



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

### **SCI LOGISTIQUE BOLLENE**

<b>Indice</b>	0
<b>Date</b>	27/03/2019
<b>Emetteur</b>	Frédéric DELAGE



## 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 .....	6
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>8</b>
<b>3</b>	<b>MODELISATION DES EFFETS DES FUMÉES EN CAS D'INCENDIE .....</b>	<b>9</b>
3.1	CARACTERISATION DU TERME SOURCE .....	9
3.1.1	<i>Données et hypothèses de calcul.....</i>	<i>9</i>
3.1.2	<i>Gaz toxiques de combustion produits.....</i>	<i>9</i>
3.1.3	<i>Emissions d'imbrûlés .....</i>	<i>13</i>
3.2	ÉTUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DE LA TOXICITE DES FUMÉES .....	14
3.2.1	<i>Scénario 1 - Incendie débutant.....</i>	<i>14</i>
3.2.2	<i>Scénario 2 - Incendie généralisé .....</i>	<i>15</i>
3.3	CONCLUSIONS EN TERME DE TOXICITE DES FUMÉES .....	16
3.4	CONCLUSIONS EN TERME D'IMPACT DES FUMÉES SUR LA VISIBILITE .....	17

# 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 thermo-convectifs 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 :

1. 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].
2. le calcul de la dispersion atmosphérique des fumées en tenant compte des conditions météorologiques et orographiques ;
3. l'analyse des conséquences en termes d'effets toxiques. Cette analyse est effectuée en comparant les concentrations au sol obtenues précédemment aux seuils de toxicité équivalents des fumées définis au préalable ;
4. l'analyse des conséquences d'un point de vue de l'opacité des fumées (perte de visibilité au voisinage du panache).

### 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 absorbés 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 FUMEEES 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 (donnée modélisations Flumilog)

##### **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.

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 8.1. 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. Ce type de conditions est assez représentatif des conditions de vents forts (mistral par exemple).

Les résultats (tracés du panache) sont présentés pour les conditions qui 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, une rugosité de surface de 1 m (guide UIC).

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'effet 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 indicatives :

- agglomération DF = 16 m
- nationale DF = 52 m
- autoroute par temps de pluie (110 km/h) DF = 78 m
- autoroute par beau temps (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>)

La densité optique DO est calculée comme suit :

$$DO = \frac{C \times K_m}{2,3}$$

avec :

- C : concentration en particules dans les fumées (g/m<sup>3</sup>)
- K<sub>m</sub> : coefficient spécifique (7,6 g/m<sup>2</sup>) (SFPE Handbook of fire Protection Engineering)

La modélisation de la dispersion atmosphérique des imbrûlés est effectuée à l'aide du logiciel ADMS5 qui est un logiciel de modélisation de la dispersion atmosphérique de fumées. Il tient compte des effets d'élévation du panache dus aux conditions thermodynamiques du rejet.

## 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 une cellule de 6000 m<sup>2</sup>
- **scénario 2** : incendie généralisé, plein régime, dans une cellule de 6000 m<sup>2</sup>

Le stockage est constitué de produits type 1510, 2662, 2663.



### 3 MODELISATION DES EFFETS DES FUMÉES EN CAS D'INCENDIE

#### 3.1 CARACTERISATION DU TERME SOURCE

##### 3.1.1 Données et hypothèses de calcul

<b>Dimensions du bâtiment concerné</b>	Surface : 6000 m <sup>2</sup> Hauteur maximale bâtiment : 13,7 m
<b>Surface du foyer</b>	Pour un local couvert, la configuration « incendie généralisé » est caractérisée par un feu étendu à toute la surface.  La configuration « incendie débutant » est représentée par un feu couvrant 10% de la surface du local.  - Scénario 1 : Incendie débutant mal ventilé : 600 m <sup>2</sup> - Scénario 2 : Incendie généralisé bien ventilé : 6000 m <sup>2</sup>
<b>Produits impliqués dans l'incendie</b>	La composition du stockage est considérée comme suit : - bois-papier-carton : 30 % - polyéthylène-polypropylène (PE/PP) : 25 % - PVC : 10 % - polyuréthane (PU) : 10 % - polyamide (PA) : 25 %
<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 <u>à titre indicatif</u> mais ne sont pas à prendre en compte en l'absence de bâtiments (immeubles d'habitations ou de bureaux) de grande hauteur. Les hauteurs de 10 m et de 30 m dans ce cas.
<b>Logiciel de calcul</b>	PHAST 8.1

