

Bureau Veritas  
Service Risques Industriels  
16 Chemin du Jubin – BP 26  
69571 DARDILLY CEDEX

Responsable de l'étude :

**Cécile DUBIEN**

Tél. 04 72 29 70 68

e-mail : [cecile.dubien@fr.bureauveritas.com](mailto:cecile.dubien@fr.bureauveritas.com)



## **Modélisation des effets liés à la dispersion de fumées en cas d'incendie**

**Stockage de produits classés dans les rubriques 1510, 1530, 1532,  
2662, 2663 (Autorisation) et 1520 (Déclaration)**



## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>DEMARCHE D'EVALUATION DES EFFETS DES FUMÉES EN CAS D'INCENDIE</b>	<b>3</b>
1.1	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	3
1.2	METHODOLOGIE GENERALE	3
1.3	EVALUATION DE LA NATURE ET DU TAUX DE PRODUCTION EN GAZ OU VAPEURS TOXIQUES	4
1.4	DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMOCINETIQUES DU FEU : DEBIT, HAUTEUR ET TEMPERATURE DES FUMÉES EMISES	5
1.5	MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES FUMÉES	5
1.6	ANALYSE DES CONSEQUENCES DU POINT DE VUE DE LA TOXICITE DE L'AIR	7
1.7	EVALUATION DE L'IMPACT DES FUMÉES SUR LA VISIBILITE	8
<b>2</b>	<b>SCENARIOS RETENUS ET MODELISES DANS LA PRESENTE ETUDE</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>MODELISATION</b>	<b>10</b>
3.1	CARACTERISATION DU TERME SOURCE	10
3.1.1	<i>Données et hypothèses de calcul</i>	10
3.1.2	<i>Gaz toxiques de combustion produits</i>	11
3.2	ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE	15
3.2.1	<i>Incendie débutant</i>	15
3.2.2	<i>Incendie généralisé</i>	16
3.3	CONCLUSIONS EN TERME DE TOXICITE DES FUMÉES	17
3.4	CONCLUSIONS EN TERME D'IMPACT DES FUMÉES SUR LA VISIBILITE	18

# 1 DEMARCHE D'EVALUATION DES EFFETS DES FUMÉES EN CAS D'INCENDIE

## 1.1 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. HESKESTAD – « Engineering Relations for Fire Plumes » – Factory Mutual Research Corporation – Fire safety Journal, 7, 1984, pp 25-32.
- [2] Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets – INERIS – rapport Ω16.

## 1.2 METHODOLOGIE GENERALE

Le développement d'un feu dans un local comprend, en simplifiant, trois phases :

1. une phase ascendante d'extension/propagation ;
2. une phase d'incendie généralisé, stabilisé, à plein régime ;
3. une phase décroissante d'extinction.

Dans la phase de propagation, le feu est gouverné par les conditions d'amenée d'air. C'est un feu avec peu de flammes, produisant des quantités importantes de fumées qui s'élèvent à faible vitesse et faible température initiales. Ces fumées sont fortement chargées en produits de combustion toxiques dus aux imbrûlés.

Dans la phase d'incendie « à plein régime », le feu est largement ventilé (du fait de la ruine de la toiture). Les fumées sont importantes mais elles sont moins chargées en gaz toxiques du fait d'une bonne oxygénation. L'élévation du panache est généralement notable en raison des effets thermoconvectifs des gaz chauds.

Dans la phase décroissante d'extinction, les fumées produites sont émises en quantités de moins en moins importantes et à faible température du fait de la plus faible puissance thermique de l'incendie (arrosage massif, ...). Elles peuvent cependant contenir des particules (imbrûlés, suies) et des gaz toxiques en teneurs encore élevées.

Afin de rendre compte de cette évolution, deux configurations sont étudiées pour la dispersion des fumées en cas d'incendie dans un local :

- l'incendie débutant ;
- l'incendie généralisé.

Dans la configuration « incendie débutant », l'incendie est en phase de développement. Le foyer est encore peu étendu. Le feu est mal ventilé (=> combustion incomplète). Les fumées sortent par les exutoires.

La phase d'extension / propagation étant représentative également des conditions de décroissance et d'extinction du foyer.

Dans la configuration « incendie généralisé », l'incendie s'est propagé à la totalité de la surface de stockage considérée. Il est bien oxygéné du fait de l'effondrement de la toiture (et des murs si ceux-ci sont non coupe feu) (=> combustion relativement complète).

Lorsque l'incendie a lieu en extérieur, où les apports d'oxygène ne sont pas limités, seul l'incendie généralisé, bien ventilé, est modélisé.

La démarche de modélisation des effets des fumées comprend quatre étapes :

- le choix du ou des incendies retenus et la caractérisation du terme source :
  - la surface du foyer de l'incendie ;
  - l'inventaire des produits impliqués dans l'incendie ;
  - la quantification de la production des fumées toxiques en fonction de la nature et du tonnage des produits présents au moment de l'incendie. Les fumées toxiques produites sont quantifiées sur la base d'hypothèses issues du REX (CNPP, INERIS [2]) ;
  - la détermination des caractéristiques thermocinétiques du feu : débit, hauteur et température des fumées émises. Ces caractéristiques thermocinétiques sont évaluées sur la base des corrélations issues des travaux de Heskestad (1984) [1].
- le calcul de la dispersion atmosphérique des fumées en tenant compte des conditions météorologiques et orographiques ;
- l'analyse des conséquences du point de vue de la toxicité de l'air. Cette analyse est effectuée en comparant les concentrations au sol obtenues précédemment aux seuils de toxicité équivalents des fumées définis au préalable.
- L'analyse des conséquences d'un point de vue de l'opacité des fumées (perte de visibilité au voisinage du panache).

Remarque sur le choix du ou des scénarios :

A la différence des effets thermiques, pour déterminer les effets toxiques enveloppes, il est préférable de travailler au niveau de la cellule plutôt que de plusieurs cellules. En effet, plus la surface est importante et plus la puissance thermique est conséquente d'où un panache avec une vitesse et une hauteur d'émission des fumées élevées.

