

Bureau Veritas
Service Risques Industriels
16 Chemin du Jubin
BP 26
69 571 DARDILLY CEDEX

Responsables de l'étude :

Cécile DUBIEN
Tél. 04 72 29 70 68
cecile.dubien@fr.bureauveritas.com

Emilie THOLLIN
Tél. 04 72 29 32 62
emilie.thollin@fr.bureauveritas.com



Modélisation de la dispersion des fumées en cas d'incendie

PRD Beauvais



SOMMAIRE

1	PHENOMENES DANGEREUX ETUDIES	3
2	DEMARCHE D'EVALUATION DES EFFETS DES FUMEEES EN CAS D'INCENDIE	4
2.1	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	4
2.2	METHODOLOGIE GENERALE	4
2.3	EVALUATION DE LA NATURE ET DU TAUX DE PRODUCTION EN GAZ OU VAPEURS TOXIQUES	5
2.4	DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMOCINETIQUES DU FEU : DEBIT, HAUTEUR ET TEMPERATURE DES FUMEEES EMISES	6
2.5	MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES FUMEEES.....	6
2.6	ANALYSE DES CONSEQUENCES DU POINT DE VUE DE LA TOXICITE DE L'AIR	8
2.7	EVALUATION DE L'IMPACT DES FUMEEES SUR LA VISIBILITE	9
3	MODELISATION	10
3.1	CARACTERISATION DU TERME SOURCE.....	10
3.1.1	<i>Données et hypothèses de calcul.....</i>	10
3.1.2	<i>Gaz de combustion toxiques</i>	11
3.1.3	<i>Débit des fumées.....</i>	15
3.1.4	<i>Composition des fumées</i>	15
3.1.5	<i>Hauteur d'émission des fumées</i>	15
3.1.6	<i>Température des fumées.....</i>	16
3.1.7	<i>Vitesse d'émission des fumées</i>	16
3.1.8	<i>Toxicité des fumées.....</i>	16
3.2	ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE.....	18
3.2.1	<i>PhD 1 – Incendie débutant.....</i>	18
3.2.2	<i>PhD 2 – Incendie généralisé.....</i>	19
4	CONCLUSIONS	20
4.1	CONCLUSIONS EN TERMES DE TOXICITE DES FUMEEES.....	20
4.2	CONCLUSIONS EN TERMES D'IMPACT DES FUMEEES SUR LA VISIBILITE.....	21

1 PHENOMENES DANGEREUX ETUDIES

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 scénarios sont modélisés :

- **scénario 1** : incendie débutant, mal ventilé, dans une cellule ;
- **scénario 2** : incendie généralisé, plein régime, d'une cellule.

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 cellule 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).

Dans le cadre de la présente étude, l'incendie dans une cellule de 12 000 m² de produits 2662 ou 2663 (produits à base de polymères) a été considéré. Cet incendie est en effet dimensionnant car les matières plastiques produisent plus de gaz de combustion toxiques (par exemple des oxydes d'azote, du cyanure d'hydrogène, du chlorure d'hydrogène, ...) que les autres combustibles tels que le bois, le carton, le papier (rubriques 1530, 1532) ou les produits classés en 1511 (Nota : absence de panneaux sandwich en polyuréthane).

2 DEMARCHE D'EVALUATION DES EFFETS DES FUMÉES EN CAS D'INCENDIE

2.1 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.
- [3] SFPE – Handbook of fire protection engineering – 3rd edition.
- [4] 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.
- [5] Flammability Handbook for Plastics – Carlos J. Hilado – 4th edition.
- [6] Produits de dégradation des matières plastiques – INRS – 1999.
- [7] A Literature Review of the Chemical Nature and Toxicity of the Decomposition Products of Polyethylenes – Maya Paabo and Barbara C. Levin – FIRE AND MATERIALS, VOL. 11, 55-70 (1987).
- [8] Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de déchets et de produits issus de la biomasse – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-11-118389-04583A – 12/04/2011.
- [9] Caractéristique des émissions de polluants engendrées par l'incendie de cinq produits types – Rapport d'étude DRC-09-93632-01522A – INERIS – 23/01/2009.
- [10] Toxicity of the Pyrolysis and Combustion Products of Poly (Vinyl Chlorides): A Literature Assessment – Clayton Huggett and Barbara C. Levin – FIRE AND MATERIALS VOL. II, 131-142 (1987).
- [11] G. A. BRIGGS – « Plume Rise », U.S. Atomic Energy Commission, Office of information Services – 1969.
- [12] INERIS – Rapport d'étude 04/11/2005 N° 71165/P01b – « Estimation de l'exposition aux fumées de l'incendie du 27/06/2005 sur le site de SBM Formulation à Béziers.

2.2 METHODOLOGIE GENERALE

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).

2.3 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 incombustibles) 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.

La nature des gaz ou vapeurs nocifs ou toxiques émis lors de l'incendie est fonction des éléments simples (C, H, O, N, Cl, ...) présents dans les produits brûlés. Les données disponibles dans les FDS des produits (Section 3 – Composition/informations sur les composants et Section 10 – Stabilité et réactivité) et dans la littérature sont également utiles.