##### 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	30%	44,4%	6,2%	49,4%	-	-
Polyéthylène - polypropylène (PE-PP)	25%	85,7%	14,3%	-	-	-
Polychlorure de vinyle (PVC)	10%	38,4%	4,8%	-	-	56,8%
Polyuréthane (PU)	10%	40,9%	6,8%	36,4%	15,9%	-
Polyamide (PA)	25%	63,7%	9,7%	14,2%	12,4%	-

### 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	Eléments 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>(1)</sup>
Polyamide (PA)	C, H, O, N	CO <sub>2</sub> , CO, HCN, NO <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</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

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

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

Afin de déterminer le débit massique des effluents gazeux formés, les hypothèses majorantes suivantes sont retenues :

- La totalité du carbone présent conduit à la formation de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le ratio CO<sub>2</sub> / CO est fonction de la ventilation de l'incendie.
- 50% molaire de l'azote est supposée se recombinaison en azote moléculaire (N<sub>2</sub>). Les 50% d'azote restant sont convertis en dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et en acide cyanhydrique (HCN) à raison de 50 % molaire pour chacun des produits.
- La totalité du chlore (Cl) se retrouve sous forme d'acide chlorhydrique (HCl) quelles que soient les conditions de ventilation.

Les hypothèses retenues sont récapitulées dans le tableau ci-après :

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

<sup>(1)</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>(2)</sup> Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets – INERIS – rapport Ω16.

<sup>(3)</sup> Handbook of fire protection engineering – Third edition - SFPE

Les taux de production en gaz toxiques ainsi évalués sont :

	<b>Incendie débutant mal ventilé</b>	<b>Incendie généralisé bien ventilé</b>
<b>CO (g/kg de produit brûlé)</b>	319	122
<b>CO<sub>2</sub> (g/kg de produit brûlé)</b>	1 604	1 914
<b>NO<sub>2</sub> (g/kg de produit brûlé)</b>	12	39
<b>HCN (g/kg de produit brûlé)</b>	38	23
<b>HCl (g/kg de produit brûlé)</b>	58	58

### 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.

	<b>Débit des fumées (kg/s)</b>
<b>Scénario 1 (6000 m<sup>2</sup> - incendie débutant mal ventilé)</b>	938
<b>Scénario 2 (6000 m<sup>2</sup> - incendie généralisé bien ventilé)</b>	9 696

### 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>Scénario 1</b>	<b>Scénario 2</b>
<b>CO (% dans les fumées)</b>	0,20%	0,12%
<b>CO<sub>2</sub> (% dans les fumées)</b>	1,03%	1,87%
<b>HCN (% dans les fumées)</b>	0,02%	0,02%
<b>NO<sub>2</sub> (% dans les fumées)</b>	0,01%	0,04%
<b>HCl (% dans les fumées)</b>	0,04%	0,06%

Le complément est constitué par l'air entraîné avec les fumées par les effets thermo-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 égale à la hauteur maximale déterminée par modélisation avec Flumilog.

	Scénario 1	Scénario 2
Hauteur d'émission des fumées (m)	13,7	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.

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
Température des fumées (°C)	80	265

### Toxicité des fumées :

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

	Seuils de toxicité aigüe par inhalation				
	CO <sup>(1)</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>(2)</sup>	HCN <sup>(3)</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>(4)(5)</sup>	HCl <sup>(6) (7)</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	45	75	61
	800	40 000	41	40	40

(1) Fiche seuils CO INERIS DRC-09-103128-05616A.

(2) Pas de données disponibles ; la seule valeur disponible, et qui est donc retenue, est l'IDLH (<http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html> - Revised IDLH values). Notons toutefois que cette valeur n'a pas d'incidence au vue de la faible toxicité du CO<sub>2</sub> comparée à celle des autres gaz de combustion présents.

(3) Seuil de toxicité aigüe de l'acide cyanhydrique – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-01-25590- ETSC/TOXI- STI – Avril 2005. A défaut de valeur SEI, c'est le SEL qui est retenu également pour le SEI pour les calculs.

(4) Seuil de toxicité aigüe du dioxyde d'azote – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-03 6 47021-ETSC-Sti – Mai 2004.

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

(6) Seuils de toxicité aigüe de l'acide chlorhydrique – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-99-TOXI APi/SD – Janvier 2003.