### 1.3 EVALUATION DE LA NATURE ET DU TAUX DE PRODUCTION EN GAZ OU VAPEURS TOXIQUES

La nature des substances émises par combustion (pour les matières combustibles) ou décomposition thermique (pour les combustibles) est fonction de la composition chimique des produits impliqués. Ces substances sont présentes dans les fumées soit sous forme gazeuse, soit sous forme liquide (dissoutes dans des gouttelettes d'eau ou sous forme d'aérosols) ou absorbées dans les particules de suies.

Pour définir la nature des gaz ou vapeurs nocifs ou toxiques émis, les produits impliqués dans l'incendie sont décomposés en éléments simples (C, H, O, N, Cl, ...).

La proportion des différents gaz et vapeurs toxiques émis et les débits de production de ces gaz et vapeurs sont évalués sur la base d'hypothèses fondées sur des résultats d'essais (INERIS [2], CNPP).

Seuls les gaz ou vapeurs toxiques gazeux majeurs sont pris en compte dans les calculs de dispersion. Les produits de combustion secondaires, telles que les suies, aérosols, produits sublimés, imbrûlés, etc. ne sont pas retenus pour les raisons qui suivent :

- Les mécanismes et les taux de production de ces composés secondaires dépendent de très nombreux paramètres (nature des molécules, taille et oxygénation du foyer, ...). On sait, par exemple, que la formation des suies et imbrûlés est favorisée par la présence de doubles liaisons dans la molécule et par la grandeur du foyer. Inversement, la présence d'eau ou d'oxygène dans la molécule diminue la quantité de suies formées. Cependant, à notre connaissance, aucune étude expérimentale n'a permis de quantifier d'une part les produits secondaires de combustion et, d'autre part, leurs effets sur la santé, lesquels vont dépendre des produits, mais aussi de la taille des particules. Plus celles-ci sont grosses, moins elles sont dangereuses car elles sont arrêtées au niveau des bronches et du nez. Or, si les particules formées sont très petites (diamètre < 1 micron), au niveau du foyer, elles ont tendance à s'agglomérer en se dispersant pour générer des particules de dimensions supérieures à 20 µm.

- Il est généralement admis (peut-être par manque de connaissances sur les produits secondaires de combustion), que les principaux facteurs de blessures, voire de décès, au cours d'un incendie sont la chaleur et les gaz toxiques de combustion (CO, HCl, NOx, ...).

Par ailleurs, il n'est pas tenu compte des éventuelles réactions entre produits qui pourraient potentiellement générer d'autres gaz ou vapeurs par recombinaison des éléments chimiques.

#### **1.4 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMOCINETIQUES DU FEU : DEBIT, HAUTEUR ET TEMPERATURE DES FUMÉES EMISES**

##### **Débit des fumées :**

Le débit de fumées est estimé en appliquant le modèle de Heskestad (1984) qui tient compte de la dilution des flammes par l'air. Selon cette corrélation, le débit des fumées (gaz et vapeurs toxiques émis + air de dilution/entraînement) est proportionnel à la puissance de l'incendie :  $Q_{\text{fum}} \text{ (kg/s)} = 3,24 \times P$  avec P puissance totale en MW.

##### **Hauteur d'émission des fumées :**

Dans le cas de l'incendie débutant, les fumées sortent par les exutoires ouverts. La hauteur d'émission des fumées est donc prise à la hauteur des exutoires, égale à la hauteur du bâtiment. Dans le cas de l'incendie généralisé, les fumées sont émises en partie supérieure du volume formé par les flammes. Dans ce cas, la hauteur d'émission des fumées est prise à la hauteur des flammes :

- soit déterminée en appliquant la formule de Heskestad :  $H_{\text{fum}} \text{ (m)} = 0,166 \times (10^{-3} \times P_{\text{convectée}})^{0,4}$  où  $P_{\text{convectée}} \text{ (MW)} = 65\%$  de la puissance de l'incendie ;
- soit reprise des calculs de flux thermiques.

A noter, la hauteur des flammes prise en compte est une hauteur moyenne car en réalité ces dernières sont animées d'un mouvement intermittent.

##### **Température et vitesse des fumées au point d'émission :**

Dans le cas de l'incendie débutant, les fumées sortent par les exutoires ouverts. La température des fumées est donc prise égale à la température d'ouverture des exutoires = 80°C (hypothèse plutôt pénalisante).

Dans le cas de l'incendie généralisé, Heskestad a montré qu'à la hauteur d'émission des fumées l'écart moyen entre la température des fumées et la température de l'air ambiant est de l'ordre de 250K. La température des fumées est donc prise égale à 265°C.

Par ailleurs, ce même auteur fournit une corrélation empirique permettant de déterminer la vitesse moyenne d'élévation des fumées à la hauteur h en fonction de la quantité de chaleur convectée par les fumées. Des mesures expérimentales montrent qu'au moins 60% de la puissance thermique développée par un incendie est convectée.

#### **1.5 MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES FUMÉES**

La dispersion atmosphérique est modélisée au moyen du logiciel PHAST version 6.7. Ce logiciel, commercialisé par DNV Software, est largement utilisé dans l'industrie pour l'estimation des conséquences d'accidents. Il permet de modéliser différents types de termes sources (débits à la brèche, débits d'évaporation, ...), ainsi que la dispersion atmosphérique de rejets.

Le paramétrage de PHAST est fait conformément au « Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation du logiciel PHAST à l'usage des industriels de l'industrie chimique » – UIC – DT 102 – Septembre 2012.

### **Conditions météorologiques :**

Les conditions météorologiques retenues sont celles recommandées dans la circulaire du 10/05/2010 pour les rejets en hauteur.

