



Modélisation des effets liés à la dispersion des fumées d'incendie

SOMMAIRE

1. DOCUMENTS DE REFERENCE	3
1.1. GUIDES TECHNIQUES ET REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	3
1.2. TEXTES REGLEMENTAIRES	3
2. DEMARCHE ET MODELES DE CALCUL DES EFFETS TOXIQUES DES FUMEEES D'UN INCENDIE.....	4
2.1. METHODOLOGIE GENERALE.....	4
2.2. CARACTERISATION DU TERME SOURCE	5
2.2.1. SURFACE DU FOYER.....	5
2.2.2. EVALUATION DE LA NATURE ET DU TAUX DE PRODUCTION EN GAZ OU VAPEURS TOXIQUES.....	5
2.2.3. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMOCINETIQUES : DEBIT, HAUTEUR ET TEMPERATURE DES FUMEEES EMISES	6
2.2.3.1. DEBIT DES FUMEEES	6
2.2.3.2. HAUTEUR D'EMISSION DES FUMEEES	6
2.2.3.3. TEMPERATURE ET VITESSE DES FUMEEES AU POINT D'EMISSION	6
2.2.4. DETERMINATION DE LA TOXICITE DES FUMEEES	7
2.3. MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES FUMEEES	9
2.3.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES	9
2.3.2. CONDITIONS OROGRAPHIQUES	10
2.3.3. « AVERAGING TIME » ET « CORE AVERAGING TIME » OU DUREE DE MOYENNAGE DU NUAGE	10
2.4. DETERMINATION DES DISTANCES D'EFFETS TOXIQUES	11
2.5. EVALUATION DE L'IMPACT DES FUMEEES SUR LA VISIBILITE	11
3. MODELISATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMEEES EN CAS D'INCENDIE D'UNE CELLULE DE STOCKAGE.....	12
3.1. PHENOMENES DANGEREUX MODELISES.....	12
3.2. DONNEES – HYPOTHESES DE CALCUL.....	13
3.3. GAZ TOXIQUES DE COMBUSTION PRODUITS	13
3.4. DEBIT DES FUMEEES	16
3.5. COMPOSITION DES FUMEEES	17
3.6. HAUTEUR, TEMPERATURE ET VITESSE D'EMISSION DES FUMEEES	17
3.7. TOXICITE DES FUMEEES	18
3.8. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE	18
3.8.1. INCENDIE DEBUTANT	18
3.8.2. INCENDIE GENERALISE	19
3.9. RESULTATS – CONCLUSIONS	20

1. DOCUMENTS DE REFERENCE

1.1. GUIDES TECHNIQUES ET REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Cette étude s'appuie sur les guides techniques et rapports d'expertises suivants :

- [R1] G. HESKESTAD – « Engineering Relations for Fire Plumes » – Factory Mutual Research Corporation – Fire safety Journal, 7, 1984, pp 25-32.
- [R2] Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets – INERIS – rapport Ω16.
- [R3] SFPE – Handbook of fire protection engineering – 3rd edition.
- [R4] 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.
- [R5] G. A. BRIGGS – « Plume Rise », U.S. Atomic Energy Commission, Office of information Services – 1969.
- [R6] 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.
- [R7] Flammability Handbook for Plastics – Carlos J. Hilado – 4th edition.
- [R8] Produits de dégradation des matières plastiques – INRS – 1999.
- [R9] 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).
- [R10] 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.
- [R11] Caractéristiques des émissions de polluants engendrées par l'incendie de cinq produits types – Rapport d'étude DRC-09-93632-01522A – INERIS – 23/01/2009.
- [R12] 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).
- [R13] C. STEINERT – *Smokes and heat production in tunnel fires* – Proceedings of the international Conference on Fires in tunnels – Borås – Suède – 10-11 octobre 1994.

1.2. TEXTES REGLEMENTAIRES

Les textes réglementaires en vigueur, considérés dans le cadre de la présente étude, sont :

- [R14] Arrêté du 29 septembre 2005 – dit arrêté « PCIG » – 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 soumises à autorisation.
- [R15] Circulaire du 10 mai 2010 « récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 ».