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

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

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

avec :

$p_i$  : proportion d'une substance dans les fumées  
 $\text{SEI}_i$  : seuil d'effet de la substance ( $\text{mg}/\text{m}^3$  ou ppm)

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

	Scénario 1	Scénario 2
<b>SPELeq</b>		
<b>mg/m<sup>3</sup></b>	129 001	100 444
<b>ppm</b>	106 566	82 719
<b>SEIeq</b>		
<b>mg/m<sup>3</sup></b>	66 999	47 898
<b>ppm</b>	55 347	39 446

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.

### 3.1.3 Emissions d'imbrûlés

Les facteurs d'émission pris en compte pour la production de fumées noires sont issus du « SFPE Handbook of fire protection engineering ».

Matières impliquées dans l'incendie	% massique	Fumées noires (en g/g)
<b>Bois – Carton – Papier</b>	30%	0,015
<b>Polyéthylène - polypropylène (PE-PP)</b>	25%	0,06
<b>Polychlorure de vinyle (PVC)</b>	10%	0,088
<b>Polyuréthane (PU)</b>	10%	0,156
<b>Polyamide (PA)</b>	25%	0,134

### 3.2 ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DE LA TOXICITE DES FUMÉES

#### 3.2.1 Scénario 1 - Incendie débutant

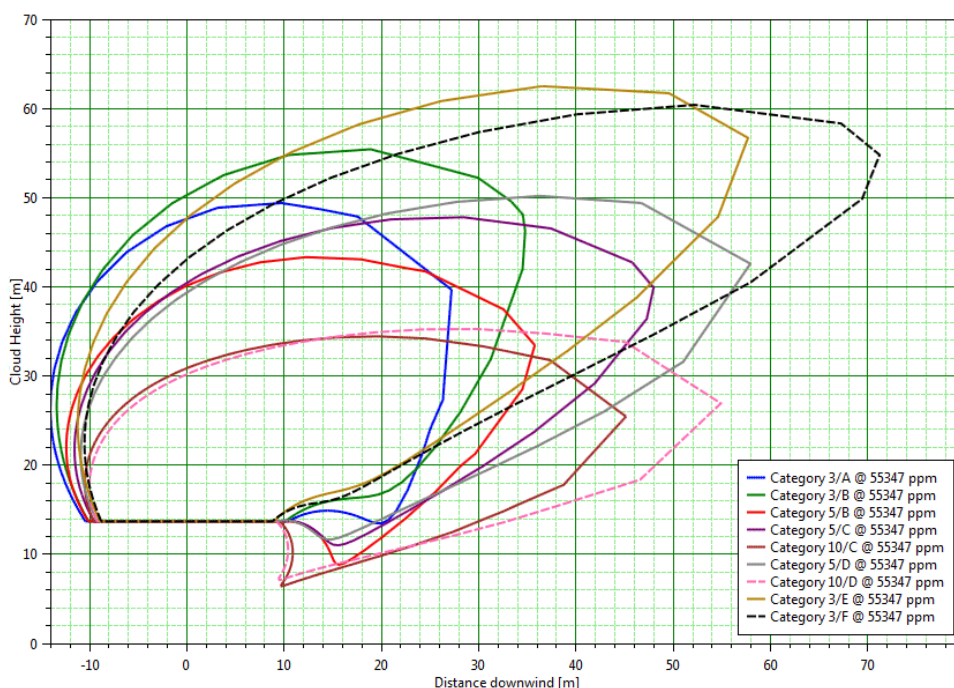
La coupe du panache pour les différentes conditions de dispersion est présentée sur la figure ci-dessous, pour la zone SEI.

Il n'y a pas de zones d'effets à hauteur d'homme.