Stabilité (selon Pasquill)		Vitesse de vent	Température ambiante
A	Très instable	3 m/s	20°C
B	Instable	3 m/s	20°C
B	Instable	5 m/s	20°C
C	Moyennement instable	5 m/s	20°C
C	Moyennement instable	10 m/s	20°C
D	Neutre	5 m/s	20°C
D	Neutre	10 m/s	20°C
E	Moyennement stable	3 m/s	20°C
F	Stable	3 m/s	15°C

Les atmosphères stables (F) et, à l'inverse, très instables (A) sont défavorables à la dispersion atmosphérique.

Une atmosphère neutre (D) est plutôt favorable à la dispersion mais cet effet peut être contrecarré par un vent fort (10 m/s) qui rabat le panache de fumées vers le sol.

Les résultats (tracés du panache) sont présentés pour les conditions D10 et F3 qui, par expérience, sont les plus pénalisantes, respectivement pour une cible au sol et en hauteur.

### **Conditions orographiques :**

Les conditions orographiques traduisent les caractéristiques du terrain, c'est-à-dire essentiellement l'état de « rugosité » du sol, influant sur la turbulence atmosphérique et donc sur la dispersion.

La rugosité peut être interprétée comme un coefficient de frottement du nuage sur le sol, et produit deux types d'effets antagonistes :

- elle augmente la turbulence, ce qui favorise la dilution ;
- elle freine le nuage, ce qui favorise l'effet d'accumulation et la concentration.

La rugosité a une influence non négligeable sur la dispersion des nuages de gaz lourds, ayant un comportement « rampant » au sol, du fait de leur densité plus élevée que celle de l'air.

Dans le cas de la dispersion des fumées d'incendie, ce paramètre est peu influent car le panache de fumées a une densité proche de celle de l'air (il est composé en majorité de l'air entraîné) et est émis en hauteur (à la hauteur des flammes).

Pour rendre compte de l'état du sol aux alentours du site, nous avons considéré, dans le logiciel PHAST 6.7, une rugosité de surface de 1 m (valeur classiquement retenue dans les études de dangers, représentative d'une zone industrielle ou urbanisée).

A noter : le terrain est considéré plat. Le paramètre de rugosité ne permet pas de prendre en compte les reliefs marqués.

## 1.6 ANALYSE DES CONSEQUENCES DU POINT DE VUE DE LA TOXICITE DE L'AIR

Le mode d'exposition aux fumées est aigu, par opposition aux expositions chroniques ou subchroniques pour lesquelles sont définis d'autres seuils de référence. Le mode d'exposition aux fumées est l'inhalation.

Les seuils d'effets toxiques sont définis par l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

Trois seuils sont définis, correspondant à trois types d'effets :

- le seuil des effets létaux significatif (SELS) : il correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle on peut observer une mortalité de 5% au sein de la population exposée ;
- le seuil des premiers effets létaux (SPEL) : il correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle on peut observer une mortalité de 1% au sein de la population exposée ;
- le seuil des effets irréversibles (SEI) : il correspond à la concentration, pour une durée d'exposition donnée, au dessus de laquelle des effets irréversibles peuvent apparaître au sein de la population exposée.

Au sein de la population exposée, les sujets hypersensibles ne sont pas considérés (par exemple, les insuffisants respiratoires).

Les effets létaux correspondent à la survenue de décès. Les effets irréversibles correspondent à la persistance dans le temps d'une atteinte lésionnelle ou fonctionnelle, directement consécutive à l'exposition. Les effets réversibles correspondent à un retour à l'état de santé antérieur à l'exposition.

Les seuils de toxicité aigue considérés sont ceux définis par l'INERIS. A défaut, il est possible d'utiliser les seuils américains tels que, par ordre de priorité, les seuils AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels) définis par l'US EPA, les seuils ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) définis par l'AIHA, les seuils IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health concentrations), les seuils TEEL (Temporary Exposure Emergency Limits) définis par le ministère des transports aux Etats-Unis.

On définit les seuils de toxicité équivalents des fumées :

$$\text{SELS}_{\text{équivalent}} = \frac{1}{\sum \frac{p_i}{\text{SELS}_i}} \quad \text{SPEL}_{\text{équivalent}} = \frac{1}{\sum \frac{p_i}{\text{SPEL}_i}} \quad \text{SEI}_{\text{équivalent}} = \frac{1}{\sum \frac{p_i}{\text{SEI}_i}}$$

avec :

- pi : proportion d'une substance dans les fumées
- SEi : seuil d'effets de la substance (mg/m<sup>3</sup> ou ppm)

Cette démarche permet de rendre compte du mélange gazeux que sont les fumées, composées de gaz toxiques (CO, NO<sub>2</sub>, ...) dilués par une grande quantité d'air. En effet, elle permet, de manière simplifiée, d'une part de prendre en compte la toxicité spécifique à chaque gaz, d'autre part de « sommer » leurs toxicités respectives. Mais, une telle approche, retenue faute de mieux, ne permet pas de prendre en compte les effets de synergies ou d'antagonismes éventuels, induits par la présence simultanée des différents gaz.

Le rayon (ou périmètre, ou zone) de dangers correspond à la distance maximale au-delà de laquelle la concentration en fumées est inférieure au seuil équivalent considéré.

## 1.7 EVALUATION DE L'IMPACT DES FUMÉES SUR LA VISIBILITE

Les imbrûlés, constitués de particules de carbone et d'aérosols de produits non brûlés, sont responsables de la couleur noire du panache (particules de carbones majoritairement) et de l'absorption de la lumière entraînant une diminution de la visibilité.

