

BIGS – Paris (75)

*Modélisation des fumées d'incendie d'un entrepôt
de stockage*

Roullet Saint Estèphe (16)

*Novembre 2018
Rapport n° 96097/A*

BIGS

165bis, rue de Vaugirard
75015 PARIS
Téléphone : 01 56 54 33 99
Télécopie : 01 56 54 33 90

Antea Group

Région SUD

Pôle Environnement Dossiers réglementaires, Audit et Conseil



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
2.2 SEUILS D'EFFETS RETENUS DANS LE CADRE DE LA MODELISATION DES PHENOMENES DANGEREUX	9
3. MODELISATION DU PHENOMENE DANGEREUX N°1	12
3.1 ESTIMATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION	12
3.2 CARACTERISTIQUES DU TERME SOURCE	14
3.3 DUREE D'EXPOSITION	14
3.4 EVALUATION DE L'INTENSITE DES EFFETS DU PHENOMENE DANGEREUX N°2 - CONCLUSION	15
4. MODELISATION DU PHENOMENE DANGEREUX N°2	17
4.1 ESTIMATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION	17
4.2 CARACTERISTIQUES DU TERME SOURCE	19
4.3 DUREE D'EXPOSITION	20
4.4 EVALUATION DE L'INTENSITE DES EFFETS DU PHENOMENE DANGEREUX N°3 - CONCLUSION	21

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 (SEI) 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 : Cellule de 6 000 m ² – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type ...	12
Tableau 8 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule de 6 000 m ²	12
Tableau 9 : Caractéristiques de combustion des produits présents	13
Tableau 10 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes ..	13
Tableau 11 : Débits massiques de polluants.....	14
Tableau 12 : PhD1 – Distances d’effets (au sol et en hauteur)	16
Tableau 13 : Cellule frigo – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type	17
Tableau 14 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule frigo.....	17
Tableau 15 : Caractéristiques de combustion des produits présents	18
Tableau 16 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes ..	18
Tableau 17 : Composition des produits alimentaires	19
Tableau 18 : Débits massiques de polluants.....	19
Tableau 19 : PhD2 – Distances d’effets (au sol et en hauteur)	22

Liste des Figures

Figure 1 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	15
Figure 2 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	15
Figure 3 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	16
Figure 4 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	21
Figure 5 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	21
Figure 6 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées	22

1. Introduction

Dans le cadre de la réalisation d'une étude de dangers d'un entrepôt situé à Roulet Saint Estèphe (16), BIGS souhaite un appui technique pour la réalisation de l'étude de dispersion atmosphérique d'incendies de cellules de stockage de matières diverses **afin de pouvoir évaluer les éventuels effets toxiques générés.**

Les 2 cas étudiés dans le présent rapport sont :

- Phénomène dangereux n°1 : Incendie de 1 cellule :
 - 1 cellule de stockage de 6 000 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 5 880 t ;

- Phénomène dangereux n°2 : Incendie de 1 cellule :
 - 1 cellule frigorifique de 4271 m² stockant des produits alimentaires d'une contenance de 2 400 t. Cette cellule est composée de parois en polyuréthane haute densité sans HCFC¹ d'une masse d'environ 30,33 t.

¹ HCFC : HydroChloroFluoroCarbures

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/semi-urbain),
- 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	Instable < -----> Stable								
	A	B		C		D		E	F
Vitesse du vent (m/s)	3	3	5	5	10	5	10	3	3
T° ambiante (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	15
T° du sol (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	15
Humidité relative (%)	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Rayonnement solaire (kW/m ²)	0,5	0,5	0,5	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.

2.2 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

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 2010², 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.

² 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.

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	10	Pas de valeur SEI en France compte-tenu des études disponibles (Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-12727A) Utilisation de l'ERPG-2 (cf. Tableau 3)
NO ₂	40	Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-13333A

Tableau 4 : Seuils d'effets irréversibles (SEI) 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 conservative 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 conservative 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 conservative 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

3. Modélisation du phénomène dangereux n°1

3.1 Estimation de la vitesse de combustion

Le scénario étudié est l'incendie d'une cellule :

- 1 cellule de stockage de 6 000 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 5 880 t.