La proportion des différents gaz et vapeurs toxiques émis et les débits de production de ces gaz et vapeurs sont fonction des conditions externes, notamment de la température et de la disponibilité de l'oxygène. Ils sont évalués sur la base d'hypothèses fondées sur des résultats d'essais (INERIS [2], CNPP).

Remarques sur les hypothèses considérées :

- 1) Seuls les gaz ou vapeurs toxiques gazeux majeurs sont pris en compte. 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, ...).
- 2) 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.

2.4 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 (en tenant compte d'un rendement de 95%) :

$$Q_{\text{fum}} \text{ (kg/s)} = 3,24 \times P \text{ avec } P \text{ puissance en MW.}$$

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.

2.5 MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES FUMEEES

La dispersion atmosphérique est modélisée au moyen du logiciel PHAST version 6.7 qui 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 conforme 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.

Les trois paramètres importants pour la phase de dispersion qu'intègre le logiciel PHAST sont :

- les conditions météorologiques ;
- les conditions orographiques (coefficient de rugosité du terrain uniforme) ;
- un facteur correctif de dispersion du nuage (averaging time).

Conditions météorologiques :

Les conditions météorologiques régissent la cinétique de la phase gaz après la phase de rejet. Elles sont définies par une classe de stabilité (classe de Pasquill), la vitesse de vent à 10 mètres de hauteur et la température ambiante.

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 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.

Quelles que soient les conditions atmosphériques, l'humidité relative de l'air est considérée égale à 70%.

A chaque classe de stabilité est associée une hauteur de couche d'inversion de température qui joue le rôle de « couvercle thermique » puisque cette couche est quasiment franchissable par un nuage de polluants.

Ce phénomène se produit généralement la nuit pendant laquelle le sol se refroidit plus vite que l'atmosphère (température à quelques centaines de mètres d'altitude supérieure à celle mesurée au niveau du sol). Le phénomène est accentué en cas de vent faible.

Une hauteur de la couche d'inversion est considérée par défaut, dans le logiciel PHAST, en fonction de la classe de stabilité atmosphérique. Elle est la plus faible pour les conditions F, égale à 100 m.

Toutefois, dans le cas d'un incendie de grande ampleur, compte tenu de l'énergie thermo-cinétique initiale des fumées, la couche d'inversion serait « transpercée » et le panache de fumées s'élèverait dans le champ proche de l'incendie (typiquement les 100 premiers mètres). Ceci a été confirmé par le REX (Buncefield, SBM Béziers).

Dans ce cas (incendie de grande ampleur), la hauteur à partir de laquelle une couche d'inversion serait en mesure de stopper l'élévation du panache malgré son énergie thermo-cinétique restante, doit être ajustée. Pour ce faire, on retient les corrélations proposées par Briggs [11] qui permettent de calculer l'altitude de culmination Δh 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 l'altitude de la couche d'inversion [12].

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.

« Averaging time » et « core averaging time » ou durée de moyennage du nuage :

Dans le logiciel PHAST, il existe deux paramètres distincts pour le temps de moyennage du nuage : l'averaging time et le core averaging time. Ces deux paramètres n'interviennent que dans la phase de dispersion passive.

L'averaging time correspond à une correction numérique des concentrations moyennes calculées sur l'axe du nuage en fonction de la durée effective d'observation du nuage (= durée d'exposition pour les toxiques), afin de tenir compte en particulier des fluctuations réelles de direction du vent autour de sa direction moyenne pendant la durée d'observation. Il est à noter que cette correction n'intervient que dans la phase de dispersion passive (emploi d'un modèle gaussien).

La valeur du core averaging time est utilisée lors du calcul de la dispersion du nuage, tandis que la valeur de l'averaging time est utilisée uniquement lors de la phase de post-traitement, pour certains résultats.

Le choix de l'averaging time (ou durée de moyennage du nuage) dans les logiciels faisant appel à des modèles de type gaussien peut impacter significativement les distances d'effet.

L'averaging time et le core averaging time sont fixés à la même valeur, égale à la durée d'exposition de la cible, laquelle est prise égale à la durée du rejet pour les rejets de longue durée.

2.6 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 aigüe 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 :

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

avec :

- p_i : proportion de la substance i dans les fumées (% massique ou % volumique)
- $SELS_i ; SPEL_i, SEI_i$: seuil d'effets de la substance i (mg/m^3 ou ppm)

Cette démarche permet de rendre compte du mélange gazeux que sont les fumées, composées de gaz toxiques (CO , NO_2 , ...) 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.