Le risque pour les tiers est un risque d'accident de la circulation. On considère qu'il y a un risque pour les tiers, circulant sur les voies de circulation aux alentours du site, lorsque la visibilité devient inférieure à la distance de freinage (DF) ; quelques valeurs de DF :

- |   |            |
|---|------------|
| - agglomération                           | DF = 16 m  |
| - nationale                               | DF = 52 m  |
| - autoroute pluie (vitesse 110 km/h)      | DF = 78 m  |
| - autoroute beau temps (vitesse 130 km/h) | DF = 109 m |

Pour évaluer la visibilité, le modèle de STEINERT est utilisé (C. STEINERT – *Smokes and heat production in tunnel fires* – Proceedings of the international Conference on Fires in tunnels – Borås – Suède – 10-11 octobre 1994) :

$$V = \frac{k}{DO}$$

avec :

- V : visibilité (m)  
k : coefficient compris entre 1 et 10 selon les auteurs. Dans une approche pénalisante nous prendrons k = 1  
DO : densité optique (m<sup>-1</sup>) -  $DO = 36040 \frac{CO_2}{Tf}$  où :  
Tf : température des fumées au point où est calculée DO (K) – Tf au sol = T ambiante  
CO<sub>2</sub> : fraction volumique de CO<sub>2</sub> au même point (m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>/ m<sup>3</sup> de mélange gazeux)



## 2 SCENARIOS RETENUS ET MODELISES DANS LA PRESENTE ETUDE

Les scénarios modélisés, considérant les conditions de ventilation du feu, sont :

- **scénario 1** : incendie débutant, en phase d'extension/propagation, dans la plus grande cellule.
- **scénario 2** : incendie généralisé, plein régime, dans la plus grande cellule.

### 3 MODELISATION

#### 3.1 CARACTERISATION DU TERME SOURCE

##### 3.1.1 Données et hypothèses de calcul

<b>Dimensions de la cellule</b>	Surface au sol : 6 000 m <sup>2</sup> Hauteur moyenne sous toiture : 13 m	
<b>Surface du foyer</b>	Pour un local couvert, la configuration « incendie généralisé » est caractérisée par un feu étendu à toute la surface du local (ou de la zone de stockage). La configuration « incendie débutant » est représentée par un feu couvrant 10% de la surface du local.	
	<b>Incendie débutant mal ventilé</b>	<b>Incendie généralisé bien ventilé</b>
	600 m <sup>2</sup>	6 000 m <sup>2</sup>
<b>Produits impliqués dans l'incendie</b>	La composition du stockage est représentée par : => des produits classés à autorisation dans les rubriques 1510, 1530, 1532, 2662-2663 et des produits classés à déclaration dans la rubrique 1520. Pour rendre compte de cette composition, nous avons considéré les produits et pourcentages massiques suivants (sont choisis les produits susceptibles de générer des gaz de combustion toxiques les plus couramment rencontrés dans ce type d'entrepôts) : <u>Composition du stockage considérée :</u> - bois-papier-carton (1510, 1530, 1532) : 35% - polyéthylène-polypropylène (PE / PP) (2662-2663) : 25% - PVC (2662-2663) : 15% - polyuréthane (PU) (2662-2663) : 10% - polyamide (PA) (2662-2663) : 10% - charbon de bois (représentatif des produits classés en 1520) : 5%	
	<b>Incendie débutant mal ventilé</b>	<b>Incendie généralisé bien ventilé</b>
	12 g/m <sup>2</sup> .s	30 g/m <sup>2</sup> .s <sup>(1)</sup>
<b>Taux massique surfacique de combustion</b>	Le taux de combustion est fonction des conditions de ventilation de l'incendie : il est moins élevé lorsque le feu est mal ventilé (= cas de l'incendie débutant, mal oxygéné). Le ratio entre le débit de combustion bien ventilé et le débit de combustion mal ventilé est issu des courbes données dans le SFPE – <i>Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires</i> .  <sup>(1)</sup> Source : Valeur préconisée par le guide entrepôt dans le cas des entrepôts « en blanc ».	
<b>Hauteur et position de la cible</b>	La cible est supposée verticale, placée à 1,8 m de hauteur = stature moyenne d'un homme.  Les effets en hauteur sont également indiqués, à 10 m de hauteur (= hauteur d'une maison individuelle) et à 30 m de hauteur (= hauteur d'un immeuble).	
<b>Logiciel de calcul</b>	PHAST 6.7	

### 3.1.2 Gaz toxiques de combustion produits

Pour définir la nature des gaz nocifs ou toxiques émis, les produits impliqués dans l'incendie sont décomposés en éléments simples (C, H, O, N, Cl, ...). Puis, à partir d'hypothèses, sont calculés les débits des gaz toxiques produits (CO, CO<sub>2</sub>, HCl, HCN, NO<sub>2</sub>, ...).

#### Décomposition des produits impliqués dans l'incendie en éléments simples :

Matières impliquées dans l'incendie	% massique	% C	% H	% O	% N	% Cl
Bois – Carton – Papier	35%	44,4%	6,2%	49,4%	-	-
Polyéthylène / polypropylène (PE / PP)	25%	85,7%	14,3%	-	-	-
Polychlorure de vinyle (PVC)	15%	38,4%	4,8%	-	-	56,8%
Polyuréthane (PU)	10%	40,9%	6,8%	36,4%	15,9%	-
Polyamide (PA)	10%	63,7%	9,7%	14,2%	12,4%	-
Charbon de bois	5%	44,4%	6,2%	49,4%	-	-

#### Gaz toxiques pris en compte dans les fumées :

Les principaux gaz toxiques susceptibles de se dégager lors de la combustion des produits impliqués dans l'incendie sont donc les suivants :

Matières impliquées dans l'incendie	Éléments constitutifs principaux	Principaux gaz de combustion toxiques susceptibles de se dégager <sup>(2)</sup>
Bois – Carton – Papier	C, H, O	CO <sub>2</sub> , CO
Polyéthylène / polypropylène (PE / PP)	C, H	CO <sub>2</sub> , CO
Polychlorure de vinyle (PVC)	C, H, Cl	CO <sub>2</sub> , CO, HCl
Polyuréthane (PU)	C, H, O, N	CO <sub>2</sub> , CO, HCN, NO <sub>2</sub> <sup>(3)</sup>
Polyamide (PA)	C, H, O, N	CO <sub>2</sub> , CO, HCN, NO <sub>2</sub> <sup>(3)</sup>
Charbon de bois	C, H, O	CO <sub>2</sub> , CO

<sup>(2)</sup> Il se dégage également de la vapeur d'eau (non toxique).