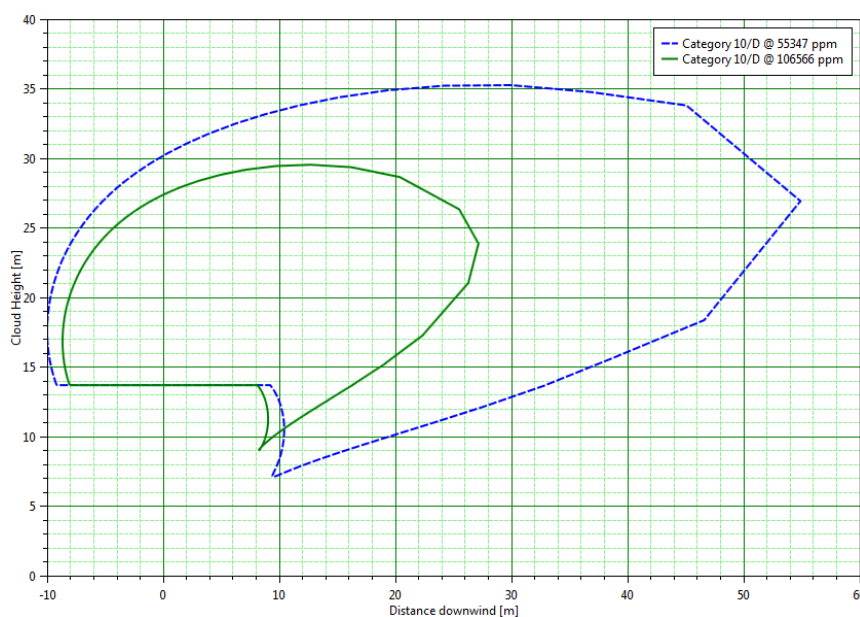
Cette courbe permet de visualiser que les distances les plus pénalisantes sont obtenues :

- Pour une cible en hauteur à 10 m : condition C10 et D10 (courbe rose en pointillé).
- Pour une cible en hauteur à 30m : condition D10 (courbe rose en pointillé).

Cette constatation est également valable pour la zone SEL (non représentée ci-dessous).



Coupe du panache pour les différentes conditions atmosphériques (seuil SEI)



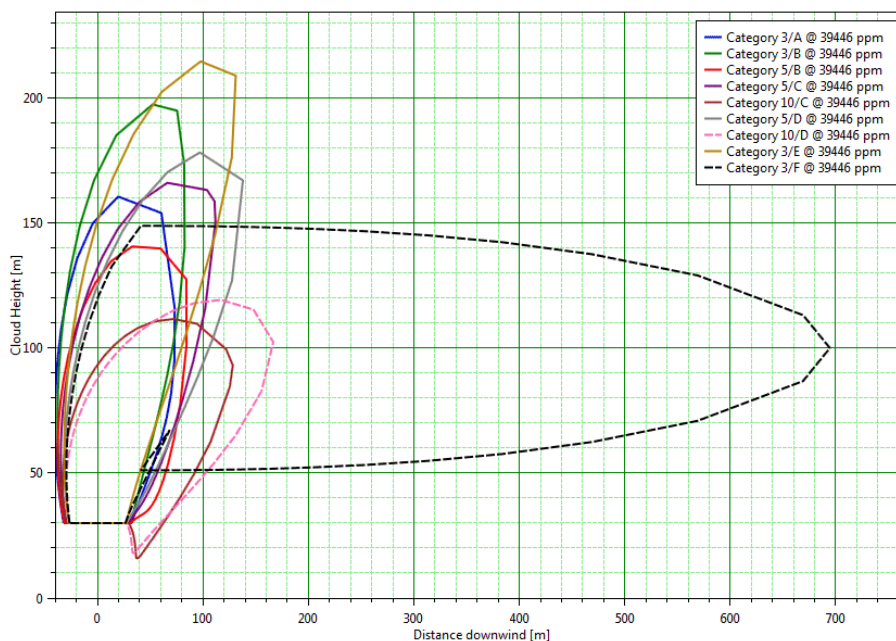
Coupe du panache (à titre indicatif) dans les conditions les plus défavorables pour une cible en hauteur 10 m et 30 m (condition D10)

### 3.2.2 Scénario 2 - Incendie généralisé

La coupe du panache pour les différentes conditions de dispersion est présentée sur la figure ci-dessous, pour la zone SEI. Cette courbe permet de visualiser qu'il n'y a pas de zones d'effets irréversibles à hauteur d'homme.