2.7 EVALUATION DE L'IMPACT DES FUMÉES SUR LA VISIBILITÉ

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⁻¹) - $DO = 36040 \frac{CO_2}{Tf}$ où :
Tf : température des fumées au point où est calculée DO (K) – Tf au sol = T ambiante
CO₂ : fraction volumique de CO₂ au même point (m³ de CO₂/ m³ de mélange gazeux)

3 MODELISATION

3.1 CARACTERISATION DU TERME SOURCE

3.1.1 Données et hypothèses de calcul

Dimensions de la cellule considérée	Surface : 12 000 m ² Hauteur toiture : 13 m (13,75 m au faitage)	
Surface du foyer	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.	
	Incendie débutant	Incendie généralisé
	1 200 m ²	12 000 m ²
Produits impliqués dans l'incendie	<p>Nous avons considéré les produits et pourcentages massiques suivants (composition de palette cohérente avec la composition de la palette type 2663 Flumilog et privilégiant les produits susceptibles de générer le plus de gaz toxiques (polyamide)) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - bois-papier-carton (palettes, emballages, produits) : 30% - polyéthylène-polypropylène (PE / PP) : 50% - polychlorure de vinyle (PVC) : 10% - polyamide (PA) et polyuréthane (PU) : 10% <p><u>Nota</u> : les autres matières (coton, polyester, ...) sont assimilables soit à du bois-papier-carton (matières cellulosiques), soit à du PE.</p>	

Taux massique surfacique de combustion	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
	6,5 g/m ² .s ⁽²⁾	16 g/m ² .s ⁽¹⁾
	<p>⁽¹⁾ Valeur moyenne, estimée sur la base des données suivantes, issues de la littérature (rapports INERIS et FLUMILOG) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - taux de combustion du bois-papier-carton = 17 g/m².s - taux de combustion du PE = 15 g/m².s - taux de combustion du PA = 13,5 g/m².s - taux de combustion du PU = 21 g/m².s - taux de combustion du PVC = 18 g/m².s <p>⁽²⁾ 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> [3].</p>	
Puissance du foyer	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
	225 MW ⁽⁴⁾	14 091 MW ⁽³⁾
	<p>⁽³⁾ Valeur obtenue par FLUMILOG lors de l'évaluation des flux thermiques.</p> <p>⁽⁴⁾ La puissance de l'incendie est fonction des conditions de ventilation de l'incendie : elle est moins élevée lorsque le feu est mal ventilé (= cas de l'incendie débutant, mal oxygéné). La valeur considérée s'appuie les données du SFPE – <i>Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires</i> [3]. Elle est conservatrice (pénalisante).</p>	
Hauteur de flammes	Hf = 27,5 m (résultat FLUMILOG)	
Hauteur et position de la cible	La cible est supposée verticale, placée à 1,8 m de hauteur = stature maximale d'un homme. Les effets en hauteur sont également indiqués jusqu'à 30 m de hauteur maximum (= hauteur d'un immeuble).	
Logiciel de calcul	PHAST 6.7	

3.1.2 Gaz de combustion toxiques

1- Données issues de la littérature :

Carton-Papier et (produits assimilés à de la cellulose) :

De par sa composition (carbone, hydrogène, oxygène), la cellulose ((C₆H₁₀O₅)_n) produit en brûlant, essentiellement du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO₂).

Les gaz de combustion toxiques retenus pour le carton, le papier sont :

- du monoxyde de carbone (CO) ;
- du dioxyde de carbone (CO₂).

Bois : (Réf. [8])

La combustion du bois dégage essentiellement des oxydes de carbone (CO et CO₂).

D'autres substances peuvent, cependant, être générées, en fonction des traitements, peintures, vernis qui ont été appliqués.

Par exemple, le bois utilisé dans la construction (plaques, poudres, le plus souvent traitées) émet en brûlant des COV, des NOx (liés à la présence de colles dans les panneaux de particules de bois) et, en moindres quantités, de l'HCl.

Il se forme également des HAP, des PCB ainsi que des dioxines-furanes surtout si le bois a été traité. Si les bois ont été peints ou vernis, ils peuvent contenir de nombreux pigments métalliques qui sont à l'origine d'émission de métaux, notamment de plomb et de zinc.

Ces sous-produits de combustion sont toutefois émis en très faibles quantités et pour la plupart, n'ont pas de seuils de toxicité aiguë. Ils ne sont pas considérés dans la présente étude.

Les gaz de combustion toxiques retenus pour le bois sont donc :

- du monoxyde de carbone (CO) ;
- du dioxyde de carbone (CO₂).

Polyéthylène (PE / PEHD) (ou polypropylène): (Réf. [5], [6], [7])

Formule chimique du polyéthylène : (CH₂ = CH₂)_n

En l'absence d'oxygène, les principaux produits de décomposition thermique sont des hydrocarbures tels que le propylène, l'isobutylène et le 2-butène. Des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) tels que le benzo(a)pyrène sont également détectés en très faible teneur.

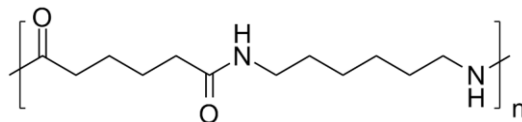
En présence d'oxygène, avec ou sans flammes, les principaux produits de décomposition thermique du polyéthylène sont le dioxyde de carbone (CO₂) et le monoxyde de carbone (CO). Des hydrocarbures aliphatiques (méthane) et aromatiques polycycliques (HAP) tels que le benzo(a)pyrène sont également détectés en très faible teneur. Parmi l'ensemble des produits générés, le CO apparaît comme le composé toxique prédominant.

