



JJA

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

Site de Croixrault (80)



Rapport n°104305/Version A – Mars 2020

Fiche signalétique du dossier




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

| CLIENT | SITE |
|--|--|
| BEG Ingénierie | JJA |
| 31 rue Henri Poincaré CS 46215 45062 ORLEANS Cedex 2 | JJA ZAC de la Mine d'Or Croixrault |
| Isabelle RELLSTAB Responsable ICPE 06.13.80.37.52/ 02.38.51.56.56 Isabelle.rellstab@beg-ing.com | / |

RAPPORT D'ANTEA GROUP

| | |
|---|---|
| Responsable du projet | Antonin ROLLAND |
| Interlocuteur commercial | Antonin ROLLAND |
| | Implantation d'Aubagne (13) |
| Implantation chargée du suivi du projet | 04.42.08.70.70 secretariat.marseille-fr@anteagroup.com |
| Rapport n° | Rapport n°104305 |
| Version n° | A |
| Votre commande et date | Bon pour accord du 28 février 2020 |
| Projet n° | PACP 200025 |

Elaboration du dossier

| Rôle | Nom | Fonction | Date | Signature |
|-------------------|----------------------|------------------------------------|------------|---|
| Rédaction | ROLLAND Antonin | Ingénieur d'études | 19/03/2020 |  |
| Approbation | MARTY Anne-Catherine | Responsable Pôle Environnement SUD | 20/03/2020 |  |
| Relecture qualité | DUBOIS Stéphane | Chef de projets | 20/03/2020 |  |

Suivi des modifications

| Indice Version | Date de révision | Nombre de pages | Nombre d'annexes | Objet des modifications |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| A | Mars 2020 | 47 | 0 | Version finale |
| | | | | |
| | | | | |

Sommaire

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 7 |
| 2. METHODES ET MOYENS DE CALCUL UTILISES POUR LA MODELISATION DES PHENOMENES DANGEREUX | 8 |
| 2.1. Evaluation des effets toxiques des fumées d'incendie | 8 |
| 2.1.1. Méthodes et moyens de calcul mis en application | 8 |
| 2.1.2. Caractérisation des débits de polluants | 8 |
| 2.1.3. Calcul de la puissance thermique totale | 9 |
| 2.1.4. Calcul de la hauteur d'émission des fumées et de l'air entraîné | 10 |
| 2.1.5. Modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants | 10 |
| 2.1.6. Seuils d'effets retenus pour la modélisation des phénomènes dangereux | 12 |
| 2.2. Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie | 15 |
| 2.2.1. Concentration volumique des suies | 15 |
| 2.2.2. Critères de référence | 15 |
| 2.2.3. Calcul de l'atténuation optique | 16 |
| 2.2.4. Evaluation de la perte de visibilité | 17 |
| 3. MODELISATION DE LA DISPERSION DE FUMÉES - PHENOMENE DANGEREUX N°1 | 18 |
| 3.1. Evaluation des effets toxiques liés aux fumées | 18 |
| 3.1.1. Estimation de la vitesse de combustion | 18 |
| 3.1.2. Caractéristiques du terme source | 20 |
| 3.1.3. Durée d'exposition | 21 |
| 3.1.4. Evaluation de l'intensité des effets toxiques | 21 |
| 3.2. Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie | 24 |
| 3.2.1. Données d'entrée | 24 |
| 3.2.2. Résultats | 25 |
| 4. MODELISATION DE LA DISPERSION DE FUMÉES - PHENOMENE DANGEREUX N°2 | 27 |
| 4.1. Evaluation des effets toxiques liés aux fumées | 27 |
| 4.1.1. Estimation de la vitesse de combustion | 27 |
| 4.1.2. Caractéristiques du terme source | 29 |
| 4.1.3. Durée d'exposition | 30 |
| 4.1.4. Evaluation de l'intensité des effets toxiques | 30 |
| 4.2. Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie | 33 |
| 4.2.1. Données d'entrée | 33 |
| 4.2.2. Résultats | 34 |
| 5. MODELISATION DE LA DISPERSION DE FUMÉES - PHENOMENE DANGEREUX N°3 | 36 |
| 5.1. Evaluation des effets toxiques liés aux fumées | 36 |
| 5.1.1. Estimation de la vitesse de combustion | 36 |
| 5.1.2. Caractéristiques du terme source | 38 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.1.3. | <i>Durée d'exposition</i> | 39 |
| 5.1.4. | <i>Evaluation de l'intensité des effets toxiques</i> | 40 |
| 5.2. | Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie | 43 |
| 5.2.1. | <i>Données d'entrée</i> | 43 |
| 5.2.2. | <i>Résultats</i> | 44 |
| 6. | BILAN | 46 |

Figures

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 1 : | PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 21 |
| Figure 2 : | PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 22 |
| Figure 3 : | PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées | 22 |
| Figure 4 : | PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 25 |
| Figure 5 : | PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 25 |
| Figure 6 : | PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 30 |
| Figure 7 : | PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 31 |
| Figure 8 : | PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées | 31 |
| Figure 9 : | PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 34 |
| Figure 10 : | PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées | 34 |
| Figure 11 : | PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées..... | 40 |
| Figure 12 : | PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées | 40 |
| Figure 13 : | PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées | 41 |
| Figure 14 : | PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées | 44 |
| Figure 15 : | PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées | 44 |

Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Emissions massiques en composés gazeux par masse unitaire de l'élément initial | 9 |
| Tableau 2 : Conditions météorologiques retenues pour la modélisation..... | 10 |
| Tableau 3 : Valeurs de référence relatives aux seuils de toxicité aiguë..... | 12 |
| Tableau 4 : Valeurs seuils de toxicité aiguë à retenir en l'absence de connaissance en toxicologie..... | 13 |
| Tableau 5 : Seuils d'effets irréversibles (SEI) pour des expositions de 60 minutes | 13 |
| Tableau 6 : Seuils des premiers effets létaux (SPEL) pour des expositions de 60 minutes..... | 14 |
| Tableau 7 : Seuils d'effets létaux significatifs (SELS) pour des expositions de 60 minutes..... | 14 |
| Tableau 8 : Distance de visibilité en fonction de la concentration en suies dans les fumées..... | 17 |
| Tableau 9 : Proportions de matériaux dans les différentes palettes type – PhD1..... | 18 |
| Tableau 10 : Quantités de matières combustibles présentes – PhD1..... | 18 |
| Tableau 11 : Caractéristiques de combustion des produits présents – PhD1..... | 19 |
| Tableau 12 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes – PhD1 | 19 |
| Tableau 13 : Composition des produits – PhD1 | 20 |
| Tableau 14 : Débits massiques de polluants – PhD1..... | 20 |
| Tableau 15 : Distances d'effets (au sol et en hauteur) – PhD1 | 23 |
| Tableau 16 : PhD1 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées..... | 24 |
| Tableau 17 : PhD1 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur) | 26 |
| Tableau 18 : Proportions de matériaux dans les différentes palettes type – PhD2..... | 27 |
| Tableau 19 : Quantités de matières combustibles présentes – PhD2..... | 27 |
| Tableau 20 : Caractéristiques de combustion des produits présents – PhD2..... | 28 |
| Tableau 21 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes – PhD2 | 28 |
| Tableau 22 : Composition des produits – PhD2 | 29 |
| Tableau 23 : Débits massiques de polluants – PhD2..... | 29 |
| Tableau 24 : Distances d'effets (au sol et en hauteur) – PhD2 | 32 |
| Tableau 25 : PhD2 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées..... | 33 |
| Tableau 26 : PhD2 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur) | 35 |
| Tableau 27 : Proportions de matériaux dans les différentes palettes type – PhD3..... | 36 |
| Tableau 28 : Quantités de matières combustibles présentes – PhD3..... | 37 |
| Tableau 29 : Caractéristiques de combustion des produits présents – PhD3..... | 37 |
| Tableau 30 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes – PhD3 | 38 |
| Tableau 31 : Composition des produits – PhD3 | 38 |
| Tableau 32 : Débits massiques de polluants – PhD3..... | 39 |
| Tableau 33 : Distances d'effets (au sol et en hauteur) – PhD3 | 42 |
| Tableau 34 : PhD3 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées..... | 43 |
| Tableau 35 : PhD3 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur) | 45 |

1. Introduction

Dans le cadre de la réalisation d'une étude de dangers d'un entrepôt situé à Croixrault (80), BEG souhaite un appui technique pour la réalisation de l'étude de dispersion atmosphérique d'un incendie de cellules de stockage **afin de pouvoir évaluer les éventuels effets toxiques et les pertes de visibilité générées par les fumées de l'incendie.**

Les cas étudiés dans le présent rapport sont :

- Phénomène dangereux n°1 : Incendie de la cellule C :
 - 1 cellule de stockage de 11 800 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 9 393 t ;
- Phénomène dangereux n°2 : Incendie de la cellule D1 :
 - 1 cellule de stockage de 830 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 1 194 t ainsi que 75 t de Symclosène (acide trichloroisocyanurique)¹ ;
- Phénomène dangereux n°3 : Incendie généralisé des cellules A1 et D1 :
 - Cellule A1 : cellule de stockage de 10 970 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 9 393 t ;
 - Cellule D1 : cellule de stockage de 830 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 1 194 t ainsi que 75 t de Symclosène (acide trichloroisocyanurique).

¹ Le Symclosène est un produit pour piscine. Il se présente sous forme de galets.