2. DEMARCHE ET MODELES DE CALCUL DES EFFETS TOXIQUES DES FUMÉES D'UN INCENDIE

2.1. 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 :

- la caractérisation du terme source :
 - surface du foyer de l'incendie (cf. § 2.2.1) ;
 - inventaire des produits impliqués dans l'incendie et 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 [R2]) (cf. § 2.2.2) ;
 - 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) [R1] (cf. § 2.2.3) ;

- détermination de la toxicité des fumées : à partir de la composition de fumées et des seuils de toxicité aiguë des gaz de combustion composant les fumées, sont déterminés des seuils de toxicité équivalents des fumées (cf. § 2.2.4) ;
- la modélisation de la dispersion atmosphérique des fumées, en tenant compte des conditions météorologiques et orographiques, et détermination des concentrations des fumées au sol et en hauteur (cf. § 2.3) ;
- la détermination des distances d'effets toxiques c'est-à-dire des distances atteintes par les fumées en concentrations correspondant aux seuils de toxicité équivalents des fumées (cf. § 2.4) ;
- l'évaluation de l'impact des fumées sur la visibilité (§ 2.5).

Les modèles employés sont développés dans les paragraphes qui suivent.

2.2. CARACTERISATION DU TERME SOURCE

2.2.1. 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.

2.2.2. EVALUATION DE LA NATURE ET DU TAUX DE PRODUCTION EN GAZ OU VAPEURS TOXIQUES

La nature des gaz ou vapeurs émis par combustion ou décomposition thermique est fonction des éléments simples (C, H, O, N, Cl, ...) présents dans les produits impliqués. 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 renseignent également sur la nature des produits de décomposition dangereux.

Pour déterminer la nature et les taux de production en gaz et vapeurs toxiques dégagés, les produits impliqués dans l'incendie sont, dans un premier temps, décomposés en éléments simples (C, H, O, N, Cl, ...).

Puis, dans un second temps, la proportion des différents gaz et vapeurs toxiques susceptibles d'être émis ainsi que les débits de production de ces gaz et vapeurs sont évalués, en fonction des conditions externes, notamment de la température et de la disponibilité de l'oxygène, sur la base d'hypothèses fondées sur des résultats d'essais ([R2], ([R3], [R4]) ou de données bibliographiques lorsque disponibles.

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.

2.2.3. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMOCINETIQUES : DEBIT, HAUTEUR ET TEMPERATURE DES FUMEEES EMISES

2.2.3.1. DEBIT DES FUMEEES

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%) :

$$Q_{\text{fum}} \text{ (kg/s)} = 3,24 \times P$$

avec P puissance en MW.

La puissance P est évaluée comme suit :

$$P \text{ (MW)} = m'' \times \text{surf} \times \text{PCI}$$

avec :

- m'' : taux massique surfacique de combustion (kg/m².s)
- surf : surface du foyer de l'incendie (m²)
- PCI : pouvoir calorifique inférieur (MJ/kg)

2.2.3.2. HAUTEUR D'EMISSION DES FUMEEES

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.

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

2.2.3.3. TEMPERATURE ET VITESSE DES FUMEEES AU POINT D'EMISSION

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.

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.

2.2.4. DETERMINATION DE LA TOXICITE DES FUMÉES

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 en situation accidentelle sont définis par l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 ([R14]) 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.

Pour de nombreuses substances, des seuils de toxicité aiguë ont été définis par l'INERIS. A défaut, et selon les recommandations en vigueur (cf. circulaire du 10 mai 2010 [R15]), il est possible d'utiliser les seuils américains tels que, par ordre de priorité, les seuils AEGs (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.

Pour les fumées constituées d'un mélange de gaz ou vapeur toxiques dilués dans l'air entraîné, on définit des seuils de toxicité équivalents :

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

avec :

p_i : proportion 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)

Cette démarche permet de rendre compte du mélange gazeux que sont les fumées, composées de gaz toxiques (CO, HCN, NO₂, ...) 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.

