les caractéristiques des combustibles présents sont les suivantes :

Matériaux	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Source	PCI (MJ/kg)	Source
Polypropylène (PP)	14	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	43,4	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Polyéthylène (PE)	14	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	43,6	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Polystyrène (PS)	35	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	39,2	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
PVC	21,7	A study of the flammability of plastics in vehicle components and parts by A. Tewarson (Factory Mutual) October 1997	16,4	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Polyuréthane (PU)	26	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	23,2	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Bois	13	Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale	16,4	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Papier carton	48	Analyse des risques associés à l'industrie papetière, INERIS (pour carton)	21,5	Techniques de l'incendie et de la construction, INRS
Liquide inflammable (éthanol)	25	GTDLI	27,7	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Gaz propulseur (butane)	78	Rapport INERIS DRA-2002-40862	45,4	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002
Métal	-	-	-	-

Tableau 24 : Caractéristiques de combustion des produits présents

Le tableau suivant présente les résultats des caractéristiques de combustion moyennes du stockage en fonction de sa composition :

Matériaux	Quantité présente (en tonnes)	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	PCI (MJ/kg)
Polypropylène (PP)	4815	14	43,4
Polyéthylène (PE)	4815	14	43,6
Polystyrène (PS)	4815	35	39,2
PVC	4815	21,7	16,4
PU	4815	26	23,2
Bois	1339	13	16,4
Papier carton	50	48	21,5
Liquide inflammable (éthanol)	1000	25	27,7
Gaz propulseur (butane)	366	78	45,4
Métal	94	-	-
Caractéristiques moyennes de combustion du stockage		22,5	32,2

Tableau 25 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes

Les conséquences de l'incendie de ce stockage seront donc modélisées en retenant :

- **une vitesse de combustion moyenne de 22,5 g/m²/s,**
- **un pouvoir calorifique de 32,2 MJ/kg.**

4.1.1 Caractéristiques du terme source

La surface de la zone de stockage, soit l'ensemble des 3 cellules, est de 30 000 m² (2 cellules de 12 000 m² et une de 6 000 m²)

Les débits de polluants sont calculés selon la méthodologie présentée au chapitre 2.1.2, en considérant une vitesse de régression moyenne de 22,5 g/m²/s. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Composé	CO ₂	CO	HCl	HCN	NO ₂	Fumées totales
Débit massique (en kg/s)	1 494	95,1	71,0	7,6	12,9	70 421

Tableau 26 : Débits massiques de polluants

Le débit total des fumées (polluants + air entraîné) est de 70 421 kg/s au sommet des flammes.

La hauteur d'émission des fumées toxiques, calculée selon méthodologie présentée au chapitre 2.1.3, est de 116 m.

4.1.2 Durée d'exposition

Selon le « *Glossaire des risques technologiques* » (partie 3 de la circulaire du 10 mai 2010), la cinétique est définie comme *la vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle, de l'événement initiateur aux conséquences sur les éléments vulnérables.*

La cinétique d'un phénomène dangereux pourra être qualifiée de lente dans son contexte si elle permet la mise en œuvre de mesures de sécurité suffisantes dans le cadre d'un plan d'urgence interne et externe, pour protéger les personnes à l'extérieur de l'installation avant qu'elles ne soient atteintes par les effets du phénomène dangereux.

Dans le cadre de l'étude, **la durée d'exposition considérée est de 60 minutes**, correspondant à la durée maximale d'exposition envisagée pour les seuils d'effets toxiques dans l'Arrêté Ministériel du 29/05/2005 (cf. Tableau 2 : Valeurs de référence relatives aux seuils de toxicité aiguë).

Avec les débits d'air et de produits toxiques, les seuils équivalents retenus pour une exposition de 60 minutes sont :

- SEI équivalent : 24 408 ppm,
- SPEL équivalent : 86 397 ppm,
- SELS équivalent : 103 127 ppm

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
marchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

4.1.3 Evaluation de l'intensité des effets du phénomène dangereux n°2 - Conclusion

Les figures suivantes présentent les panaches de fumées (en coupe verticale dans le sens du vent) correspondant aux différents effets.