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 :

Tableau 1 : Emissions massiques en composés gazeux par masse unitaire de l'élément initial

| 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

La puissance thermique totale est déterminée par la relation suivante :

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

Avec :

M Vitesse de combustion (en g/m²/s)

PCI Pouvoir Calorifique Inférieur (en J/g)

S 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) :

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

Avec : 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 :

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

Avec : \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.

Tableau 2 : Conditions météorologiques retenues pour la modélisation

| 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/m²) | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0 |

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 .

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

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 | Diamètre de la cheminée |
| w_s | Vitesse des gaz rejetés à la cheminée |
| g | Accélération de la gravité |
| T | Température ambiante |
| θ | Température potentielle |
| Z | Altitude |

2.1.6. Seuils d'effets retenus pour 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.

Tableau 3 : Valeurs de référence relatives aux seuils de toxicité aiguë

| 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'Écologie 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 | |

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 :

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.

Tableau 4 : Valeurs seuils de toxicité aiguë à retenir en l'absence de connaissance en toxicologie

| | 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

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.

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

Tableau 5 : Seuils d'effets irréversibles (SEI) pour des expositions de 60 minutes

| Substances dégagées | SEI (ppm) | Référence de la valeur seuil retenue |
|---------------------|-----------|---|
| CO | 800 | Seuils de toxicité aiguë – INERIS– DRC-09-103128-05616A |
| CO ₂ | 20 000 | Pas de seuils de toxicité aiguë 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 4) |
| NO ₂ | 40 | Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-13333A |
| SO ₂ | 81 | Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-12130A |

Tableau 6 : Seuils des premiers effets létaux (SEPL) pour des expositions de 60 minutes

| Substances dégagées | SEL (ppm) | Référence de la valeur seuil retenue |
|---------------------|-----------|--|
| CO | 3 200 | Seuils de toxicité aiguë – INERIS– DRC-09-103128-05616A |
| CO ₂ | 20 000 | Pas de seuils de toxicité aiguë 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 |
| SO ₂ | 725 | Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-12130A |

Tableau 7 : Seuils d'effets létaux significatifs (SELS) pour des expositions de 60 minutes

| Substances dégagées | SELS (ppm) | Référence de la valeur seuil retenue |
|---------------------|------------|--|
| 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 aiguë 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 |
| SO ₂ | 858 | Seuils de toxicité aiguë – INERIS–DRC-08-94398-12130A |

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 :

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

Avec :

| | |
|-----------------------|---|
| C_s^v | Concentration volumique des suies |
| C_f^v | Concentration volumique des fumées |
| $\rho(\text{fumées})$ | Masse volumique des fumées (kg/m^3) : définie avec PHAST |
| $\rho(\text{suies})$ | Masse volumique des suies (kg/m^3) : 1200 kg/m^3 (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 ci-dessous :

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

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 :

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

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

On a ainsi :

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

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

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

Tableau 8 : Distance de visibilité en fonction de la concentration en suies dans les fumées

| Visibilité | < 50 m | < 100 m |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Concentrations en suies | $3,6.10^{-3}$ ppm | $1,8.10^{-3}$ ppm |

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 de la dispersion de fumées - Phénomène dangereux n°1

3.1. Evaluation des effets toxiques liés aux fumées

3.1.1. Estimation de la vitesse de combustion

Le cas étudié ici est l'incendie de la cellule C de 11 800 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 9 393 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.

Tableau 9 : Proportions de matériaux dans les différentes palettes type – PhD1

| Matériaux | Palette type 2662/2663 |
|------------------------------|------------------------|
| Bois | 5 % |
| Polypropylène (PP) | 19 % |
| Polyéthylène (PE) | 19 % |
| Polystyrène (PS) | 19 % |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 19 % |
| Polyuréthane (PU) | 19 % |

Les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes, sur la base de 15 660 palettes de 600 kg de type 2662/2663³ :

Tableau 10 : Quantités de matières combustibles présentes – PhD1

| Matériaux | Quantité présente en tonnes (palette 2662/2663) |
|------------------------------|--|
| Bois | 469,8 |
| Polypropylène (PP) | 1 785,2 |
| Polyéthylène (PE) | 1 785,2 |
| Polystyrène (PS) | 1 785,2 |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 1 785,2 |
| Polyuréthane (PU) | 1 785,2 |
| Total en tonnes | 9 396 |

³ 15 660 palettes de 600 kg soit 9 396 tonnes

Les caractéristiques des combustibles présents sont les suivantes :

Tableau 11 : Caractéristiques de combustion des produits présents – PhD1

| Matériaux | Vitesse de combustion (g/m ² /s) | Source | PCI (MJ/kg) | Source |
|------------------------------|---|--|-------------|---|
| Bois | 13 | Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale | 16,4 | SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002 |
| 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 |
| Polychlorure de vinyle (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 |

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

Tableau 12 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes – PhD1

| Matériaux | Quantité présente (en tonnes) | Vitesse de combustion (g/m ² /s) | PCI (MJ/kg) |
|--|-------------------------------|---|--------------|
| Bois | 469,8 | 13 | 16,4 |
| Polypropylène (PP) | 1 785,2 | 14 | 43,4 |
| Polyéthylène (PE) | 1 785,2 | 14 | 43,6 |
| Polystyrène (PS) | 1 785,2 | 35 | 39,2 |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 1 785,2 | 21,7 | 16,4 |
| Polyuréthane (PU) | 1 785,2 | 26 | 23,2 |
| Caractéristiques moyennes de combustion du stockage | | 21,68 | 32,32 |

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.

3.1.2. Caractéristiques du terme source

La surface de la zone de stockage totale est de 11 800 m².

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

Tableau 13 : Composition des produits – PhD1

| Produit | Assimilé à | Formule |
|------------------------------|--|--|
| Bois | Le bois a été assimilé à de la cellulose | (C ₆ H ₁₀ O ₅)-n |
| Polypropylène (PP) | Le PP a été assimilé à du PP | (C ₃ H ₆)-n |
| Polyéthylène (PE) | Le PE a été assimilé à du PE | (C ₂ H ₄)-n |
| Polystyrène (PS) | Le PS a été assimilé à du PS | (CH ₂ CH-Ph)-n |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | Le PVC a été assimilé à du PVC | (CH ₂ CHCl)-n |
| Polyuréthane (PU) | Le PU a été assimilé à du PU | (C ₃ H ₅ O ₂ N)-n |

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 :

Tableau 14 : Débits massiques de polluants – PhD1

| Composé | CO | CO ₂ | HCN | NO ₂ | HCl | Air | Fumées totales |
|--------------------------|------|-----------------|-----|-----------------|------|--------|----------------|
| Débit massique (en kg/s) | 36,3 | 570,2 | 3,1 | 5,2 | 28,5 | 26 145 | 26 789 |

Le débit total des fumées (polluants + air entraîné) est de 26 789 kg/s au sommet des flammes.

La hauteur d'émission des fumées toxiques, calculée selon méthodologie présentée au chapitre 2.1.3, est de 79 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 3 : 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 : 17 873 ppm,
- SPEL équivalent : 76 202 ppm,
- SELS équivalent : 103 857 ppm.