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 2662/2663
Bois	5 %
Polypropylène (PP)	19 %
Polyéthylène (PE)	19 %
Polystyrène (PS)	19 %
PVC	19 %
Polyuréthane (PU)	19 %

Tableau 7 : Cellule de 6 000 m² – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type

Les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 9 800³ palettes de type 2662/2663) :

Matériaux	Quantité présente en tonnes
Bois	294,0
Polypropylène (PP)	1117,2
Polyéthylène (PE)	1117,2
Polystyrène (PS)	1117,2
PVC	1117,2
Polyuréthane (PU)	1117,2
Total	5 880

Tableau 8 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule de 6 000 m²

³ 9 800 palettes de 600 kg soit 5 880 tonnes

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

Tableau 9 : 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)	1117,2	14	43,40
Polyéthylène (PE)	1117,2	14	43,60
Polystyrène (PS)	1117,2	35	39,20
PVC	1117,2	21,7	16,40
PU	1117,2	26	23,20
Bois	294,0	13	16,40
Caractéristiques moyennes de combustion du stockage		21,68	32,32

Tableau 10 : 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 21,68 g/m²/s,
- un pouvoir calorifique de 32,32 MJ/kg.

3.2 Caractéristiques du terme source

La surface de la zone de stockage est de 6 000 m².

Les débits de polluants sont calculés selon la méthodologie présentée au chapitre 2.1, en considérant une vitesse de régression moyenne de 21,68 g/m²/s. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Composé	CO ₂	CO	HCl	HCN	NO ₂	Air	Fumées totales
Débit massique (en kg/s)	289,9	18,4	14,5	1,6	2,6	13 294	13 621

Tableau 11 : Débits massiques de polluants

Le débit total des fumées (polluants + air entraîné) est de 13 621 kg/s au sommet des flammes.

La hauteur d'émission des fumées toxiques, calculée selon méthodologie présentée au chapitre 2.1.3, est de 60 m.

3.3 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 : 17 712 ppm,
- SPEL équivalent : 73 353 ppm,
- SELS équivalent : 98 635 ppm.

BIGS – Paris (75)
Modélisation des fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage
Roulet Saint Estèphe (16)
Rapport n° 96097/A

3.4 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.

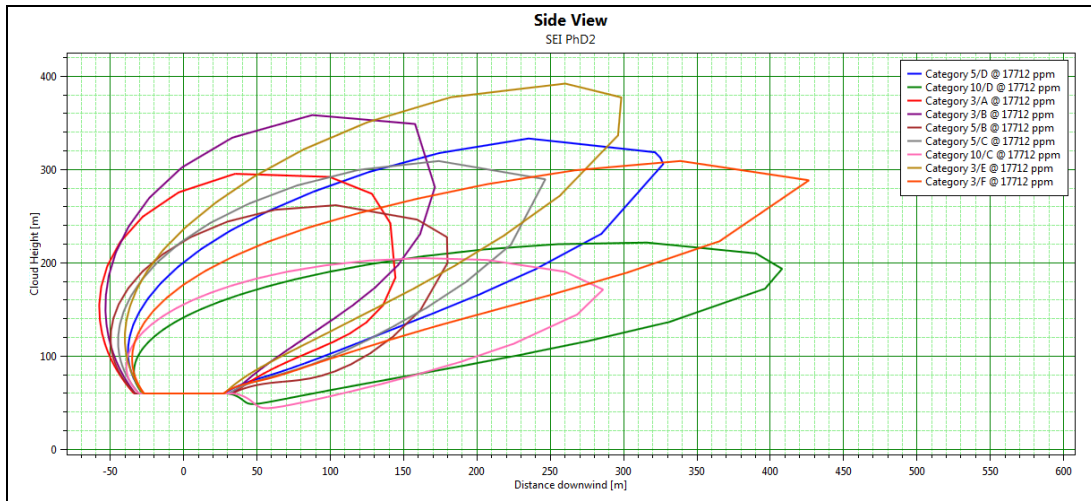


Figure 1 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

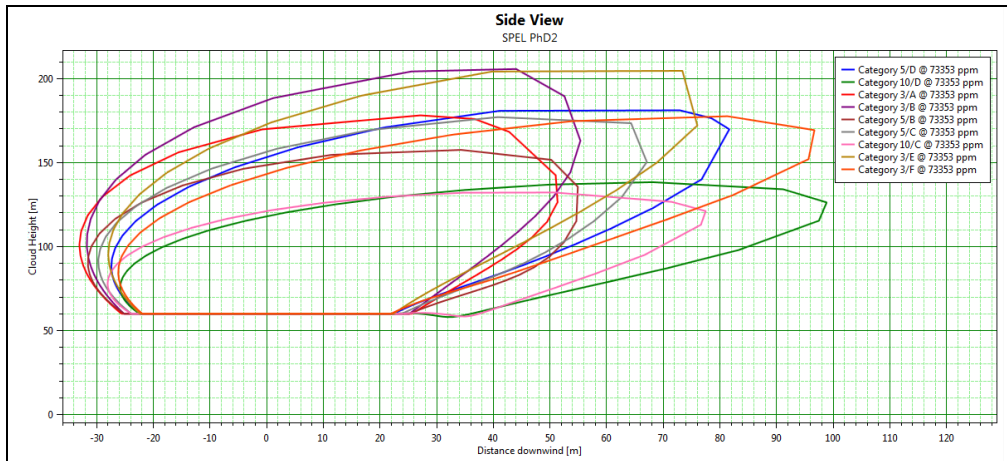


Figure 2 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

BIGS – Paris (75)
 Modélisation des fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage
 Rouillet Saint Estèphe (16)
 Rapport n° 96097/A