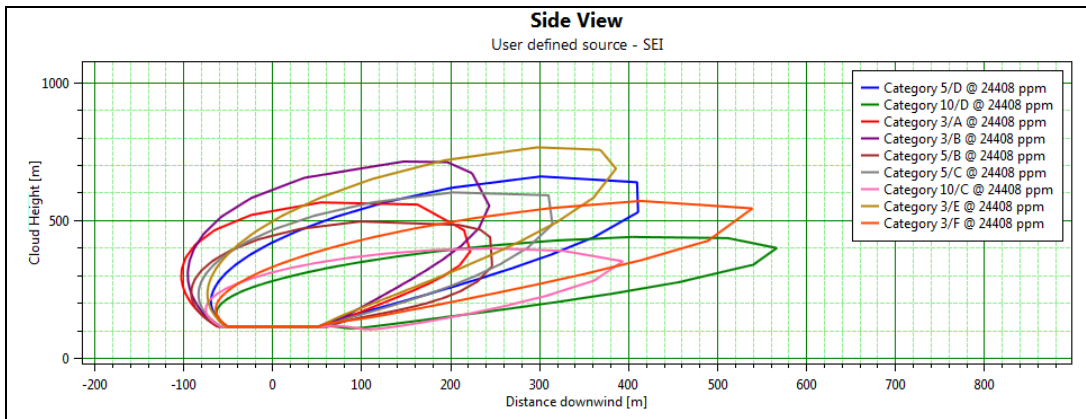


Figure 6 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

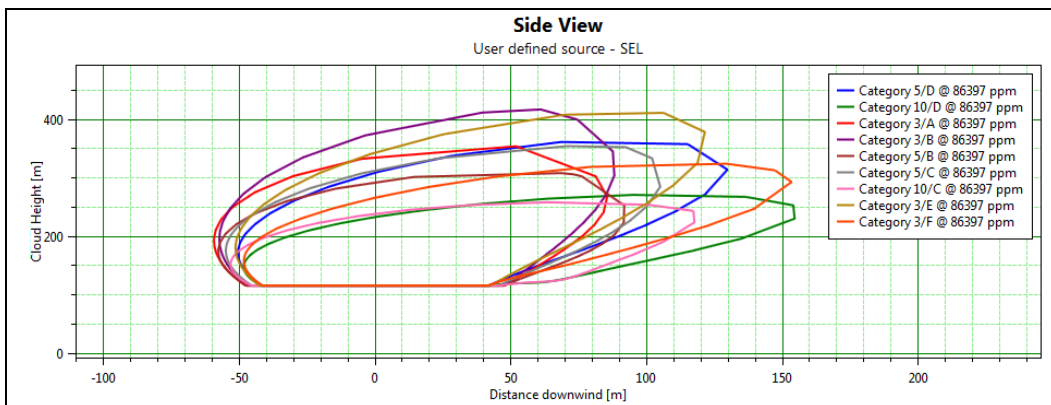


Figure 7 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

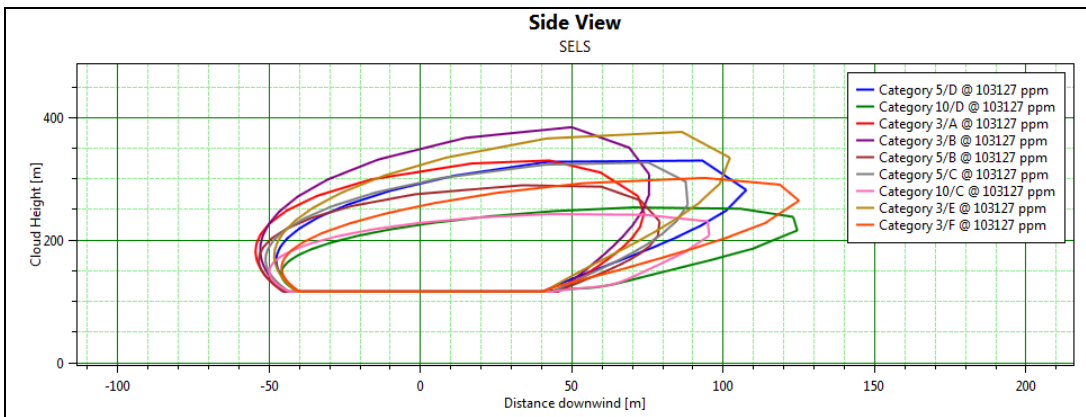


Figure 8 : Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
merchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Les distances d'effets pour une durée d'exposition de 60 minutes sont les suivantes :

Seuil	Distance
SEI	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet toxique n'est observé à hauteur d'homme (h < 2 m) • Hauteur minimale d'atteinte du seuil toxique : 105 m à 107 m de la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 566 m de la source à h = 400 m
SPEL	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet toxique n'est observé à hauteur d'homme (h < 2 m) • Hauteur minimale d'atteinte du seuil toxique : 116 m à la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 154 m de la source à h = 230 m
SELS	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun effet toxique n'est observé à hauteur d'homme (h < 2 m) • Hauteur minimale d'atteinte du seuil toxique : 116 m à la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 125 m de la source à h = 264 m

Tableau 27 : PhD2 – Distances d'effets (au sol et en hauteur)

GIRUS GE – Grenoble (38)
Modélisation des effets toxiques générés par les fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de
merchandises diverses – Brebières (62)
Rapport n° 92604/C

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable ; en conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou reproduction partielle de ce rapport et annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'ANTEA GROUP ne saurait engager la responsabilité de celle-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Rapport

Titre : Modélisation des fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage de marchandises diverses – Brebières (62)

Numéro et indice de version : 92604/C

Date d'envoi : Février 2018

Nombre de pages : 30

Diffusion (nombre et destinataires) : -

Nombre d'annexes dans le texte : -

Nombre d'annexes en volume séparé : -

Client

Coordonnées complètes :

GIRUS

43, Avenue du Vieux Chêne

38 240 MEYLAN

Téléphone : 04 76 18 17 86

Nom et fonction de l'interlocuteur : Virginie CHAMPEAU – 04 69 94 80 03 – vchampeau@elcimai.com

ANTEA

Unité réalisatrice : *Agence Rhône-Alpes-Méditerranée*

Nom des intervenants et fonction remplie dans le projet :

Interlocuteur commercial : Stéphane DUBOIS

Auteur : Antonin ROLLAND

Qualité

Contrôlé par : Stéphane DUBOIS

Date : *Février 2018 - Version C*

N° du projet : *PACP 170417*

Références et date de la commande : commande mail du 05/12/2017 + mail du 09/03/2018

Mots-clés : Modélisation, incendie, fumées