3.1.4. Evaluation de l'intensité des effets toxiques

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

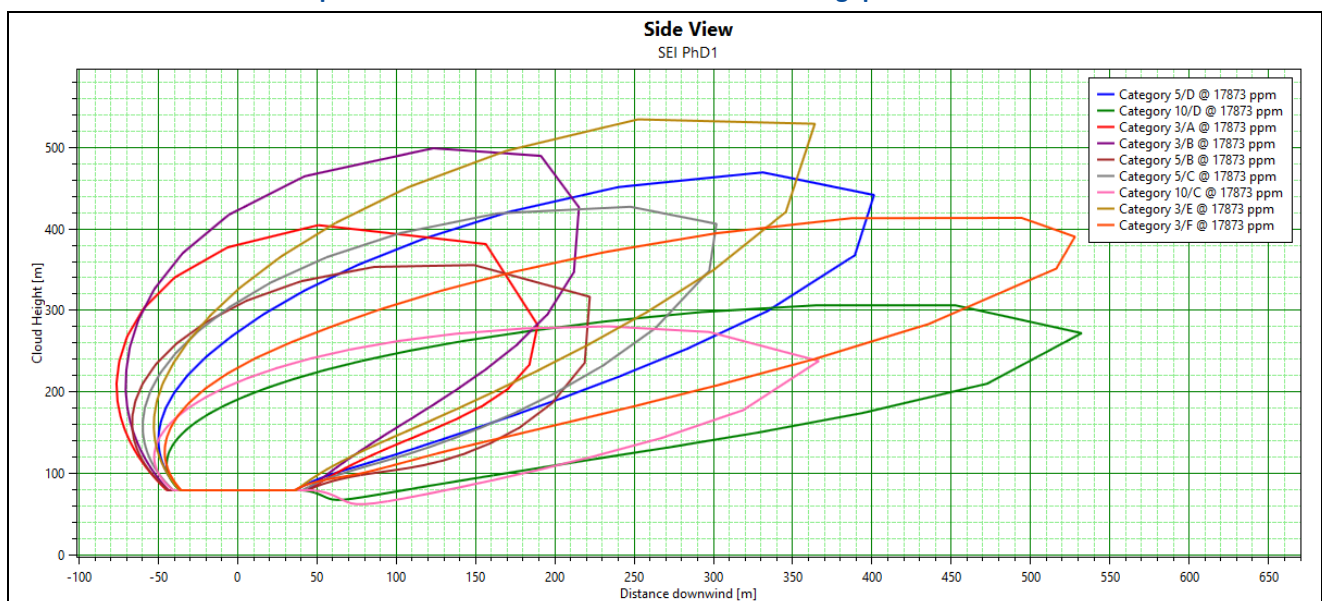


Figure 2 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

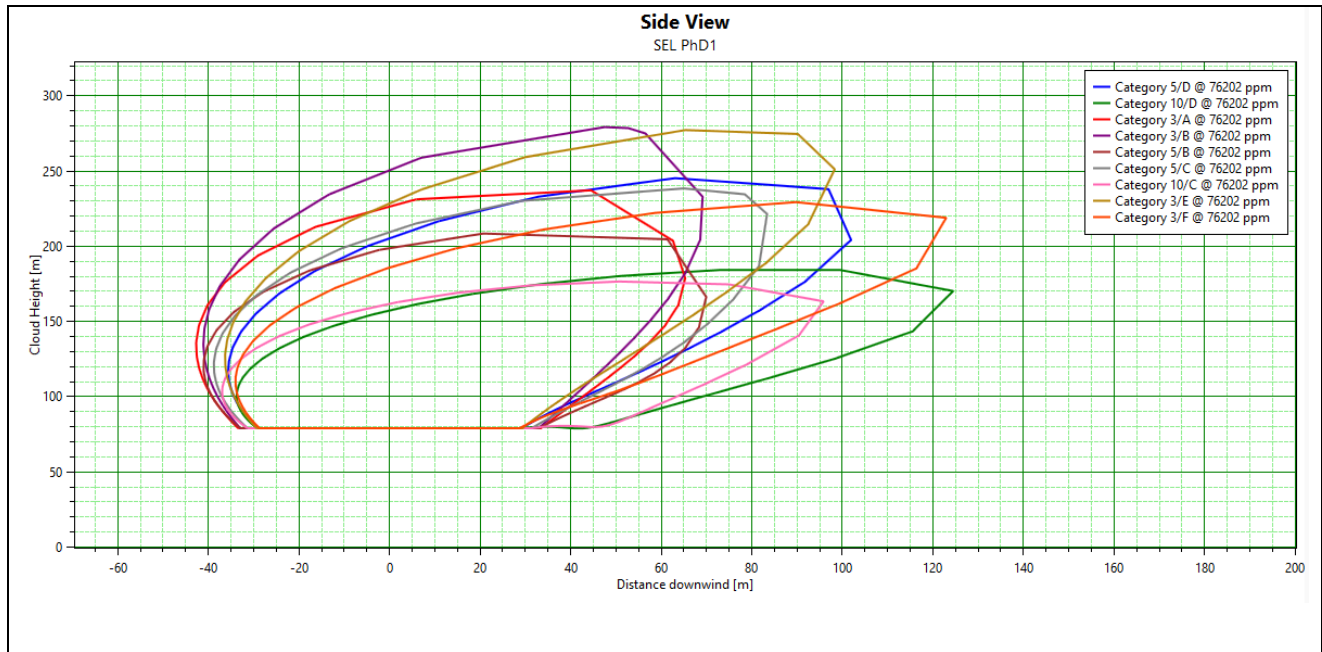
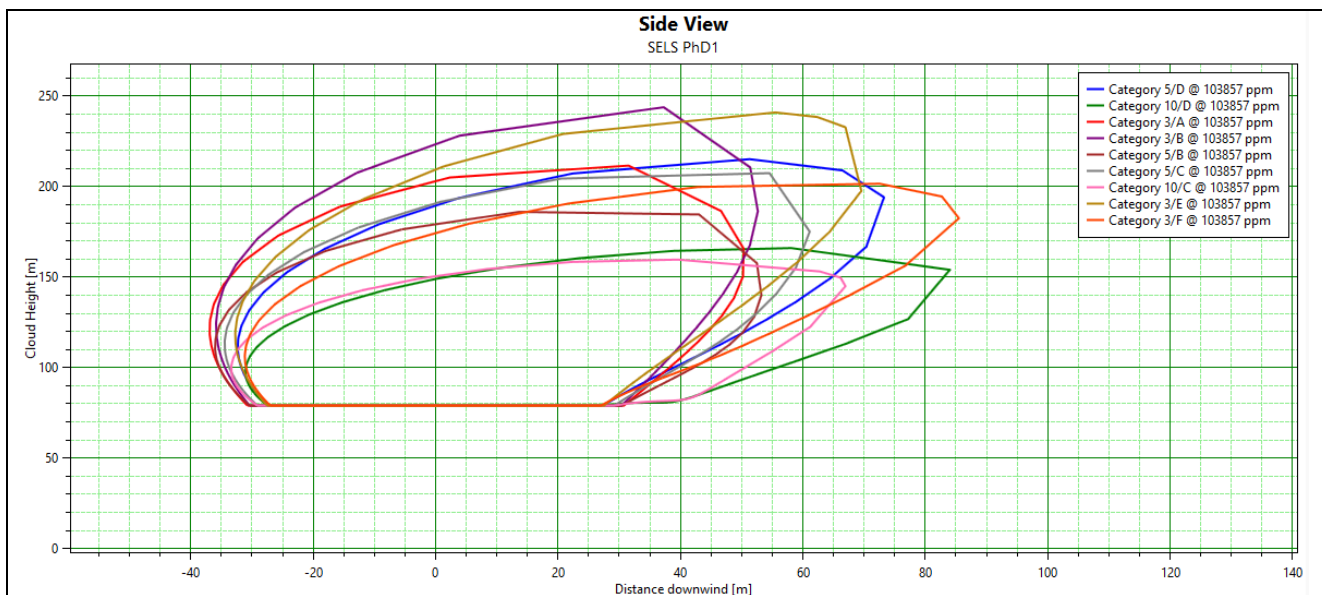


Figure 3 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées



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

Tableau 15 : Distances d'effets (au sol et en hauteur) – PhD1

| 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 : 61 m à 75 m de la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 532 m de la source à $h = 272$ 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 : 79 m à la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 124 m de la source à $h = 170$ 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 : 79 m à la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 84 m de la source à $h = 154$ m |

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

3.2.1. Données d'entrée

Les données d'entrées sont les suivantes :

- Débit massique de combustion : 255,82 kg/s ;
- Débit de suies : 13,01 kg/s ($0,116^4 \times$ débit massique de combustion) ;
- Débit des fumées : 26 789 kg/s ;
- Ratio suies/fumées = $1,11 \cdot 10^{-3}$ [kg/kg] ;
- $\rho(\text{fumées})$: 0,66 kg/m³ (donnée PHAST) ;
- $\rho(\text{suies})$: 1 200 kg/m³.

Ainsi, à l'aide de la formule énoncée au paragraphe 2.2.1 et à partir du ratio suies/fumées et des masses volumiques de ces produits, on obtient :

$$C_s^v = 6,09 \cdot 10^{-7} C_f^v$$

Avec :

C_s^v : concentration volumique des suies (ppm)

C_f^v : concentration volumique des fumées (ppm)

Ainsi, les concentrations en fumées à rechercher dans PHAST sont :

Tableau 16 : PhD1 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées

| Visibilité | < 50 m | < 100 m |
|--------------------------|-----------|-----------|
| Concentrations en fumées | 5 909 ppm | 2 954 ppm |

⁴ 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)

3.2.2. Résultats

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 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