<sup>(3)</sup> Il y a formation de NO<sub>x</sub> ; le NO<sub>2</sub> étant le plus toxique des NO<sub>x</sub> il est retenu pour représenter les NO<sub>x</sub> formés.

### Taux de production en gaz de décomposition thermique :

Les taux de production en chacun de ces gaz de combustion sont estimés à partir des hypothèses suivantes :

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
<b>CO, CO<sub>2</sub></b>	100% C => CO + CO <sub>2</sub> $\frac{[CO_2]}{[CO]} = 5 \text{ poids/poids }^{(4)} = 3,2 \text{ mol/mol}$	100% C => CO + CO <sub>2</sub> $\frac{[CO_2]}{[CO]} = 10 \text{ mol/mol }^{(5)} = 15,6 \text{ poids/poids}$
<b>HCN, NO<sub>2</sub></b>	100% N => 50% N <sub>2</sub> + 50% (HCN + NO <sub>2</sub> ) $\frac{[NO_2]}{[HCN]} = 0,3 \text{ poids/poids }^{(6)}$ = 0,18 mol/mol	100% N => 50% N <sub>2</sub> + 50% (HCN + NO <sub>2</sub> ) $\frac{[NO_2]}{[HCN]} = 1 \text{ mol/mol }^{(5)}$
<b>HCl</b>	100% Cl => HCl	100% Cl => HCl <sup>(5)</sup>

<sup>(4)</sup> Incendie dans les tunnels routiers – Guide DSC/DR – Avril 1999 ; Les études spécifiques des dangers (ESD) pour les tunnels du réseau routier – Guide méthodologique – Juillet 2001.

<sup>(5)</sup> Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets – INERIS – rapport Ω16.

<sup>(6)</sup> Handbook of fire protection engineering – Third Edition – SFPE.

Les taux de production en gaz toxiques ainsi évalués sont :

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
<b>CO (g/kg de produit brûlé)</b>	302	115
<b>CO<sub>2</sub> (g/kg de produit brûlé)</b>	1 520	1 798
<b>NO<sub>2</sub> (g/kg de produit brûlé)</b>	7	23
<b>HCN (g/kg de produit brûlé)</b>	23	14
<b>HCl (g/kg de produit brûlé)</b>	88	88

### Débit des fumées :

Le débit de fumées est estimé en appliquant la formule de Heskestad (1984) qui tient compte de la dilution des flammes par l'air. Selon cette corrélation, le débit des fumées est proportionnel à la puissance du foyer.

En admettant un PCI moyen de 30 MJ/kg et un rendement de combustion de 95% pour la combustion complète (conditions bien ventilées) (source INERIS), on obtient les débits de fumées suivants :

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
<b>Débit des fumées (kg/s)</b>	266	16 621

### Composition des fumées :

Compte tenu des taux de production en gaz toxiques et du débit des fumées calculés ci-avant, on en déduit la composition des fumées suivante :

	<b>Incendie débutant mal ventilé</b>	<b>Incendie généralisé bien ventilé</b>
<b>CO (% dans les fumées)</b>	0,82%	0,12%
<b>CO<sub>2</sub> (% dans les fumées)</b>	4,12%	1,95%
<b>NO<sub>2</sub> (% dans les fumées)</b>	0,02%	0,03%
<b>HCN (% dans les fumées)</b>	0,06%	0,01%
<b>HCl (% dans les fumées)</b>	0,24%	0,09%

Le complément est constitué par l'air entraîné avec les fumées par les effets termo-convectifs.

### Hauteur d'émission des fumées :

Dans le cas de l'incendie débutant, les fumées sortent par les exutoires ouverts. La hauteur d'émission des fumées est donc prise à la hauteur des exutoires, égale à la hauteur du bâtiment.

Dans le cas de l'incendie généralisé, les fumées sont émises en partie supérieure du volume formé par les flammes. Dans ce cas, la hauteur d'émission des fumées est prise à la hauteur des flammes déterminée avec la formule de Heskestad. Dans la présente étude, c'est la valeur de hauteur de flamme donnée par Flumilog qui est retenue (car plus faible que celle obtenue avec Heskestad donc pénalisante).

	<b>Incendie débutant mal ventilé</b>	<b>Incendie généralisé bien ventilé</b>
<b>Hauteur d'émission des fumées (m)</b>	13	30

### Température des fumées :

Dans le cas de l'incendie débutant, les fumées sortent par les exutoires ouverts. La température des fumées est donc prise égale à la température d'ouverture des exutoires = 80°C (hypothèse plutôt pénalisante).

Dans le cas de l'incendie généralisé, Heskestad a montré qu'à la hauteur d'émission des fumées, que l'écart moyen entre la température des fumées et la température de l'air ambiant est de l'ordre de 250K. La température des fumées est donc prise égale à 265°C.

	<b>Incendie débutant mal ventilé</b>	<b>Incendie généralisé bien ventilé</b>
<b>Température des fumées (°C)</b>	80	265

### Vitesse d'émission des fumées :

La corrélation proposée par Heskestad, selon laquelle la vitesse des fumées à leur point d'émission est fonction de la puissance du foyer, est utilisée :

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
Vitesse d'émission des fumées (m/s)	8	19

### Toxicité des fumées :

Les seuils de toxicité aigue pour une durée d'exposition de 60 minutes des gaz toxiques considérés dans la présente étude sont donnés dans le tableau suivant :

	CO <sup>(7)</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>(8)</sup>	HCN <sup>(9), (10), (11)</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>(12), (13)</sup>	HCl <sup>(14), (15)</sup>
<b>SELS</b> mg/m <sup>3</sup> ppm	ND	ND	69	138	565
	ND	ND	63	73	379
<b>SPEL</b> mg/m <sup>3</sup> ppm	3 680	ND	45	132	358
	3 200	ND	41	70	240
<b>SEI</b> mg/m <sup>3</sup> ppm	920	73 300	44	75	61
	800	40 000	40	40	40

<sup>(7)</sup> Fiche seuils CO INERIS DRC-09-103128-05616A.