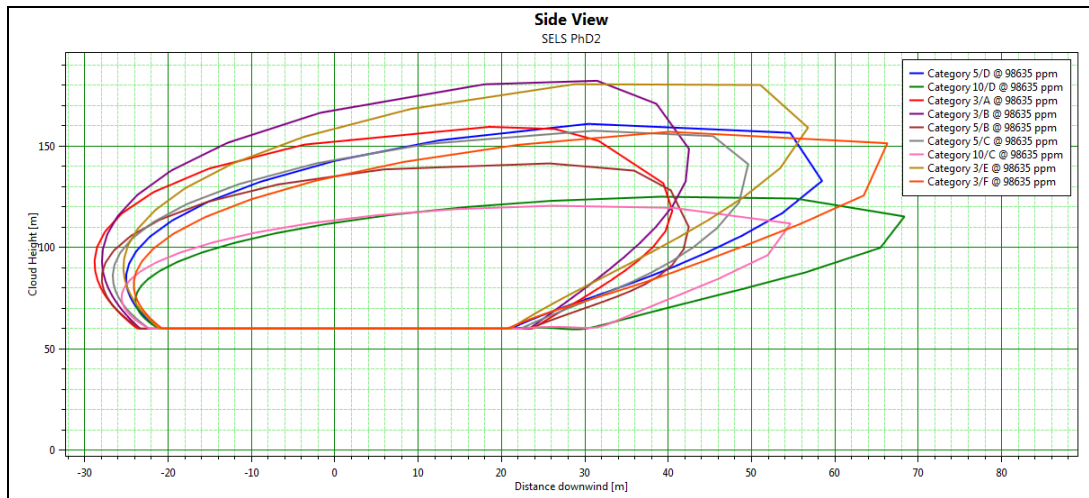


Figure 3 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

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 : 44 m à 54 m de la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 426 m de la source à h = 288 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 : 58 m à 32 m de la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 98 m de la source à h = 126 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 : 60 m à la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 68 m de la source à h = 115 m

Tableau 12 : PhD1 – Distances d'effets (au sol et en hauteur)

4. Modélisation du phénomène dangereux n°2

4.1 Estimation de la vitesse de combustion

Le scénario étudié est l'incendie d'une cellule :

- 1 cellule frigorifique de 4 271 m² stockant des produits alimentaires d'une contenance de 2 400 t. Cette cellule est composée de parois en polyuréthane haute densité sans HCFC d'une masse d'environ 30,33 t.

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 produit alimentaire
Bois	5 %
Fromage	31,6 %
Viande	31,6 %
Céréales	31,6 %

Tableau 13 : Cellule frigo – Proportions de matériaux dans les différentes palettes type

Les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes (sur la base de 4 000⁴ palettes alimentaires et de 30,33 t de parois en polyuréthane) :

Matériaux	Quantité présente en tonnes
Bois	120
Fromage	760
Viande	760
Céréales	760
Polyuréthane (PU) (parois)	30,33
Total	2 430,33

Tableau 14 : Quantités de matières combustibles présentes dans la cellule frigo

⁴ 4 000 palettes de 600 kg soit 2 400 tonnes

Les caractéristiques des combustibles présents sont les suivantes :

Matériaux	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	Source	PCI (MJ/kg)	Source
Fromage	13	Institut international du froid (repris dans rapport FLUMILOG - Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt)	15	Hypothèse Antea Group : vitesse de combustion relativement faible compte tenu du faible pouvoir calorifique
Céréales	17		30	Borne supérieure des ordres de grandeurs usuels proposés dans le Guide Entrepôts 1510
Viandes	25		30	Borne supérieure des ordres de grandeurs usuels proposés dans le Guide Entrepôts 1510
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

Tableau 15 : 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)
Fromage	760	13	15
Céréales	760	17	30
Viandes	760	25	30
Polyuréthane (PU)	30,33	26	23,2
Bois	120	13	16,4
Caractéristiques moyennes de combustion du stockage		18,17	24,55

Tableau 16 : 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 18,17 g/m²/s,
- un pouvoir calorifique de 24,55 MJ/kg.