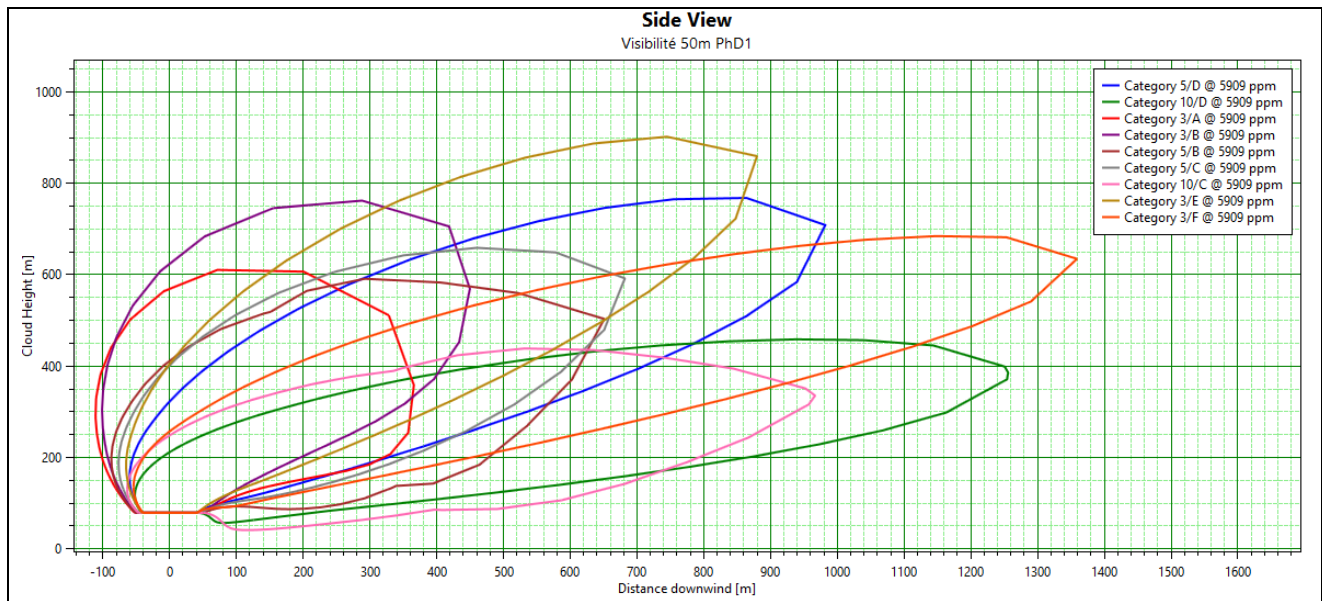
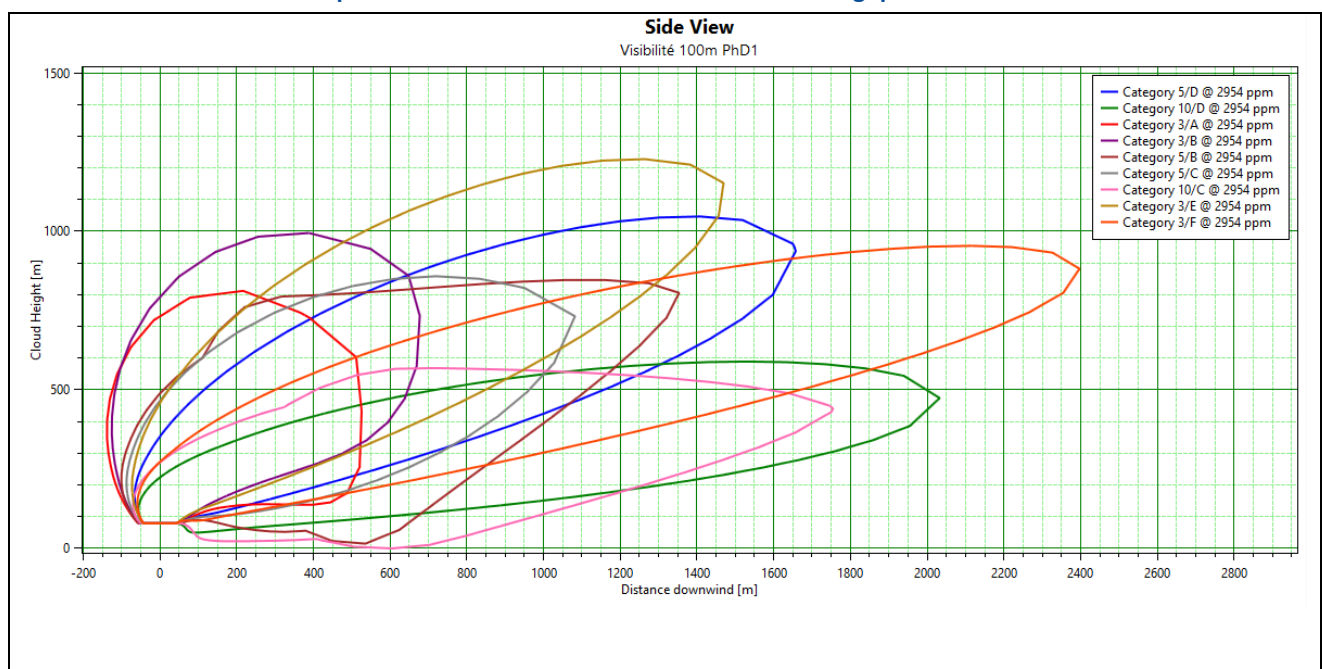


Figure 5 : PhD1 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées



Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 17 : PhD1 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur)

| Visibilité | Distance |
|--------------------|--|
| Visibilité < 50 m | <ul style="list-style-type: none"> – Pas de perte de visibilité au sol ($h < 2\text{m}$) ; – Hauteur minimale des fumées provoquant la perte de visibilité : 41 m à 108 m de la source ; – Distance maximale de perte de visibilité depuis la source : 1 359 m à une hauteur de 635 m. |
| Visibilité < 100 m | <ul style="list-style-type: none"> – Perte de visibilité au sol entre 565 et 625 m de la source ; – Hauteur minimale des fumées provoquant la perte de visibilité : 0 m (seuil atteint au niveau du sol) ; – Distance maximale de perte de visibilité depuis la source : 2 397 m à une hauteur de 880 m. |

4. Modélisation de la dispersion de fumées - Phénomène dangereux n°2

4.1. Evaluation des effets toxiques liés aux fumées

4.1.1. Estimation de la vitesse de combustion

Le cas étudié ici est l'incendie de la cellule D1 de 830 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 1 194 t ainsi que 75 t de Symclosène (acide trichloroisocyanurique).

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.

Tableau 18 : Proportions de matériaux dans les différentes palettes type – PhD2

| Matériaux | Palette type 2662/2663 |
|------------------------------|------------------------|
| Bois | 5 % |
| Polypropylène (PP) | 19 % |
| Polyéthylène (PE) | 19 % |
| Polystyrène (PS) | 19 % |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 19 % |
| Polyuréthane (PU) | 19 % |

Les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes, sur la base de 1 990 palettes de 600 kg de type 2662/2663⁵ et de 75 t de Symclosène :

Tableau 19 : Quantités de matières combustibles présentes – PhD2

| Matériaux | Quantité présente en tonnes |
|------------------------------|-----------------------------|
| Bois | 59,7 |
| Polypropylène (PP) | 226,9 |
| Polyéthylène (PE) | 226,9 |
| Polystyrène (PS) | 226,9 |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 226,9 |
| Polyuréthane (PU) | 226,9 |
| Symclosène | 75 |
| Total en tonnes | 1 269 |

⁵ 1 990 palettes de 600 kg soit 9 396 tonnes

Les caractéristiques des combustibles présents sont les suivantes :

Tableau 20 : Caractéristiques de combustion des produits présents – PhD2

| Matériaux | Vitesse de combustion (g/m ² /s) | Source | PCI (MJ/kg) | Source |
|------------------------------|---|--|-------------|---|
| Bois | 13 | Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale | 16,4 | SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002 |
| 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 |
| Polychlorure de vinyle (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 |
| Symclosène | 10 | Aucune donnée disponible Faiblement combustible Hypothèse Antea Group | 15 | Aucune donnée disponible Faiblement combustible Hypothèse Antea Group |

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

Tableau 21 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes – PhD2

| Matériaux | Quantité présente (en tonnes) | Vitesse de combustion (g/m ² /s) | PCI (MJ/kg) |
|--|-------------------------------|---|--------------|
| Bois | 59,7 | 13 | 16,4 |
| Polypropylène (PP) | 226,9 | 14 | 43,4 |
| Polyéthylène (PE) | 226,9 | 14 | 43,6 |
| Polystyrène (PS) | 226,9 | 35 | 39,2 |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 226,9 | 21,7 | 16,4 |
| Polyuréthane (PU) | 226,9 | 26 | 23,2 |
| Symclosène | 75 | 10 | 15 |
| Caractéristiques moyennes de combustion du stockage | | 20,99 | 31,30 |

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

- une vitesse de combustion moyenne de 20,99 g/m²/s,
- un pouvoir calorifique de 31,30 MJ/kg.

4.1.2. Caractéristiques du terme source

La surface de la zone de stockage totale est de 830 m².

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

Tableau 22 : Composition des produits – PhD2

| Produit | Assimilé à | Formule |
|------------------------------|--|--|
| Bois | Le bois a été assimilé à de la cellulose | (C ₆ H ₁₀ O ₅)-n |
| Polypropylène (PP) | Le PP a été assimilé à du PP | (C ₃ H ₆)-n |
| Polyéthylène (PE) | Le PE a été assimilé à du PE | (C ₂ H ₄)-n |
| Polystyrène (PS) | Le PS a été assimilé à du PS | (CH ₂ CH-Ph)-n |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | Le PVC a été assimilé à du PVC | (CH ₂ CHCl)-n |
| Polyuréthane (PU) | Le PU a été assimilé à du PU | (C ₃ H ₅ O ₂ N)-n |
| Symclosène | Le Symclosène a été assimilé à du Symclosène | C ₃ Cl ₃ N ₃ O ₃ |

Les débits de polluants sont calculés selon la méthodologie présentée au chapitre 2.1, en considérant une vitesse de régression moyenne de 20,99 g/m²/s. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 23 : Débits massiques de polluants – PhD2

| Composé | CO | CO ₂ | HCN | NO ₂ | HCl | Air | Fumées totales |
|--------------------------|-----|-----------------|------|-----------------|-----|-------|----------------|
| Débit massique (en kg/s) | 2,4 | 32,7 | 0,26 | 0,45 | 2,3 | 1 724 | 1 766 |

Le débit total des fumées (polluants + air entraîné) est de 1 766 kg/s au sommet des flammes.

La hauteur d'émission des fumées toxiques, calculée selon méthodologie présentée au chapitre 2.1.3, est de 26 m.

4.1.3. 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 3 : 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 : 14 254 ppm,
- SPEL équivalent : 60 534 ppm,
- SELS équivalent : 82 866 ppm.