Les gaz de combustion toxiques retenus pour le polyéthylène et le polypropylène sont :

- du monoxyde de carbone (CO) ;
- du dioxyde de carbone (CO₂).

Polyamide : Réf. [5], [6])

Formule chimique du polyamide 6-6 :



Le polyamide génère, lors de sa combustion ou pyrolyse, essentiellement des oxydes de carbone (CO, CO₂), mais également du cyanure d'hydrogène (HCN), des oxydes d'azote (NOx) et de l'ammoniac (NH₃) moins toxique que HCN et les NOx.

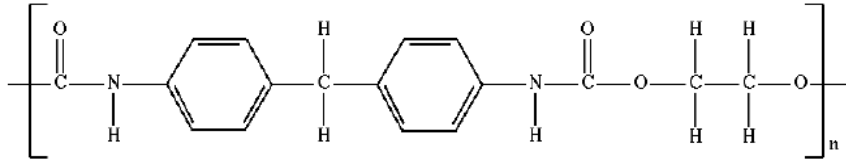
De nombreuses autres molécules peuvent également produites telles que des nitriles, des aldéhydes et des hydrocarbures mais en quantité infimes.

Les gaz de combustion toxiques retenus pour le polyamide sont :

- du monoxyde de carbone (CO) ;
- du dioxyde de carbone (CO₂) ;
- du cyanure d'hydrogène (HCN) ;
- du dioxyde d'azote (NO₂) représentatif des NOx car le plus toxique des NOx.

Polyuréthane : Réf. [6])

Formule chimique du polyuréthane :



Le polyuréthane génère, lors de sa combustion ou pyrolyse, essentiellement des oxydes de carbone (CO, CO₂), mais également du cyanure d'hydrogène (HCN), des oxydes d'azote (NO_x) et de l'ammoniac (NH₃) moins toxique que HCN et les NO_x.

De nombreuses autres molécules peuvent également produites telles que des nitriles, des aldéhydes et des hydrocarbures mais en quantité infimes.

Les gaz de combustion toxiques retenus pour le polyuréthane sont :

- du monoxyde de carbone (CO) ;
- du dioxyde de carbone (CO₂) ;
- du cyanure d'hydrogène (HCN) ;
- du dioxyde d'azote (NO₂) représentatif des NO_x car le plus toxique des NO_x.

Polychlorure de vinyle : Réf. [5], [6], [9], [10])

La combustion du PVC de formule brute (CH₂-CHCl)_n génère de nombreux produits mais majoritairement de l'HCl, du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO₂) en proportions variables selon les conditions d'oxygénation et de température.

De nombreuses autres molécules chlorées et non chlorées sont également produites telles que du benzène, du toluène, du formaldéhyde, du chloroforme, des dioxines et dibenzofuranes. Les dioxines et dibenzofuranes se forment uniquement en présence d'oxygène, au cours du refroidissement des gaz et des suies. Les quantités de dioxines et dibenzofuranes retrouvées dans des résidus de feux réels sont de l'ordre du ppb.

La production de phosgène en situation d'incendie est réputée négligeable devant la production de chlorure d'hydrogène (HCl).

A noter : La bibliographie analysée ne fait pas référence à la production de PCB.

Synthèse des 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
Bois – Carton – Papier	C, H, O	CO ₂ , CO
Polyéthylène / polypropylène (PE / PP)	C, H	CO ₂ , CO
Polychlorure de vinyle (PVC)	C, H, Cl	CO ₂ , CO, HCl
Polyuréthane (PU)	C, H, O, N	CO ₂ , CO, HCN, NO ₂ ⁽⁵⁾
Polyamide (PA)	C, H, O, N	CO ₂ , CO, HCN, NO ₂ ⁽⁵⁾

(Il se dégage également de la vapeur d'eau (non toxique)).

⁽⁵⁾ Il y a formation de NO_x ; le NO₂ étant le plus toxique des NO_x il est retenu pour représenter les NO_x formés.

2- Taux de production en gaz de décomposition thermique :

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

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)	50%	85,7%	14,3%	-	-	-
Polychlorure de vinyle (PVC)	10%	38,4%	4,8%	-	-	56,8%
Polyuréthane (PU)	5%	40,9%	6,8%	36,4%	15,9%	-
Polyamide (PA)	5%	63,7%	9,7%	14,2%	12,4%	-

Puis, sont calculés les taux de production des gaz toxiques produits (CO, CO₂, HCN, NO₂, ...) à partir des hypothèses suivantes :

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
CO, CO ₂	100% C => CO + CO ₂ $\frac{[CO_2]}{[CO]} = 5 \text{ poids/poids }^{(6)} = 3,2 \text{ mol/mol}$	100% C => CO + CO ₂ $\frac{[CO_2]}{[CO]} = 10 \text{ mol/mol }^{(7)} = 15,6 \text{ poids/poids}$
HCN, NO ₂	100% N => 50% N ₂ + 50% (HCN + NO ₂) $\frac{[NO_2]}{[HCN]} = 0,3 \text{ poids/poids }^{(8)}$ = 0,18 mol/mol	100% N => 50% N ₂ + 50% (HCN + NO ₂) $\frac{[NO_2]}{[HCN]} = 1 \text{ mol/mol }^{(7)}$
HCl	100% Cl => HCl	100% Cl => HCl ⁽⁷⁾

⁽⁶⁾ 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 [4].