Les seuils de toxicité aiguë des principaux gaz de combustion toxiques couramment présents dans les fumées sont donnés dans le tableau suivant. Ils sont pris pour une durée d'exposition de 60 minutes conformément aux pratiques en vigueur (cf. circulaire du 10 mai 2010 [R15] / cas des phénomènes de longue durée) :

	Valeurs toxicologiques de références				
	Seuils de toxicité aiguë par inhalation (mg/m ³ / ppm)				
	CO ⁽¹⁾	CO ₂ ⁽²⁾	HCN ⁽³⁾	NO ₂ ⁽⁴⁾	HCl ⁽⁵⁾
SELS mg/m ³ ppm	ND	ND	69	138	565
	ND	ND	63	73	379
SPEL mg/m ³ ppm	3 680	ND	45	132	358
	3 200	ND	41	70	240
SEI mg/m ³ ppm	920	73 300	7,8	75	61
	800	40 000	7,1	40	40

(1) Fiche seuils de toxicité aiguë du monoxyde de carbone – INERIS DRC-09-103128-05616A.

(2) 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).

Par défaut le SPEL est pris égal au SEI (hypothèse dimensionnante).

(3) Fiche seuils de toxicité aiguë de l'acide cyanhydrique – INERIS–DRC-08-94398-12727A.

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 2010 [15], 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.

(4) Fiche seuils de toxicité aiguë du dioxyde d'azote – INERIS–DRC-08-94398-13333A.

(5) Fiche seuils de toxicité aiguë du chlorure d'hydrogène – INERIS– DRC-08-94398-11984A.

Parmi les principaux gaz de combustion toxiques couramment présents dans les fumées, trois s'avèrent particulièrement toxiques :

- le cyanure d'hydrogène (HCN) : son SEI est très faible d'autant plus que la valeur retenue, faute de valeur au niveau français, est l'AEGL-2 = 7,1 ppm ;

- le dioxyde d'azote (NO₂) : SEI = 40 ppm ;
- le chlorure d'hydrogène (HCl) : SEI = 40 ppm ;

Par conséquent, plus la teneur en N et Cl dans les produits impliqués dans l'incendie sera élevée et plus la concentration dans les fumées en HCN, NO₂, HCl (et, pour certains produits, Cl₂) sera importante donc plus les fumées seront toxiques (seuils de toxicité équivalente des fumées plus faibles).

2.3. MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES FUMÉES

La dispersion atmosphérique est modélisée au moyen du logiciel PHAST version 7.22.

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.

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).

2.3.1. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

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 [R15] 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	
		5 m/s	
C	Moyennement instable	5 m/s	
		10 m/s	
D	Neutre	5 m/s	
		10 m/s	
E	Moyennement stable	3 m/s	
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.

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 infranchissable 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 [R6]).

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 [R5] 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 [R6].

2.3.2. 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 (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.

2.3.3. « AVERAGING TIME » ET « CORE AVERAGING TIME » OU DUREE 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.

2.4. DETERMINATION DES DISTANCES D'EFFETS TOXIQUES

Les distances d'effets toxiques correspondent aux distances maximales au-delà desquelles la concentration en fumées est inférieure au seuil équivalent considéré.

Ces distances sont le résultat de la modélisation de la dispersion atmosphérique.

Elles sont déterminées pour une cible supposée verticale, placée à 1,8 m de hauteur = stature (valeur haute, majorante) d'un homme.

Les effets en hauteur, dans le panache, sont également indiqués à titre informatif. Une hauteur de 30 m maximum est considérée (valeur courante pour la hauteur maximale d'un bâtiment).

2.5. 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 [R13] :

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

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

3. MODELISATION DES EFFETS TOXIQUES DES FUMÉES EN CAS D'INCENDIE D'UNE CELLULE DE STOCKAGE

3.1. PHENOMENES DANGEREUX MODELISES

Le phénomène dangereux d'incendie modélisé est la dispersion de fumées en cas d'incendie d'une cellule de 6 700 m² dédiée au stockage de produits classés dans la rubrique 2662.