4.1.4. Evaluation de l'intensité des effets toxiques

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

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

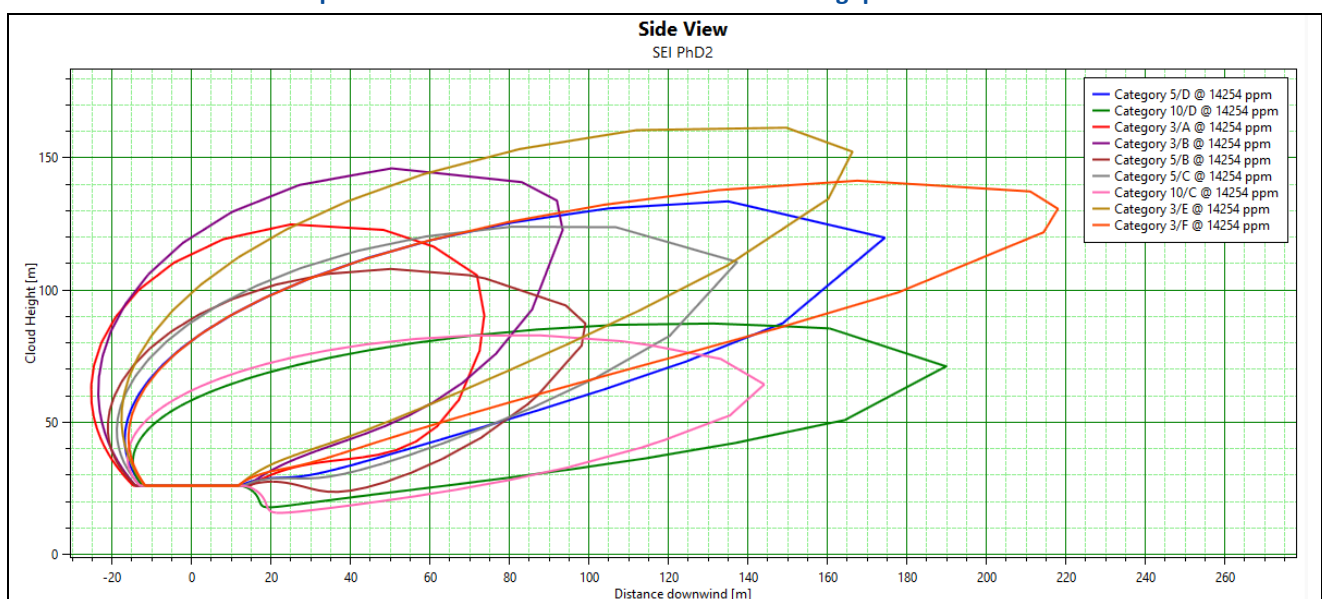


Figure 7 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

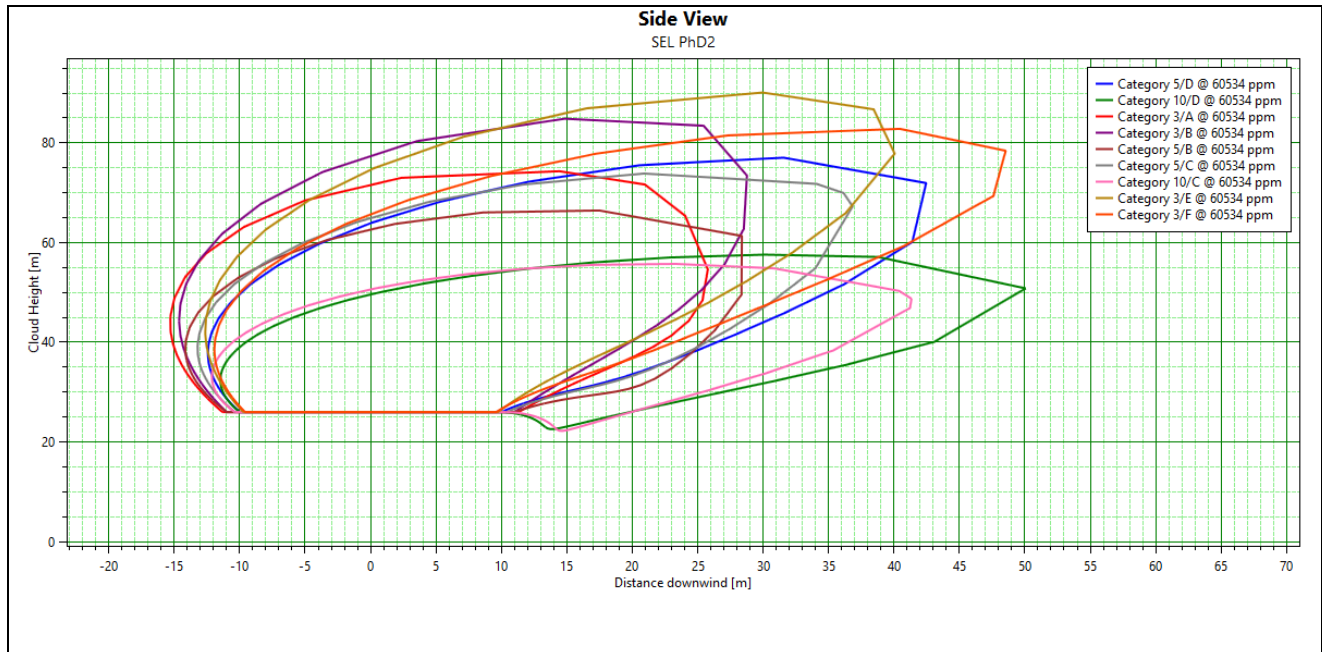
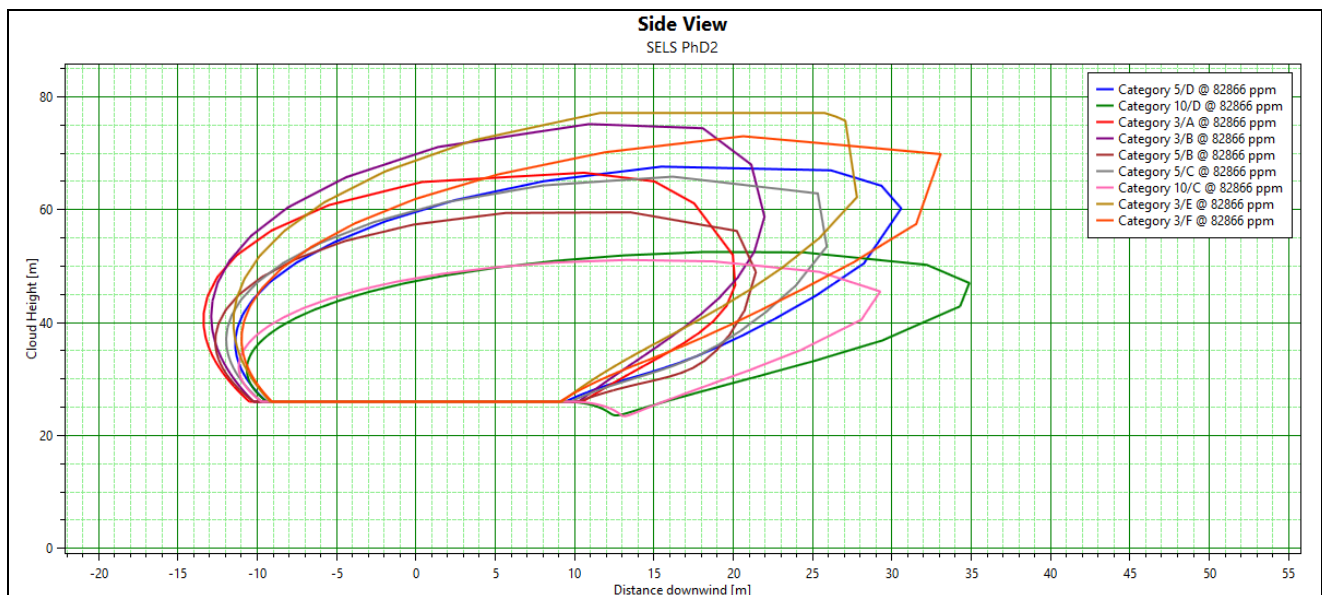


Figure 8 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées



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

Tableau 24 : Distances d'effets (au sol et en hauteur) – PhD2

| 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 : 15 m à 20 m de la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 217 m de la source à $h = 130$ 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 : 22 m à 14 m de la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 50 m de la source à $h = 50$ 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 : 23 m à 13 m de la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 34 m de la source à $h = 47$ m |

4.2. Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie

4.2.1. Données d'entrée

Les données d'entrées sont les suivantes :

- Débit massique de combustion : 17,42 kg/s ;
- Débit de suies : 2,02 kg/s (0,111⁶x débit massique de combustion) ;
- Débit des fumées : 1 766 kg/s ;
- Ratio suies/fumées = 1,09.10⁻³ [kg/kg] ;
- $\rho(\text{fumées})$: 0,66 kg/m³ (donnée PHAST) ;
- $\rho(\text{suies})$: 1 200 kg/m³.