<sup>(8)</sup> Pas de données disponibles ; la valeur retenue est l'IDLH. Le CO<sub>2</sub> n'est pas dimensionnant car beaucoup moins toxique que les autres gaz de combustion ; <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html> - Revised IDLH values (en accord avec le guide de choix de l'INERIS).

<sup>(9)</sup> Le rapport élaboré par l'INERIS en avril 2005 ne présente pas de SEI du fait de l'absence de données toxicologiques pertinentes. Afin de pouvoir réaliser les modélisations, le SEI de HCN a été pris égal au SEI de NO<sub>2</sub>.

<sup>(10)</sup> Seuil de toxicité aigue de l'acide cyanhydrique – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-01-25590-ETSC/TOXI- STi – Avril 2005.

<sup>(11)</sup> Courbes de toxicité aigue par inhalation – Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement – Direction de la prévention de la pollution et des risques – Juin 1998.

<sup>(12)</sup> Seuil de toxicité aigue du dioxyde d'azote – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-03 6 47021-ETSC-Sti – Mai 2004.

<sup>(13)</sup> Détermination des Seuils d'Effets Létaux 5% dans le cadre des réflexions en cours sur les PPRT – INERIS – 03/08/2004.

<sup>(14)</sup> Seuils de toxicité aiguë de l'acide chlorhydrique – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-99-TOXI API/SD – Janvier 2003.

<sup>(15)</sup> Détermination des Seuils d'Effets Létaux 5% dans le cadre de la mise en place des PPRT – INERIS – 26/04/2005.

<sup>(16)</sup> INERIS – *Seuils de toxicité aiguë du chlore* – Janvier 2000.

Les seuils de toxicité équivalents des fumées sont calculés comme suit :

$$SELS_{\text{équivalent}} = \frac{1}{\sum \frac{p_i}{SELS_i}} \quad SPEL_{\text{équivalent}} = \frac{1}{\sum \frac{p_i}{SPEL_i}} \quad SEI_{\text{équivalent}} = \frac{1}{\sum \frac{p_i}{SEI_i}}$$

avec :

pi : proportion d'une substance dans les fumées  
SEi : seuil d'effets de la substance (mg/m<sup>3</sup> ou ppm)

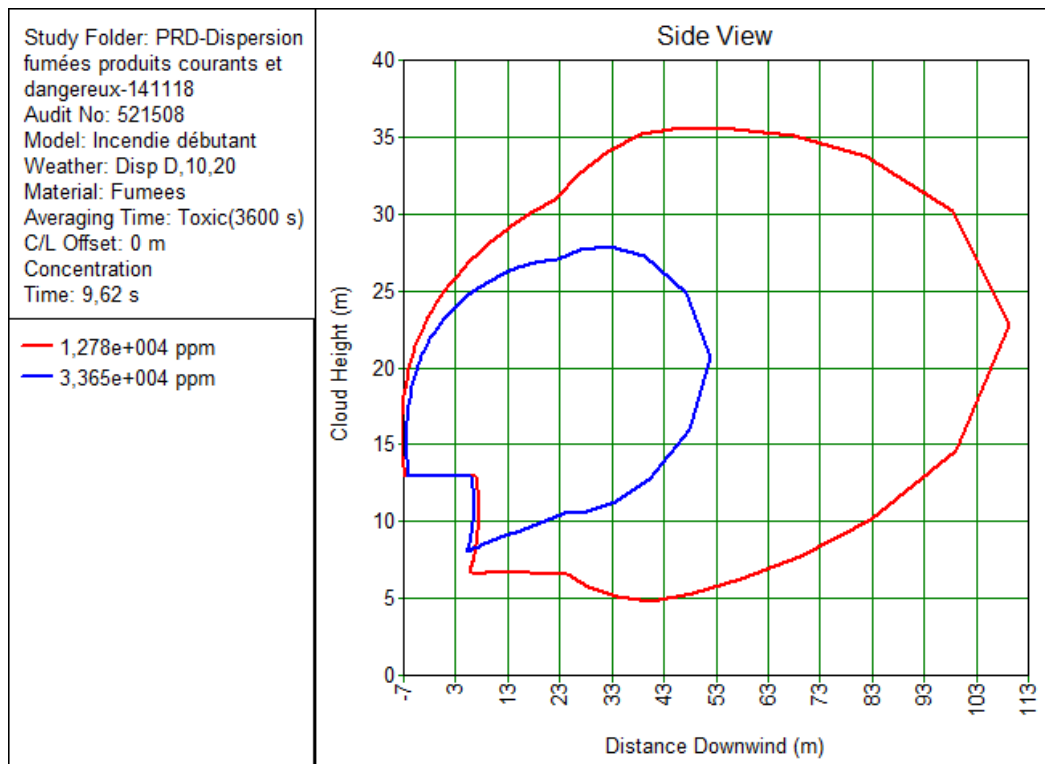
Pour les trois types d'effets, les seuils de toxicité équivalents des fumées ainsi évalués sont :

	<b>Incendie débutant mal ventilé</b>	<b>Incendie généralisé bien ventilé</b>
<b>SELeq</b> mg/m <sup>3</sup> ppm	40 375 33 650	118 450 98 710
<b>SEleq</b> mg/m <sup>3</sup> ppm	15 330 12 780	41 800 34 830