⁽⁷⁾ Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets – INERIS – rapport Ω16 [2].

⁽⁸⁾ Handbook of fire protection engineering – Third Edition – SFPE [3].

Les taux de production en gaz toxiques ainsi évalués sont :

	Incendie débutant	Incendie généralisé
CO (g/kg de produit brûlé)	359	136
CO₂ (g/kg de produit brûlé)	1 809	2 131
NO₂ (g/kg de produit brûlé)	4	12
HCN (g/kg de produit brûlé)	12	7
HCl (g/kg de produit brûlé)	58	58

3.1.3 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 considérant la puissance obtenue par FLUMILOG dans le cadre de la modélisation des effets thermiques ($P = 7\,027\text{ MW}$), on obtient les débits de fumées suivants :

	Incendie débutant	Incendie généralisé
Débit des fumées (kg/s)	693	43 372

3.1.4 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 :

	Incendie débutant	Incendie généralisé ²
CO (% dans les fumées)	0,40%	0,06%
CO₂ (% dans les fumées)	2,01%	0,94%
NO₂ (% dans les fumées)	0,004%	0,005%
HCN (% dans les fumées)	0,01%	0,003%
HCl (% dans les fumées)	0,06%	0,03%

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

3.1.5 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 obtenue dans l'étude des flux thermiques qui est retenue (car plus faible que celle déterminée avec Heskestad donc pénalisante).

	Incendie débutant	Incendie généralisé
Hauteur d'émission des fumées (m)	13	27,5

3.1.6 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	Incendie généralisé
Température des fumées (°C)	80	265

3.1.7 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	Incendie généralisé
Vitesse d'émission des fumées (m/s)	10	23

3.1.8 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 :

	Valeurs toxicologiques de références Seuils de toxicité aigüe par inhalation (mg/m ³ / ppm)					
	CO ⁽⁹⁾	CO ₂ ⁽¹⁰⁾	HCN ^{(11), (12), (13)}	NO ₂ ^{(14), (15)}	HCl ^{(16), (17)}	
SELS	mg/m ³	ND	ND	69	138	565
	ppm	ND	ND	63	73	379
SPEL	mg/m ³	3 680	ND	45	132	358
	ppm	3 200	ND	41	70	240
SEI	mg/m ³	920	73 300	7,8	75	61
	ppm	800	40 000	7,1	40	40

⁽⁹⁾ Fiche seuils CO INERIS DRC-09-103128-05616A.

⁽¹⁰⁾ Pas de données disponibles ; la valeur retenue est l'IDLH. Le CO₂ 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).

⁽¹¹⁾ Le rapport élaboré par l'INERIS en avril 2005 ne présente pas de SEI du fait de l'absence de données toxicologiques pertinentes. Dans ces conditions, en accord avec la circulaire du 10 mai 2010¹, il est possible d'utiliser les seuils américains, en priorité, les seuils AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels) définis par l'US EPA (AEGL-2 pour le SEI). Pour HCN, l'AEGL-2 est de 7,1 ppm. Cette valeur est donc retenue. A noter elle est très faible comparée au SEL de HCN ou au SEI de NO₂ définies au niveau européen. En effet, les AEGL sont protecteurs ramenés aux définitions et au contexte réglementaire de maîtrise de l'urbanisation, en raison de la prise en compte des sous-populations sensibles.

⁽¹²⁾ Seuil de toxicité aiguë de l'acide cyanhydrique – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-01-25590-ETSC/TOXI- STi – Avril 2005.

⁽¹³⁾ Courbes de toxicité aiguë par inhalation – Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement – Direction de la prévention de la pollution et des risques – Juin 1998.

⁽¹⁴⁾ Seuil de toxicité aiguë du dioxyde d'azote – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-03 6 47021-ETSC-Sti – Mai 2004.

⁽¹⁵⁾ Détermination des Seuils d'Effets Létaux 5% dans le cadre des réflexions en cours sur les PPRT – INERIS – 03/08/2004.

⁽¹⁶⁾ Seuils de toxicité aiguë de l'acide chlorhydrique – INERIS – Rapport d'étude N°DRC-99-TOXI APi/SD – Janvier 2003.

⁽¹⁷⁾ 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 :

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

avec :

p_i : proportion de la substance i dans les fumées (% massique ou % volumique)
 $SELS_i ; SPEL_i, SEI_i$: seuil d'effets de la substance i (mg/m³ ou ppm)

Les seuils de toxicité équivalents des fumées ainsi évalués sont :