Ainsi, à l'aide de la formule énoncée au paragraphe 2.2.1 et à partir du ratio suies/fumées et des masses volumiques de ces produits, on obtient :

$$C_s^v = 6,02.10^{-7} C_f^v$$

Avec :

C_s^v : concentration volumique des suies (ppm)

C_f^v : concentration volumique des fumées (ppm)

Ainsi, les concentrations en fumées à rechercher dans PHAST sont :

Tableau 25 : PhD2 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées

| Visibilité | < 50 m | < 100 m |
|--------------------------|-----------|-----------|
| Concentrations en fumées | 5 980 ppm | 2 990 ppm |

⁶ 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)

4.2.2. Résultats

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 9 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

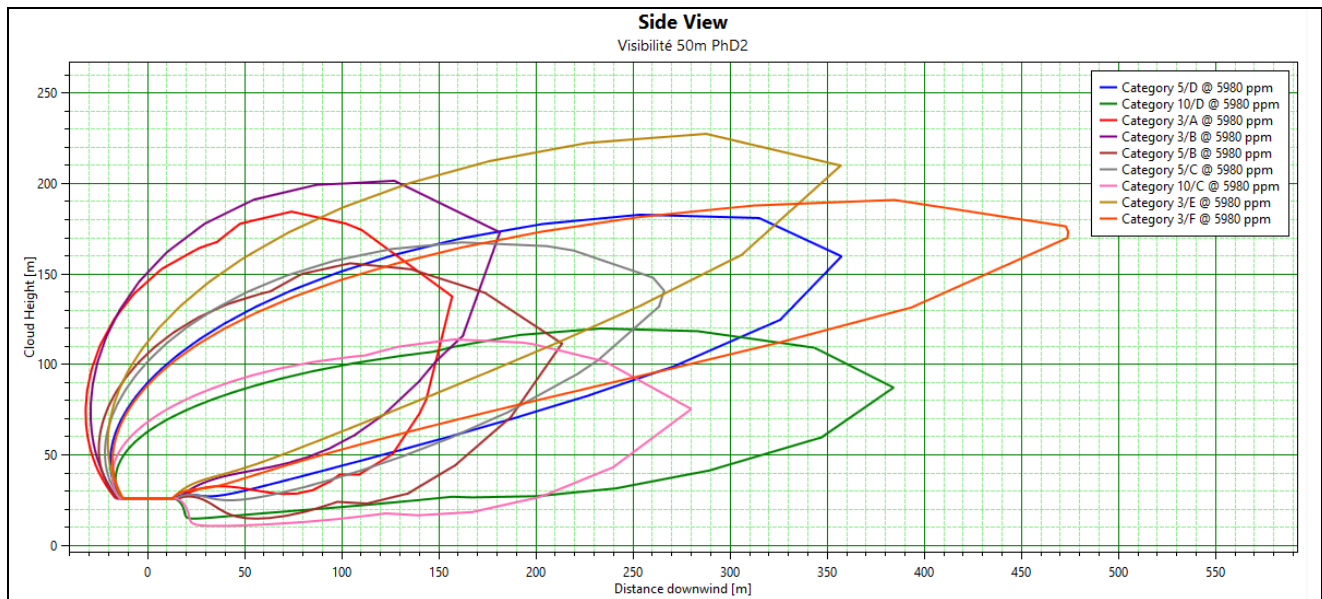
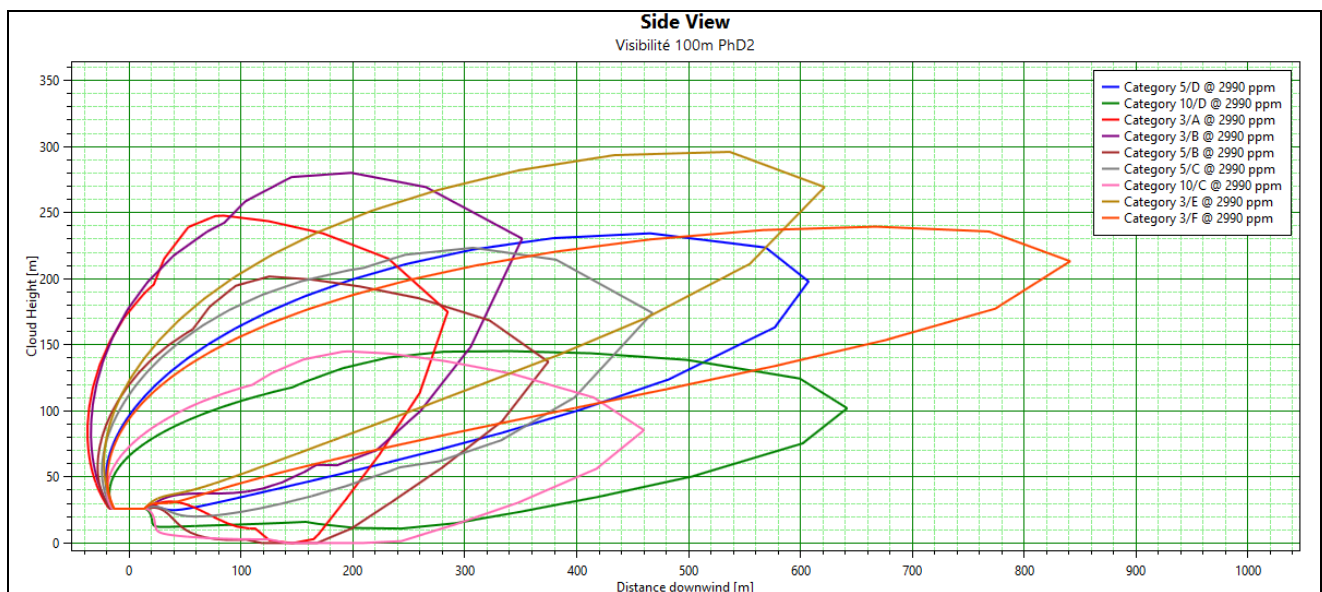


Figure 10 : PhD2 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées



Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 26 : PhD2 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur)

| Visibilité | Distance |
|--------------------|--|
| Visibilité < 50 m | <ul style="list-style-type: none"> – Pas de perte de visibilité au sol ($h < 2\text{m}$) ; – Hauteur minimale des fumées provoquant la perte de visibilité : 10 m à 40 m de la source ; – Distance maximale de perte de visibilité depuis la source : 475 m à une hauteur de 173 m. |
| Visibilité < 100 m | <ul style="list-style-type: none"> – Perte de visibilité au sol entre 105 et 245 m de la source ; – Hauteur minimale des fumées provoquant la perte de visibilité : 0 m (seuil atteint au niveau du sol) ; – Distance maximale de perte de visibilité depuis la source : 841 m à une hauteur de 213 m. |

5. Modélisation de la dispersion de fumées - Phénomène dangereux n°3

5.1. Evaluation des effets toxiques liés aux fumées

5.1.1. Estimation de la vitesse de combustion

Le cas étudié ici est l'incendie généralisé des cellules A1 et D1.

- Cellule A1 : cellule de stockage de 10 970 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 9 393 t ;
- Cellule D1 : cellule de stockage de 830 m² stockant des matières plastiques (rubriques 2662/2663) d'une contenance totale de 1 194 t ainsi que 75 t de Symclosène (acide trichloroisocyanurique).

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.

Tableau 27 : Proportions de matériaux dans les différentes palettes type – PhD3

| Matériaux | Palette type 2662/2663 |
|------------------------------|------------------------|
| Bois | 5 % |
| Polypropylène (PP) | 19 % |
| Polyéthylène (PE) | 19 % |
| Polystyrène (PS) | 19 % |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 19 % |
| Polyuréthane (PU) | 19 % |

Les quantités de matières combustibles présentes sont les suivantes, sur la base de :

- Cellule A1 : 15 660 palettes de 600 kg de type 2662/2663⁷ :
- Cellule D1 : 1 990 palettes de 600 kg de type 2662/2663⁸ et de 75 t de Symclosène :

Tableau 28 : Quantités de matières combustibles présentes – PhD3

| Matériaux | Quantité présente en tonnes (cellule A1) | Quantité présente en tonnes (cellule D1) | Total en tonnes |
|------------------------------|---|---|-----------------|
| Bois | 469,8 | 59,7 | 529,5 |
| Polypropylène (PP) | 1 785,2 | 226,9 | 2 012,1 |
| Polyéthylène (PE) | 1 785,2 | 226,9 | 2 012,1 |
| Polystyrène (PS) | 1 785,2 | 226,9 | 2 012,1 |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 1 785,2 | 226,9 | 2 012,1 |
| Polyuréthane (PU) | 1 785,2 | 226,9 | 2 012,1 |
| Symclosène | / | 75 | 75 |
| Total en tonnes | 9 396 | 1 269 | 10 665 |

Les caractéristiques des combustibles présents sont les suivantes :

Tableau 29 : Caractéristiques de combustion des produits présents – PhD3

| Matériaux | Vitesse de combustion (g/m ² /s) | Source | PCI (MJ/kg) | Source |
|------------------------------|--|--|-------------|---|
| Bois | 13 | Document « an introduction to fire dynamics » 2nd, Dougal Drysdale | 16,4 | SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Third Edition - 2002 |
| 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 |
| Polychlorure de vinyle (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 |
| Symclosène | 10 | Aucune donnée disponible Faiblement combustible Hypothèse Antea Group | 15 | Aucune donnée disponible Faiblement combustible Hypothèse Antea Group |

⁷ 15 660 palettes de 600 kg soit 9 396 tonnes

⁸ 1 990 palettes de 600 kg soit 9 396 tonnes

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

Tableau 30 : Caractéristiques moyennes de combustion des matières combustibles présentes – PhD3

| Matériaux | Quantité présente (en tonnes) | Vitesse de combustion (g/m ² /s) | PCI (MJ/kg) |
|--|----------------------------------|--|--------------|
| Bois | 529,5 | 13 | 16,4 |
| Polypropylène (PP) | 2 012,1 | 14 | 43,4 |
| Polyéthylène (PE) | 2 012,1 | 14 | 43,6 |
| Polystyrène (PS) | 2 012,1 | 35 | 39,2 |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 2 012,1 | 21,7 | 16,4 |
| Polyuréthane (PU) | 2 012,1 | 26 | 23,2 |
| Symclosène | 75 | 10 | 15 |
| Caractéristiques moyennes de combustion du stockage | | 21,60 | 32,20 |

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

- une vitesse de combustion moyenne de 21,60 g/m²/s,
- un pouvoir calorifique de 32,20 MJ/kg.

5.1.2. Caractéristiques du terme source

La surface de la zone de stockage totale est de 11 800 m² (10 970 + 830).