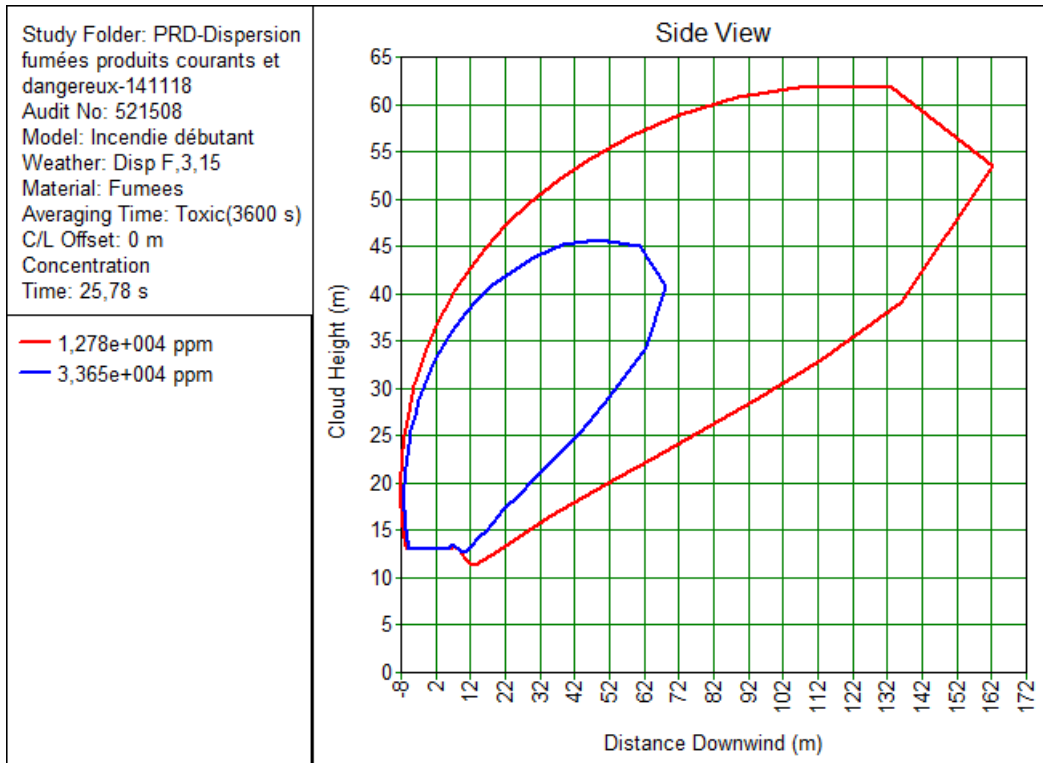
Nota : Le SELseq n'est pas déterminé car pas de valeurs disponibles pour le CO et le CO<sub>2</sub>. Par défaut, il sera pris égal dans cette étude au SPELeq.

### 3.2 ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

#### 3.2.1 Incendie débutant

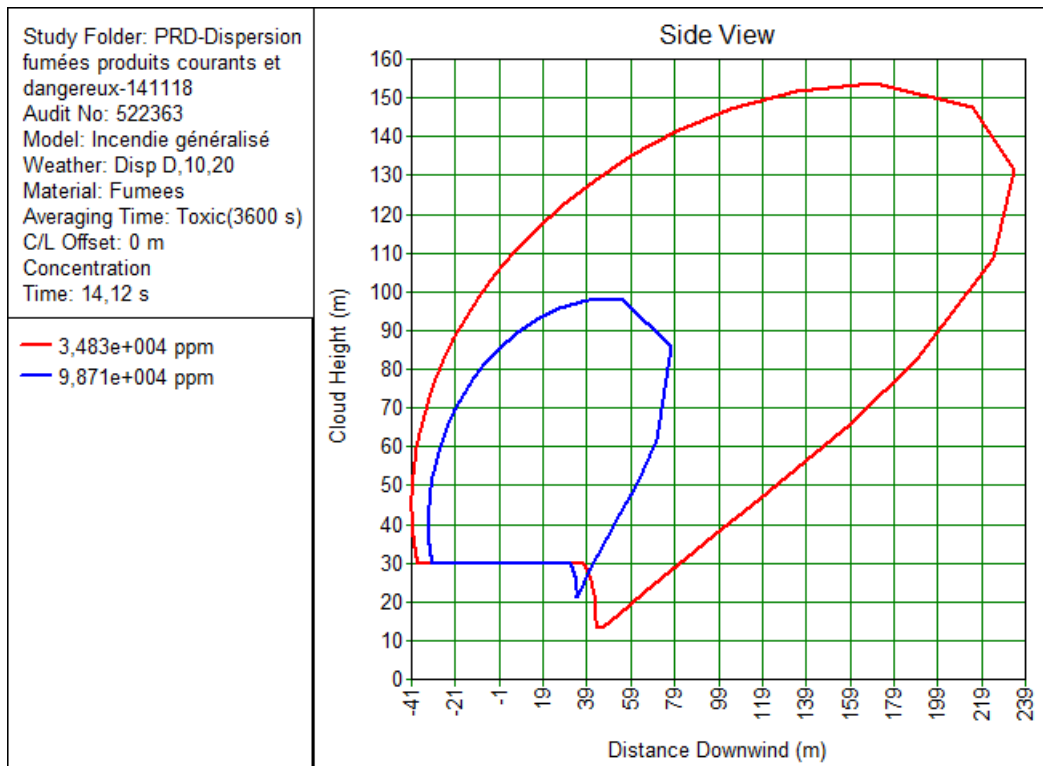


*Coupe du panache dans les conditions les plus défavorables pour une cible au sol (conditions D10 => rabatement du panache au sol)*