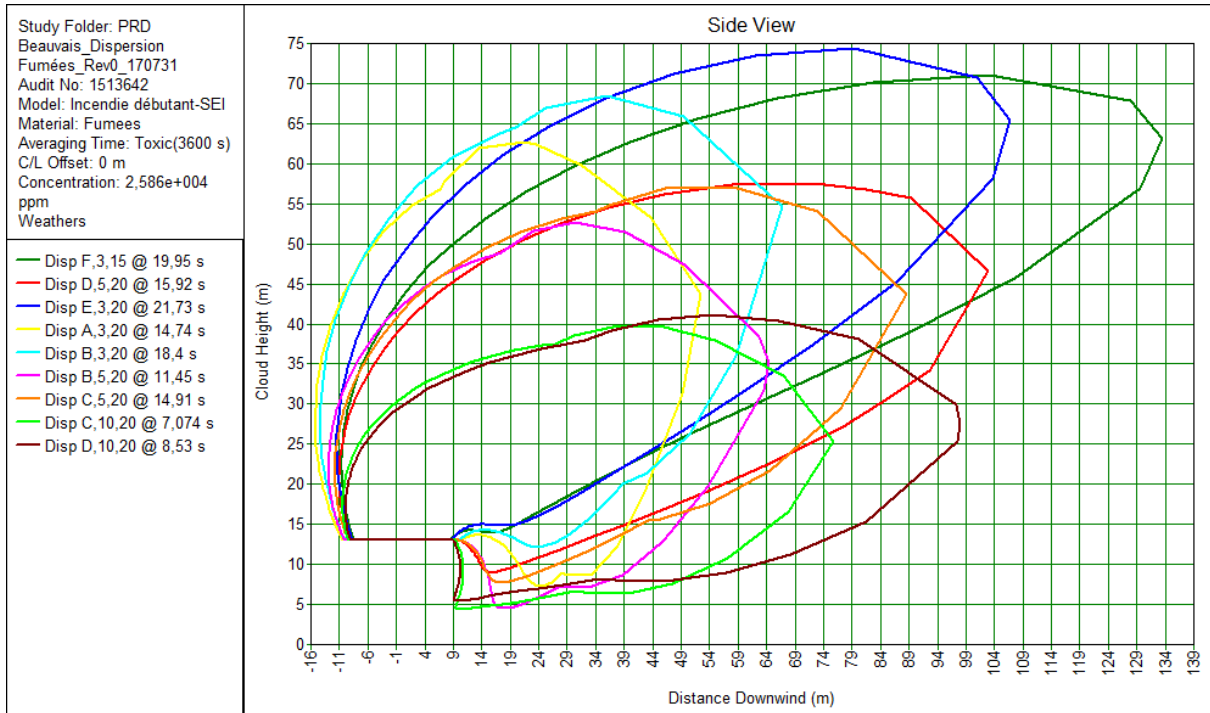
	Incendie débutant	Incendie généralisé
SELeq		
mg/m ³	158 452	481 879
ppm	132 043	401 565
SEIeq		
mg/m ³	31 033	104 230
ppm	25 861	86 859

Nota : Le SELSeq n'est pas déterminé car pas de valeurs disponibles pour le CO et le CO₂. Par défaut, il sera pris égal dans cette étude au SPELeq.

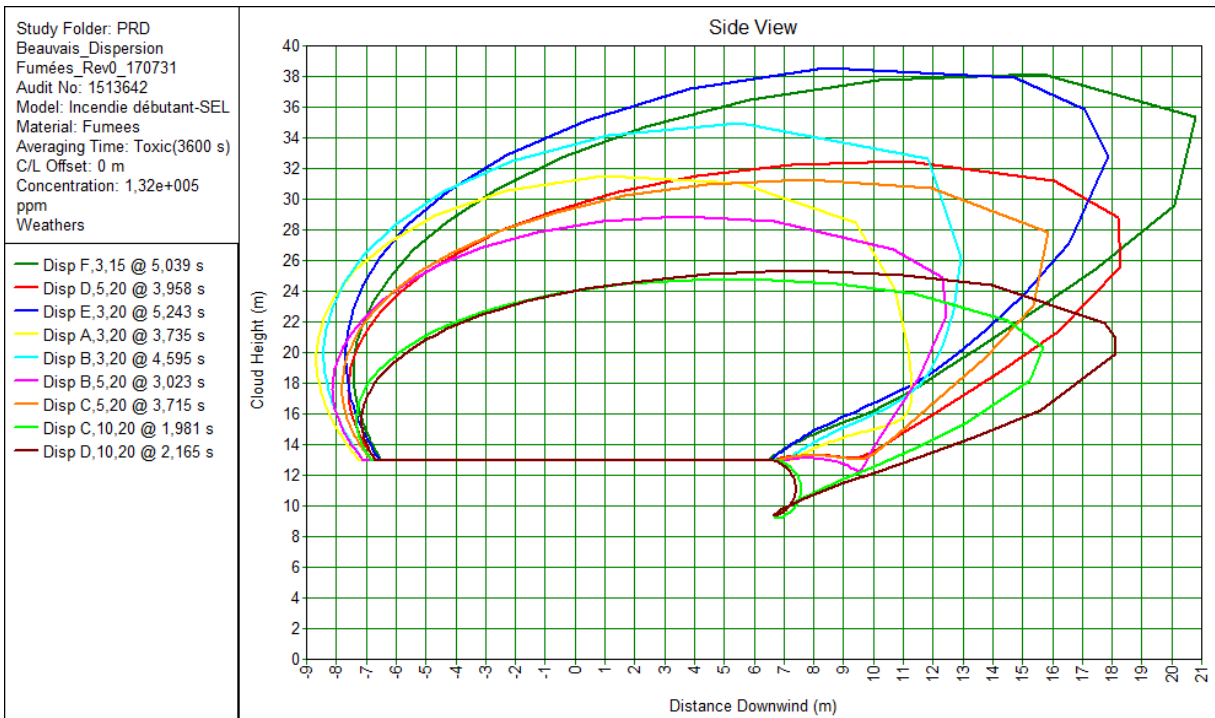
¹ récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