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

Tableau 31 : Composition des produits – PhD3

| Produit | Assimilé à | Formule |
|------------------------------|--|--|
| Bois | Le bois a été assimilé à de la cellulose | (C ₆ H ₁₀ O ₅)-n |
| Polypropylène (PP) | Le PP a été assimilé à du PP | (C ₃ H ₆)-n |
| Polyéthylène (PE) | Le PE a été assimilé à du PE | (C ₂ H ₄)-n |
| Polystyrène (PS) | Le PS a été assimilé à du PS | (CH ₂ CH-Ph)-n |
| Polychlorure de vinyle (PVC) | Le PVC a été assimilé à du PVC | (CH ₂ CHCl)-n |
| Polyuréthane (PU) | Le PU a été assimilé à du PU | (C ₃ H ₅ O ₂ N)-n |
| Symclosène | Le Symclosène a été assimilé à du Symclosène | C ₃ Cl ₃ N ₃ O ₃ |

Les débits de polluants sont calculés selon la méthodologie présentée au chapitre 2.1, en considérant une vitesse de régression moyenne de 21,60 g/m²/s. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 32 : Débits massiques de polluants – PhD3

| Composé | CO | CO ₂ | HCN | NO ₂ | HCl | Air | Fumées totales |
|--------------------------|------|-----------------|-----|-----------------|-----|--------|----------------|
| Débit massique (en kg/s) | 36,0 | 565 | 3,1 | 5,3 | 29 | 25 952 | 26 591 |

Le débit total des fumées (polluants + air entraîné) est de 26 591 kg/s au sommet des flammes.

La hauteur d'émission des fumées toxiques, calculée selon méthodologie présentée au chapitre 2.1.3, est de 78 m.

5.1.3. 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 3 : 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 : 17 363 ppm,
- SPEL équivalent : 73 985 ppm,
- SELS équivalent : 100 898 ppm.

5.1.4. Evaluation de l'intensité des effets toxiques

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

Figure 11 : PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets irréversibles (SEI) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

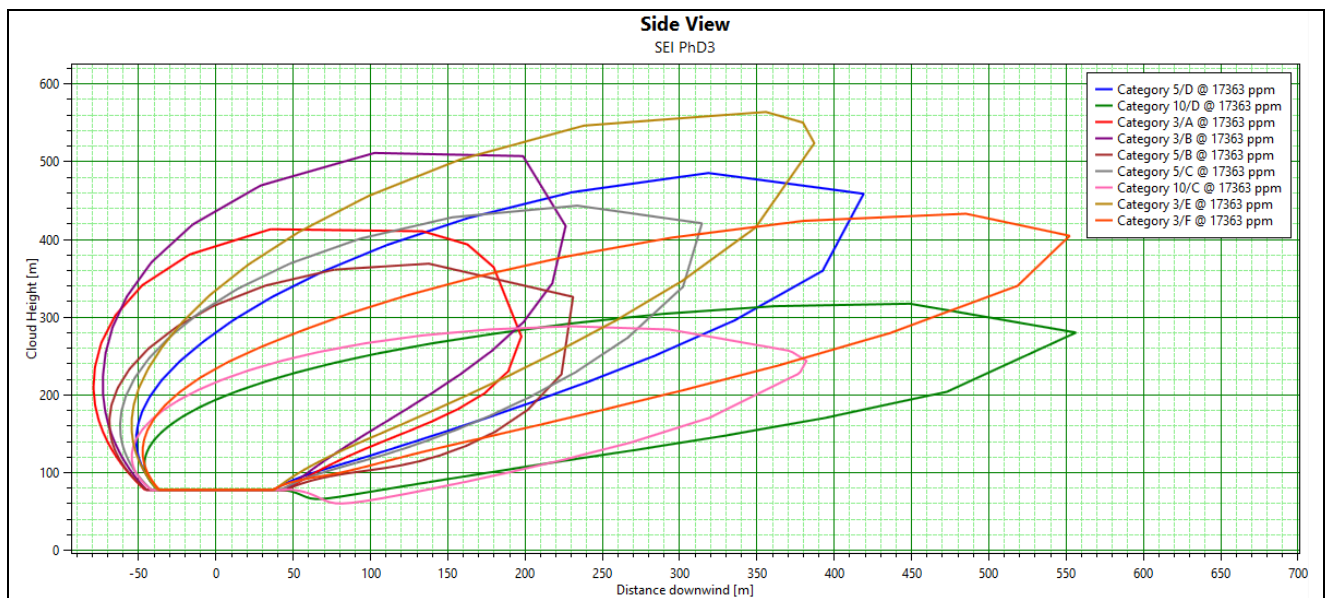


Figure 12 : PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux premiers effets létaux (SPEL) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

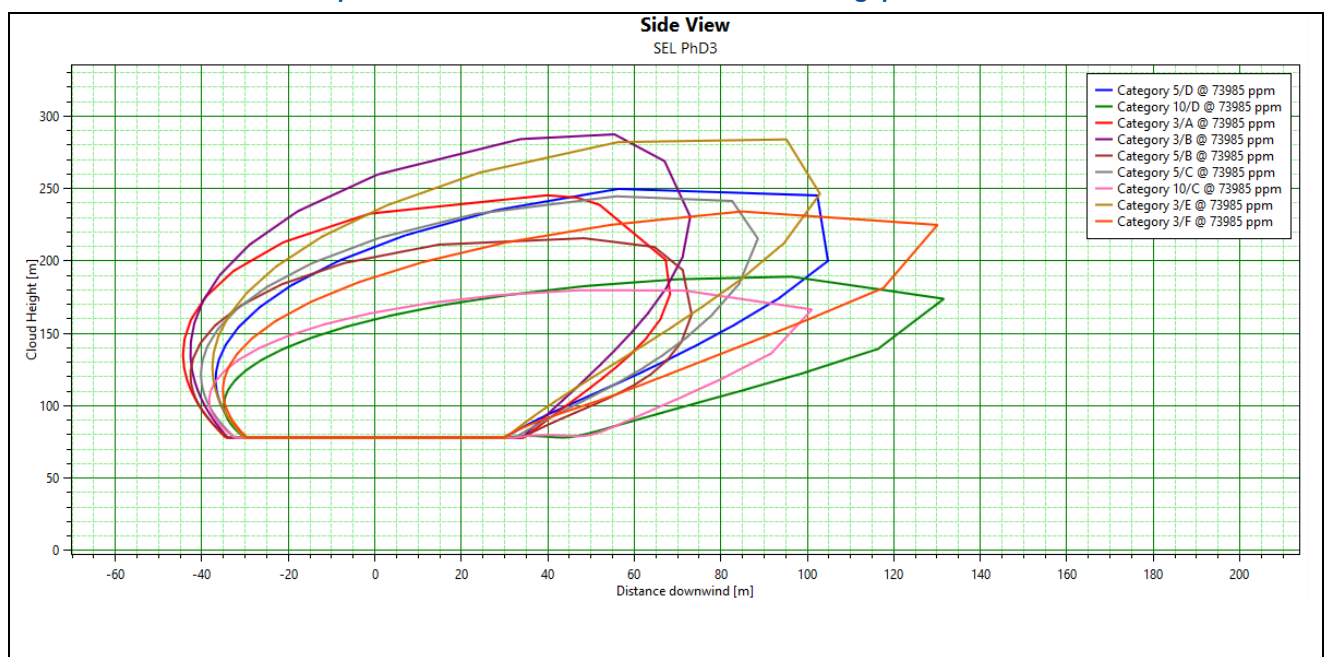
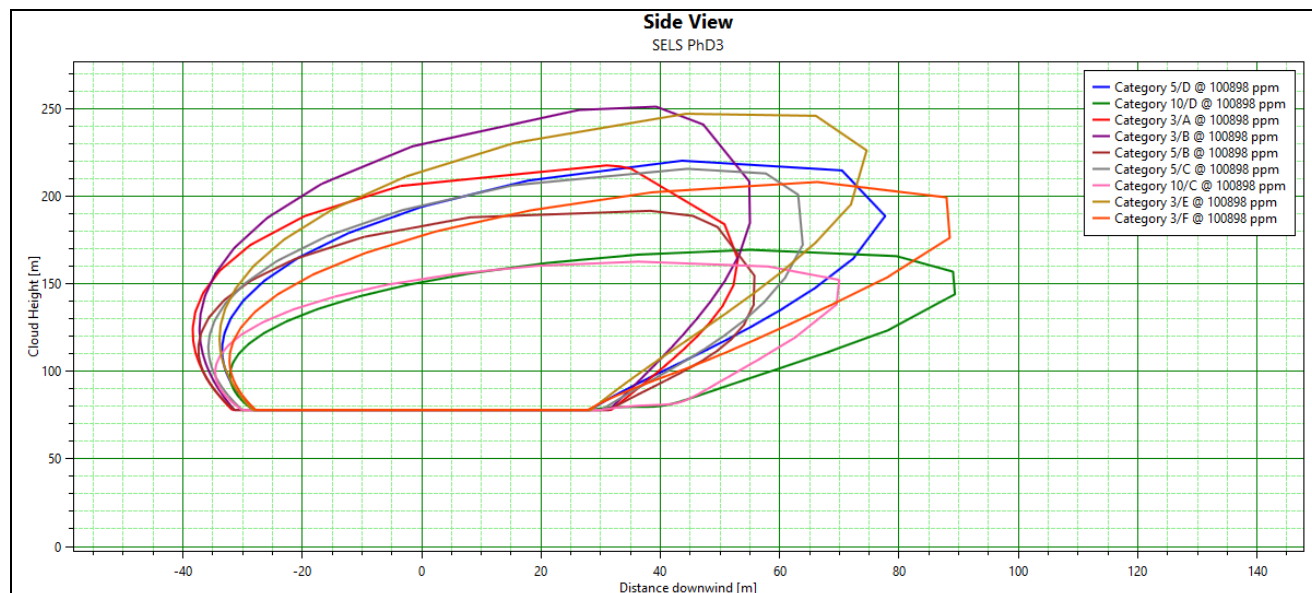