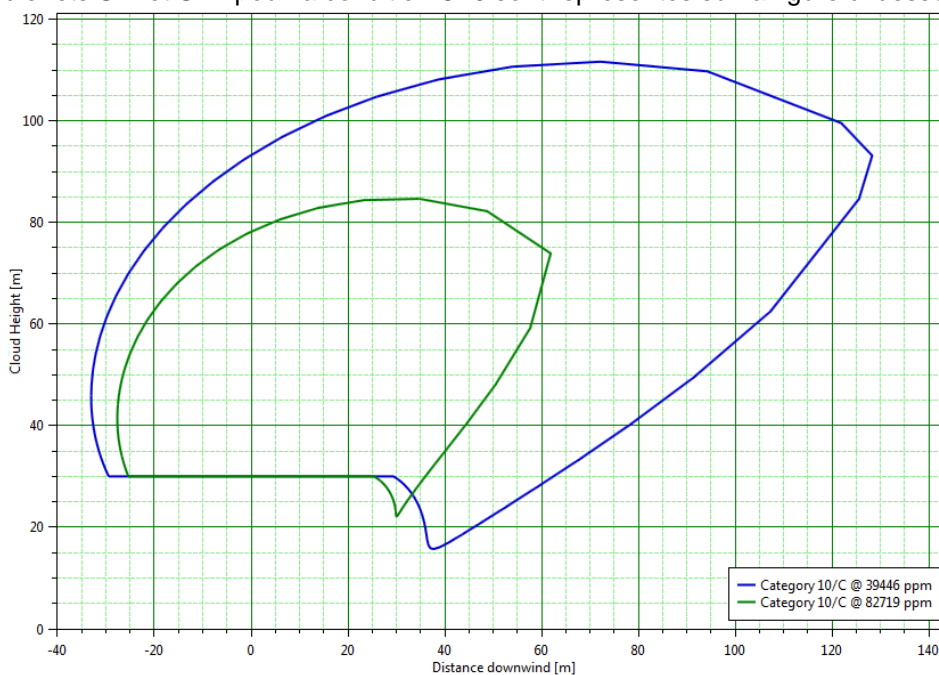
En distance, la condition la plus défavorable est la condition F3 pour des hauteurs supérieures à 30 m.

Pour une cible à une hauteur inférieure à 30 m, la condition la plus défavorable est la condition C10. Les zones d'effets SEI et SEL pour la condition C10 sont représentés sur la figure ci-dessous.



Coupe du panache pour les différentes conditions atmosphériques (seuil SEI)

Les zones d'effets SEI et SEL pour la condition C10 sont représentés sur la figure ci-dessous.



Coupe du panache dans les conditions les plus défavorables (condition C10)

### 3.3 CONCLUSIONS EN TERME DE TOXICITE DES FUMÉES

	Distances <sup>(1)</sup> SPEL	Distances <sup>(1)</sup> SEI	Conditions correspondantes <sup>(2)</sup>
<b>Cible à hauteur d'homme (1,8 m)</b>	Non atteint Non atteint	Non atteint Non atteint	Incendie débutant Incendie généralisé
<b>Cibles en hauteur à titre indicatif</b>			
Cible à 10 m de hauteur	10 m Non atteint	20 m Non atteint	Incendie débutant et condition D10 Incendie généralisé
Cible à 30 m de hauteur (hauteur d'un immeuble d'habitation collective)	12 m 36 m	50 m 63 m	Incendie débutant et condition D10 Incendie généralisé et condition C10

<sup>(1)</sup> Distances comptées à partir des façades du bâtiment en feu

<sup>(2)</sup> les conditions mentionnées correspondantes aux conditions aboutissant aux distances les plus importantes

⇒ **A hauteur d'homme, il n'y a pas de zones d'effets létaux et irréversibles.**



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

Les résultats sont donnés pour une cible placée à différentes distances du foyer et dans la configuration la plus pénalisante.

Ces distances sont à considérer comme des ordres de grandeur.

Visibilité minimale (m)	Distance du foyer (m)
16 m	48 m
52 m	105 m
78 m	130 m
109 m	148 m

⇒ Jusqu'à une distance d'environ 105 m du foyer (pour la configuration la plus défavorable), la visibilité pourrait être réduite à moins de 52 m. Au-delà de 150 m du foyer, l'impact sur la visibilité ne serait plus significatif.

⇒ Cet impact sur la visibilité correspond à la condition D10 (cas le plus défavorable).

⇒ Pour la condition C10, ces distances seraient inférieures de l'ordre de 30 m.

⇒ Pour les autres conditions de dispersion, l'impact sur la visibilité ne serait pas significatif.

⇒ Les impacts sur la visibilité sont essentiellement à redouter dans le cas de l'incendie mal ventilé (car fumées chargées d'imbrûlés, émises à température peu élevée donc se dispersant mal) et avec des rabattements de panache.

⇒ 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 du bâtiment en feu dans un périmètre à définir (usuellement une centaine de mètres) et interdire la circulation à proximité durant toute la durée d'intervention.