4.2 Caractéristiques du terme source

La surface de la zone de stockage est de 4 271 m².

Le tableau ci-dessous détaille comment les produits alimentaires ont été modélisés afin d'étudier leurs émissions lors de l'incendie de la cellule :

Produit	Assimilé à	Formule
Viande	La viande a été assimilée à la composition chimique moyenne d'un corps humain de 70 kg. Soit : Oxygène : 45 220 g Azote : 2 170 g Chlore : 280 g Carbone : 12 600 g Calcium : 1 330 g Potassium : 252 g Hydrogène : 7 000 g Phosphore : 770 g Soufre : 175 g	$C_{0,3589} H_{0,556} N_{0,172}$ $Ca_{0,106} P_{0,061} Cl_{0,022}$ $K_{0,020} S_{0,014}$
Céréales	Le <i>Guide pour la conception et l'exploitation, de silos de stockage de produits agro-alimentaires vis-à-vis des risques d'explosion et d'incendie</i> de l'INERIS, donne une formule chimique pour les poussières de céréales. Celle-ci sont constitué de : - 65,3 % d'amidon - 6,8 % de fibres (cellulose), - 4 % de lipides - 6,5 % de protéine - 9 % d'humidité et 8 % de cendres (les variations du taux d'humidité et du taux de cendres peuvent être très importantes)	$C_{3,57} H_{5,89} O_{2,59} N_{0,07}$
Fromage	Le fromage a été assimilée à du Lactose	$C_{12} H_{22} O_{11}$

Tableau 17 : Composition des produits alimentaires

Les débits de polluants sont calculés selon la méthodologie présentée au chapitre 2.1, en considérant une vitesse de régression moyenne de 18,17 g/m²/s. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Composé	CO ₂	CO	HCl	HCN	NO ₂	SO ₂	Air	Fumées totales
Débit massique (en kg/s)	91,4	5,8	0,1	0,5	0,8	0,12	6 074	6 172

Tableau 18 : Débits massiques de polluants

Le débit total des fumées (polluants + air entraîné) est de 6 172 kg/s au sommet des flammes.

La hauteur d'émission des fumées toxiques, calculée selon méthodologie présentée au chapitre 2.1.3, est de 44 m.

4.3 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 : 56 403 ppm,
- SPEL équivalent : 172 447 ppm,
- SELS équivalent : 213 021 ppm.