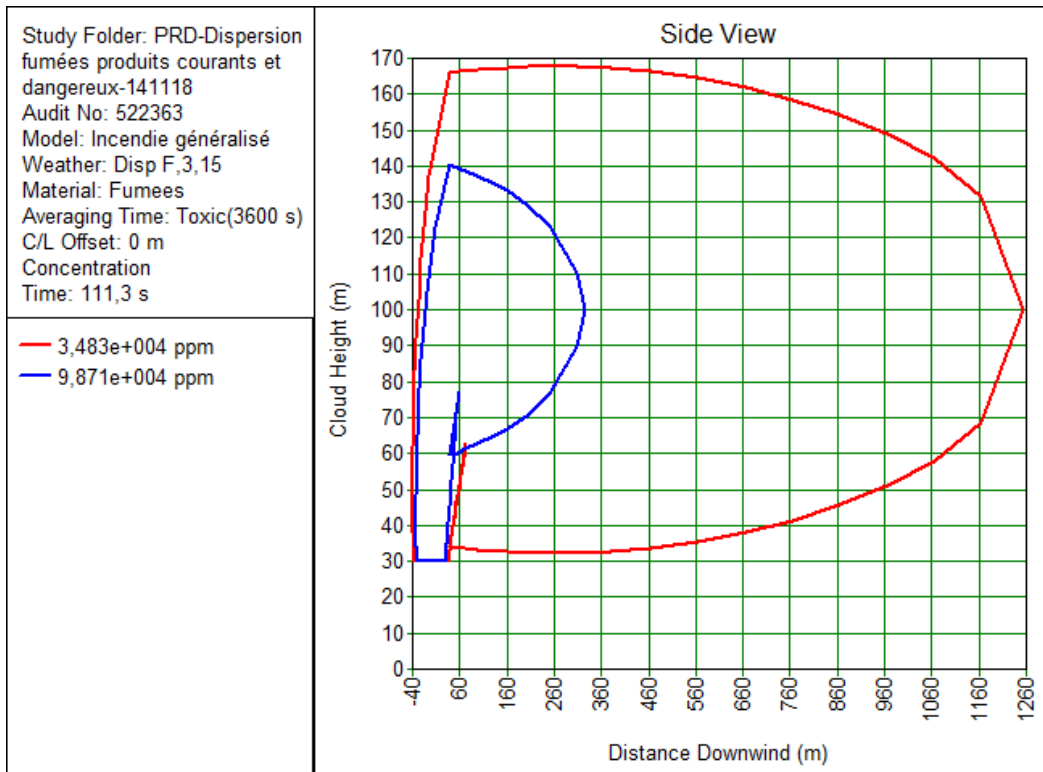
Coupe du panache dans les conditions les plus défavorables pour une cible en hauteur (conditions F3)

### 3.2.2 Incendie généralisé



Coupe du panache dans les conditions les plus défavorables pour une cible au sol (conditions D10 => rabatement du panache au sol)





Coupe du panache dans les conditions les plus défavorables pour une cible en hauteur (conditions F3)

### 3.3 CONCLUSIONS EN TERME DE TOXICITE DES FUMÉES

	SPEL (et, par défaut, SELS)	SEI
<b>Incendie débutant</b>		
<b>Cible à hauteur d'homme</b> (toutes conditions météorologiques)	Non atteint	Non atteint
<b>Cible à 10 m de hauteur (hauteur d'une maison individuelle)</b> (Conditions D10)	20 m	80 m
<b>Cible à 30 m de hauteur (hauteur d'un immeuble d'habitation collective)</b> (Conditions F3)	55 m	100 m
<b>Incendie généralisé</b>		
<b>Cible à hauteur d'homme</b> (toutes conditions météorologiques)	Non atteint	Non atteint
<b>Cible à 10 m de hauteur</b> (toutes conditions météorologiques)	Non atteint	Non atteint
<b>Cible à 30 m de hauteur</b> (Conditions D10)	40 m	80 m

⇒ **A hauteur d'homme, quel que soit le scénario d'incendie (débutant ou généralisé) et quelles que soient les conditions météorologiques, les seuils des effets létaux et irréversibles équivalents des fumées ne sont pas atteints. Il n'y a donc pas de risque toxique à hauteur d'homme.**

⇒ Dans le panache, à une altitude de 10 m (= hauteur d'une maison individuelle), les seuils des effets toxiques irréversibles et létaux seraient atteints jusqu'à une distance respectivement d'environ 80 m et 20 m de la cellule en feu.

⇒ Dans le panache, à une altitude de 30 m (= hauteur d'une maison individuelle), les seuils des effets toxiques irréversibles et létaux seraient atteints jusqu'à une distance respectivement d'environ 100 m et 55 m de la cellule en feu.

### 3.4 CONCLUSIONS EN TERME D'IMPACT DES FUMÉES SUR LA VISIBILITÉ

Les résultats sont donnés pour une cible placée à différentes distances du foyer et dans la configuration la plus pénalisante qui correspond à l'incendie débutant.

Ces distances sont à considérer comme des ordres de grandeur.

Distance du foyer (m)	Concentration maximale en CO <sub>2</sub> (ppm)	Visibilité minimale (m)
100 m	135 ppm	60 m
200 m	80 ppm	100 m
300 m	55 ppm	150 m

⇒ Les fumées auraient un impact sur la visibilité en particulier dans le cas de l'incendie mal ventilé (car fumées chargées d'imbrûlés, émises à température peu élevée donc se dispersant mal). Dans ce cas, jusqu'à une distance d'environ 200 m du foyer, la visibilité pourrait être réduite à une moins de 100 m. Au-delà de 300 m du foyer, l'impact sur la visibilité ne serait plus significatif.

⇒ Dans le cas de l'incendie généralisé, les fumées ont moins d'impact sur la visibilité au sol car elles sont moins concentrées en imbrûlés et leur température élevée favorise leur élévation et dispersion dans l'atmosphère.

⇒ Au-delà du modèle empirique, le retour d'expérience montre que le panache de fumées noires peut être important. Par précaution, les services de secours et d'incendie pourront interdire l'approche de l'entrepôt dans un périmètre à définir (usuellement une centaine de mètre) et interdire la circulation à proximité durant toute la durée d'intervention.