Figure 13 : PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant aux effets létaux significatifs (SELS) en présence des différentes conditions météorologiques étudiées



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

Tableau 33 : Distances d'effets (au sol et en hauteur) – PhD3

| 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 : 60 m à 77 m de la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 556 m de la source à $h = 280$ 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 : 78 m à la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 131 m de la source à $h = 173$ 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 : 78 m à la source – Distance maximal atteinte par les fumées toxiques : 89 m de la source à $h = 153$ m |

5.2. Evaluation de la perte de visibilité associée à l'incendie

5.2.1. Données d'entrée

Les données d'entrées sont les suivantes :

- Débit massique de combustion : 254,88 kg/s ;
- Débit de suies : 29,31 kg/s (0,115⁹x débit massique de combustion) ;
- Débit des fumées : 26 591 kg/s ;
- Ratio suies/fumées = 1,10.10⁻³ [kg/kg] ;
- $\rho(\text{fumées})$: 0,66 kg/m³ (donnée PHAST) ;
- $\rho(\text{suies})$: 1 200 kg/m³.

Ainsi, à l'aide de la formule énoncée au paragraphe 2.2.1 et à partir du ratio suies/fumées et des masses volumiques de ces produits, on obtient :

$$C_s^v = 6,06.10^{-7} C_f^v$$

Avec :

C_s^v : concentration volumique des suies (ppm)

C_f^v : concentration volumique des fumées (ppm)

Ainsi, les concentrations en fumées à rechercher dans PHAST sont :

Tableau 34 : PhD3 – Distance de visibilité en fonction de la concentration des fumées

| Visibilité | < 50 m | < 100 m |
|--------------------------|-----------|-----------|
| Concentrations en fumées | 5 938 ppm | 2 969 ppm |

⁹ 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)

5.2.2. Résultats

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 14 : PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 50 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées

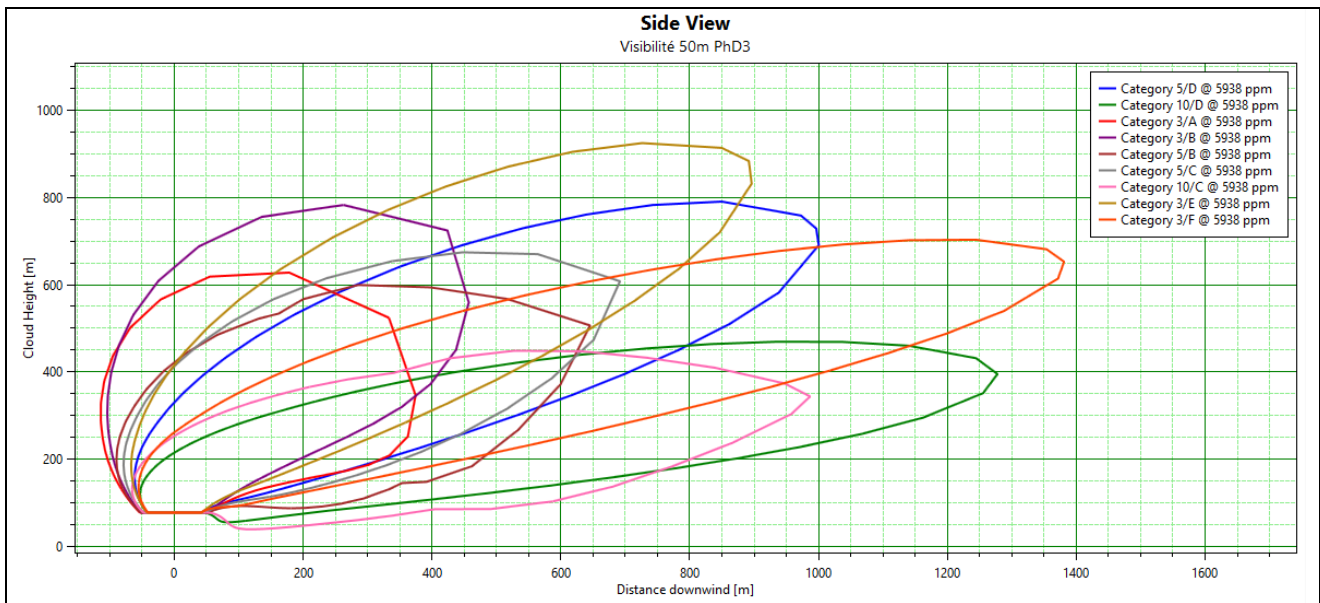
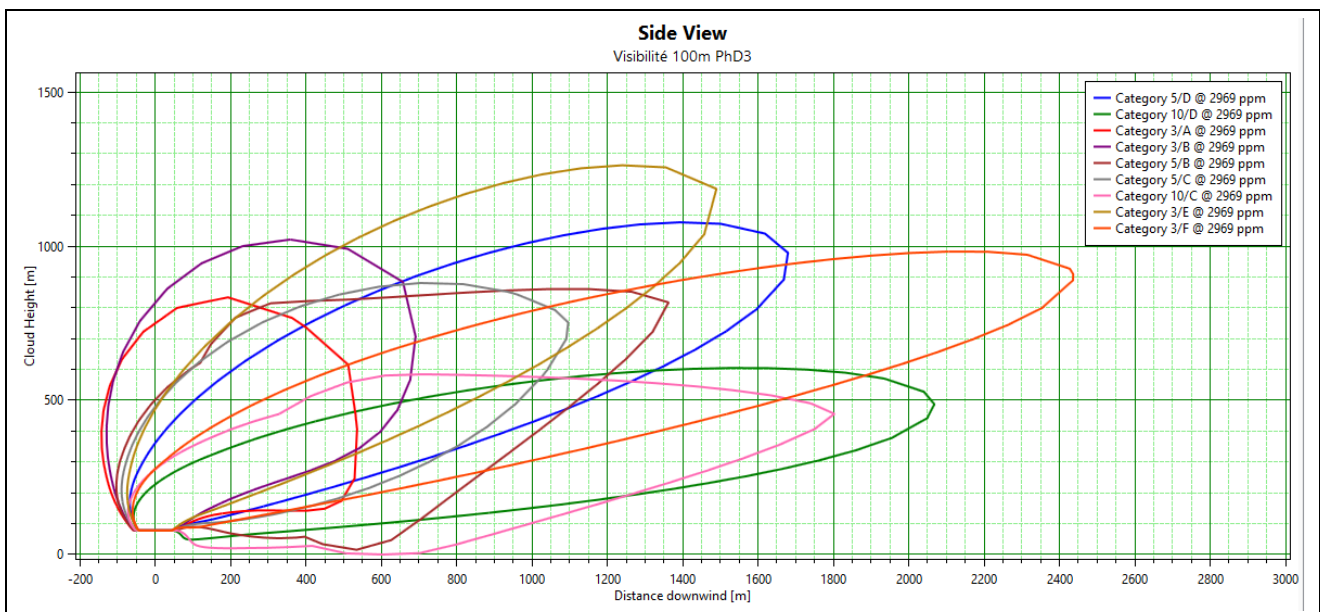


Figure 15 : PhD3 - Vue en coupe verticale des panaches de fumées correspondant à une visibilité inférieure à 100 m en présence des différentes conditions météorologiques étudiées



Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 35 : PhD3 – Perte de visibilité (au sol et en hauteur)

| Visibilité | Distance |
|--------------------|--|
| Visibilité < 50 m | <ul style="list-style-type: none"> – Pas de perte de visibilité au sol ($h < 2\text{m}$) ; – Hauteur minimale des fumées provoquant la perte de visibilité : 41 m à 105 m de la source ; – Distance maximale de perte de visibilité depuis la source : 1 381 m à une hauteur de 654 m. |
| Visibilité < 100 m | <ul style="list-style-type: none"> – Perte de visibilité au sol entre 550 et 650 m de la source ; – Hauteur minimale des fumées provoquant la perte de visibilité : 0 m (seuil atteint au niveau du sol) ; – Distance maximale de perte de visibilité depuis la source : 2 436 m à une hauteur de 910 m. |

6. Bilan

Les modélisations de la dispersion atmosphérique des fumées des différents incendies de cellules de stockage réalisées dans ce rapport mettent en évidence les éléments suivants :

- L'absence d'atteinte des seuils réglementaires (SEI, SPEL, SELS) au niveau du sol ;
- La hauteur minimale atteinte par les seuils d'effets irréversibles est de :
 - 61 m par rapport au niveau du sol de l'entrepôt (cas de la cellule C) ;
 - 15 m par rapport au niveau du sol de l'entrepôt (cas de la cellule D1) ;
 - 60 m par rapport au niveau du sol de l'entrepôt (cas des cellules A1 et D1) ;
- L'absence de perte de visibilité (vision à 50 m) au niveau du sol ;
- Une perte de visibilité (vision à 100 m) est observée :
 - entre 565 et 625 m de l'entrepôt (cas de la cellule C) ;
 - entre 105 et 245 m de l'entrepôt (cas de la cellule D1) ;
 - entre 550 et 650 m de l'entrepôt (cas des cellules A1 et D1).

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.