3.2 ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

3.2.1 PHD 1 – Incendie débutant

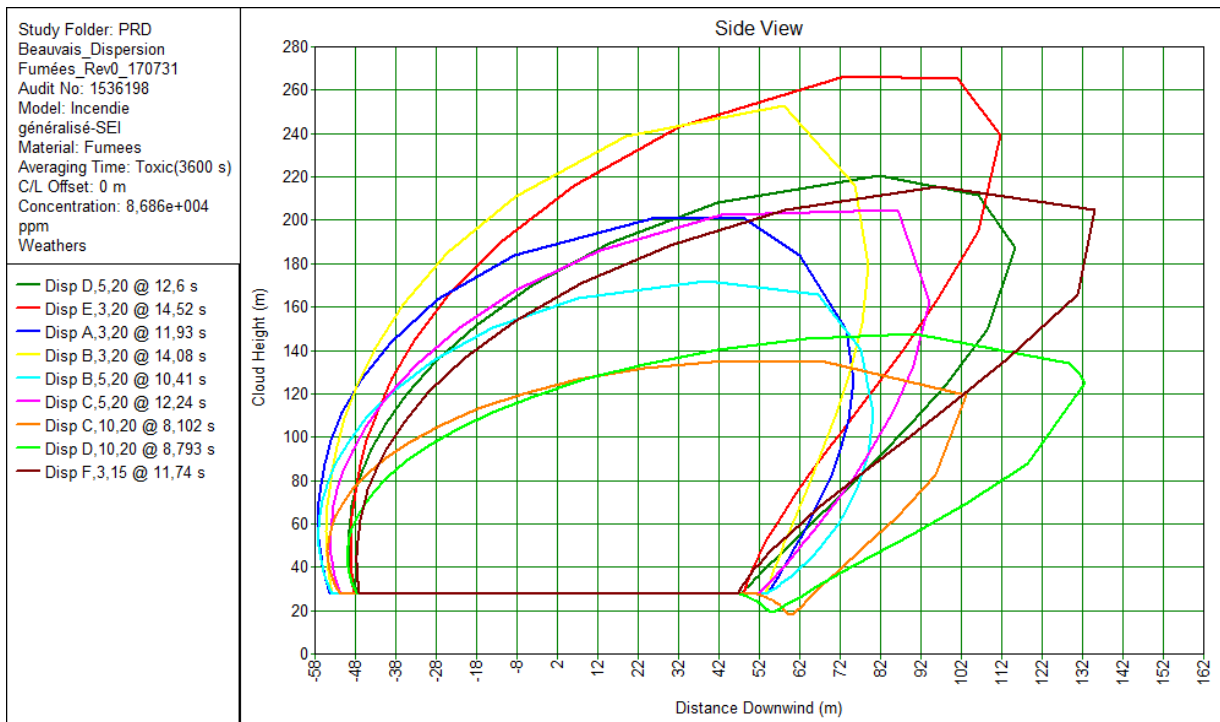


Coupe du panache en concentration correspondant au seuil des effets irréversibles équivalents des fumées, dans l'ensemble des conditions météorologiques