4.4 Evaluation de l'intensité des effets du phénomène dangereux n°3 - Conclusion

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

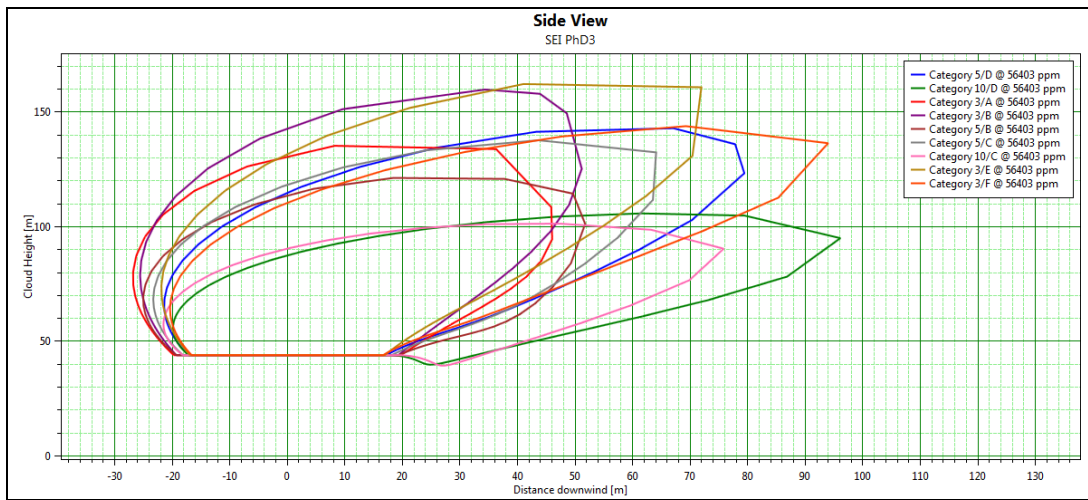


Figure 4 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

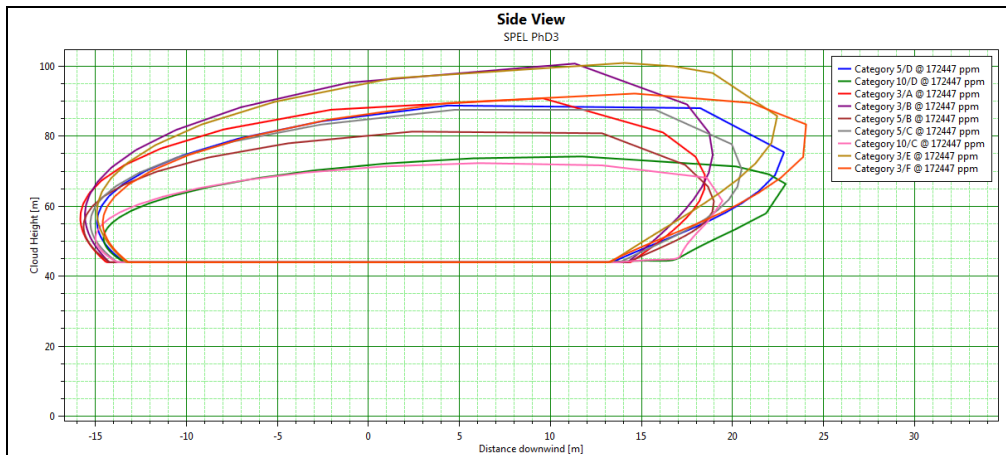


Figure 5 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

*BIGS – Paris (75)
Modélisation des fumées d'incendie d'un entrepôt de stockage
Rouillet Saint Estèphe (16)
Rapport n° 96097/A*

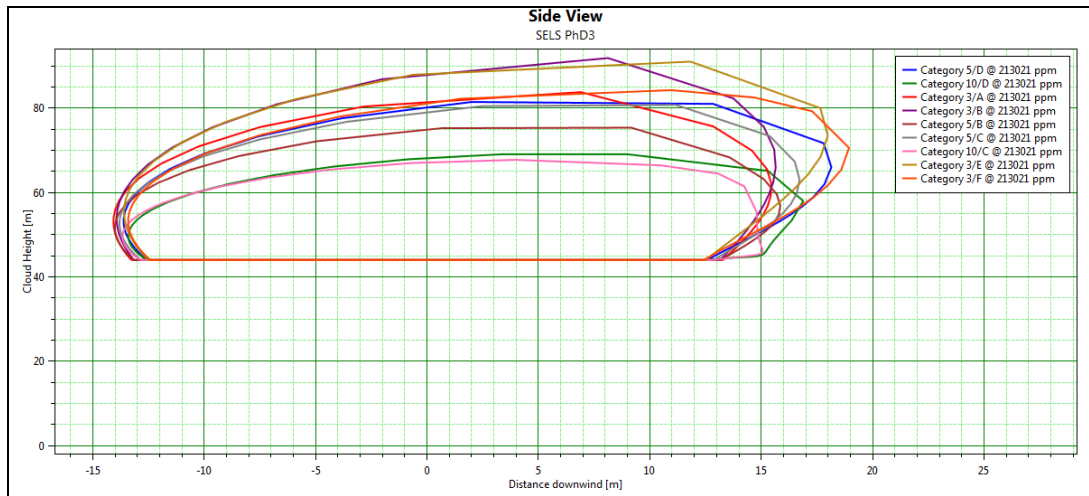


Figure 6 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

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 : 39 m à 26 m de la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 96 m de la source à h = 94 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 : 44 m à la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 24 m de la source à h = 83 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 : 44 m à la source • Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 18 m de la source à h = 70 m

Tableau 19 : PhD2 – Distances d'effets (au sol et en hauteur)

BIGS – Paris (75)
Modélisation des fumées d’incendie d’un entrepôt de stockage
Roulet Saint Estèphe (16)
Rapport n° 96097/A

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 - Roulet Saint Estèphe (16)

Numéro et indice de version : 96097/A

Date d'envoi : Novembre 2018

Nombre de pages : 23

Diffusion (nombre et destinataires) : -

Nombre d'annexes dans le texte : -

Nombre d'annexes en volume séparé : -

Client

Coordonnées complètes : *BIGS*
165bis, rue de Vaugirard
75015 PARIS
Tél. : 01 56 54 33 99
Fax : 01 56 54 33 90

Nom et fonction de l'interlocuteur : Stéphane RODRIGUEZ

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 : 06/11/2018 - *Version A*



N° du projet : *PACP180129*

Références et date de la commande : *BET902-Intermarché Roulet St Estèphe* en date du 04 octobre 2018

Mots-clés : *Modélisation, incendie, fumées*