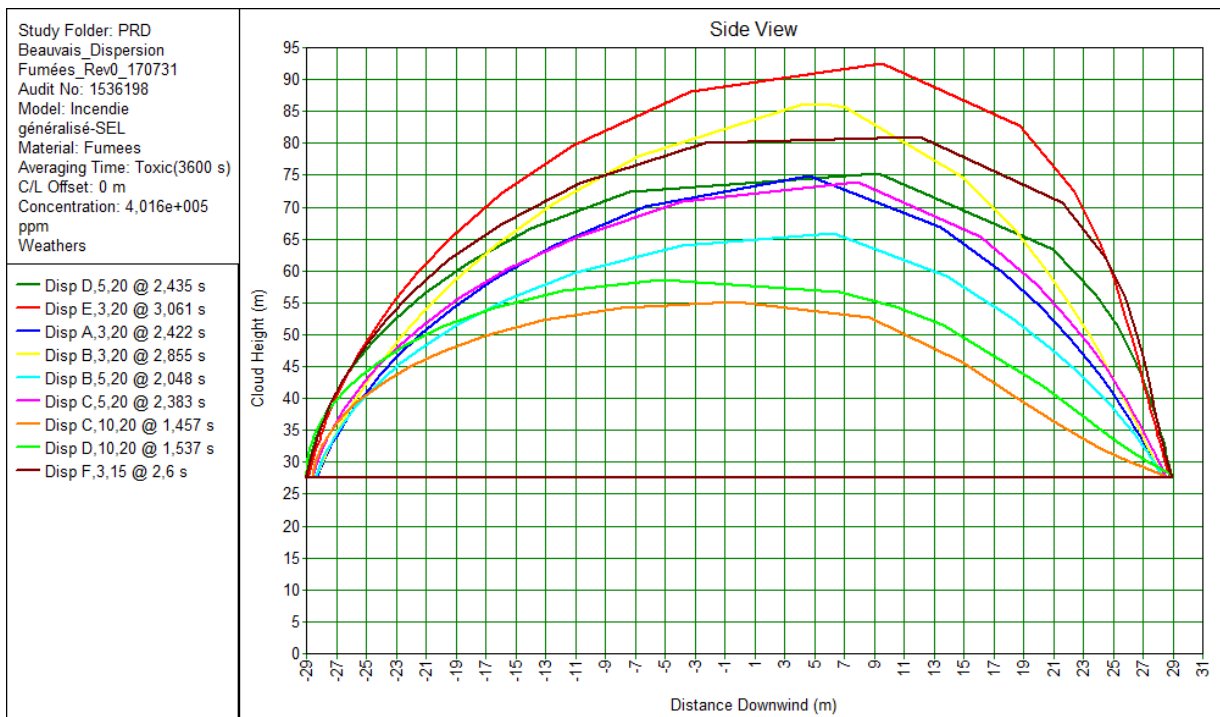


Coupe du panache en concentration correspondant au seuil des premiers effets létaux équivalents des fumées, dans l'ensemble des conditions météorologiques

3.2.2 PhD 2 – Incendie généralisé



Coupe du panache en concentration correspondant au seuil des effets irréversibles équivalents des fumées, dans l'ensemble des conditions météorologiques



Coupe du panache en concentration correspondant au seuil des premiers effets létaux équivalents des fumées, dans l'ensemble des conditions météorologiques

4 CONCLUSIONS

4.1 CONCLUSIONS EN TERMES DE TOXICITE DES FUMÉES

	SPEL (SELS par défaut)	SEI
Incendie débutant		
Cible à hauteur d'homme	Non atteint	Non atteint
Cible à 10 m de hauteur (hauteur d'une maison individuelle) / altitude du site	Non atteint	65 m (conditions D10)
Cible à 20 m de hauteur (hauteur d'un petit immeuble d'habitation collective) / altitude du site	20 m * (conditions D10)	90 m (conditions D10)
Cible à 30 m de hauteur (hauteur d'un immeuble d'habitation collective) / altitude du site	20 m * (conditions F3)	100 m (conditions D10)
Incendie généralisé		
Cible à hauteur d'homme	Non atteint	Non atteint
Cible à 10 m de hauteur (hauteur d'une maison individuelle) / altitude du site	Non atteint	Non atteint
Cible à 20 m de hauteur (hauteur d'un petit immeuble d'habitation collective) / altitude du site	Non atteint	Non atteint
Cible à 30 m de hauteur (hauteur d'un immeuble d'habitation collective) / altitude du site	30 m * (conditions C10, D10)	65 m (conditions C10, D10)

Distances comptées à partir des bords de la zone en feu, arrondies à la demi-dizaine supérieure.

* Distances maximales quelle que soit la hauteur.

Remarque : Dans les deux configurations – incendie débutant et incendie généralisé – les fumées sont émises à la hauteur des flammes. En dessous de cette hauteur, malgré un rabattement possible du panache lié au vent, il est peu probable d'avoir des effets toxiques. Sur les graphes PHAST présentés ci-avant, la forme du panache qui, sur les premiers mètres à dizaines de mètres, « redescend », résulte, au moins en partie, d'artefacts de calculs. D'une façon générale, les distances d'effets obtenues sont à considérer comme des ordres de grandeur car elles reposent sur un ensemble d'hypothèses jugées conservatives et ont été déterminées à l'aide de modèles semi-empiriques ou théoriques. Notamment, il n'est pas tenu compte de la dilution des fumées par la vapeur d'eau générées par l'eau d'extinction. Les distances obtenues apparaissent, au vue de l'accidentologie, pénalisantes.

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.

Dans le panache, en hauteur (jusqu'à 30 m correspondant à la hauteur maximale d'un immeuble d'habitation), les distances maximales atteintes pour les effets létaux et les effets irréversibles sont respectivement d'environ 30 m et 100 m de la cellule en feu.

4.2 CONCLUSIONS EN TERMES 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 qui correspond à l'incendie débutant.

Distance du foyer (m)	Visibilité minimale (m)
50 m	50 m
100 m	70 m
200 m	90 m
300 m	120 m

Les fumées n'auraient plus d'impact sur la visibilité au-delà d'environ 300 mètres du bâtiment de stockage. En deçà de ce périmètre, des mesures de précaution (interdiction de circuler ou de pénétrer dans un périmètre usuellement d'une centaine de mètres) pourront être prises par les services de secours et d'incendie.

Soulignons là encore que les distances déterminées sont à considérer comme des ordres de grandeur. Elles reposent sur des modèles semi-empiriques et des hypothèses de calcul.