Ce scénario est conservatif en termes de dispersion de fumées car les matières plastiques génèrent plus de gaz de combustion toxiques que les combustibles divers tels que le bois-papier-carton. En effet, certaines matières plastiques courantes, telles que le PBC, le polyamide ou le polyuréthane, produisent du chlorure d'hydrogène (HCl ; cas du PVC) ou des oxydes d'azote et du cyanure d'hydrogène (NOx et HCN ; cas du polyamide et du polyuréthane notamment).

La composition du stockage considérée est la suivante (composition de palette cohérente avec la composition de la palette type 2662-2663 Flumilog et privilégiant les produits susceptibles de générer le plus de gaz toxiques (PVC, PA, PU)) :

- bois-papier-carton (palettes, emballages, produits) : 30%
- polyéthylène-polypropylène (PE / PP) : 50%
- polychlorure de vinyle (PVC) : 10%
- polyamide (PA) et polyuréthane (PU) : 10%

Extrait de la notice d'utilisation de FLUMILOG v2 du 04/08/2011 :

Pour les rubriques 2662 – 2663, par défaut, une masse de 25 kg de bois de palette est incluse. A ceci s'ajoute la masse du PE (avec un minimum de 50% du poids total de l'échantillon) complétée aléatoirement par d'autres produits possibles (combustibles ou non).

Par ailleurs, afin de tenir compte des conditions de ventilation du feu, deux scénarios de dispersion de fumées sont retenus et modélisés dans la présente étude :

- scénario 1 : incendie débutant, en phase d'extension/propagation, dans une cellule de produits classés sous la rubrique 2662 ;
- scénario 2 : incendie généralisé, plein régime, dans une cellule de produits classés sous la rubrique 2662.

3.2. DONNEES – HYPOTHESES DE CALCUL

Dimensions du foyer	Surface totale = 6 700 m ² Hauteur moyenne toiture : 13,5 m	
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
	670 m ²	6 700 m ²
Produits impliqués dans l'incendie	<ul style="list-style-type: none"> - polyéthylène-polypropylène (PE / PP) : 50% - bois-papier-carton : 30% - polychlorure de vinyle (PVC) : 10% - polyamide (PA) : 5% - polyuréthane (PU) : 5% 	
Hauteur de flammes	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
	13,5 m ⁽²⁾	26,25 m ⁽¹⁾
	(1) résultat FLUMILOG. (2) hauteur des exutoires.	
Logiciel de calcul	PHAST 7.22	

3.3. 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, CO₂, HCl, HCN, NO₂, ...).

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

	% C	% H	% O	% N	% Cl
Polyéthylène (PE), polypropylène (PP)	85,7%	14,3%	-	-	-
Bois – Carton	44,4%	6,2%	49,4%	-	-
Polychlorure de vinyle (PVC)	38,4%	4,8%	-	-	56,8%
Polyuréthane (PU)	40,9%	6,8%	36,4%	15,9%	-
Polyamide (PA)	63,7%	9,7%	14,2%	12,4%	-

Principaux gaz de combustion susceptibles de se dégager :

Voir tableau en page suivante.

Principaux gaz de combustion susceptibles de se dégager :

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	Données issues des FDS des produits et la littérature ([R7] à [R12])
Polyéthylène (PE), polypropylène (PP)	C, H	CO ₂ , CO	<p>En présence d'oxygène, avec ou sans flammes, les principaux produits de décomposition thermique du polyéthylène ([R7], [R8], [R9]) 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.</p>
Bois – Carton	C, H, O	CO ₂ , CO	<p>Le bois, le papier et le carton peuvent être 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).</p> <p>Pour le bois ([R10]), d'autres substances peuvent également être générées, en fonction des traitements (peintures, vernis) qui ont été appliqués. Notamment, les polluants que l'on peut détecter dans les fumées de combustion de bois traités sont des COV, des NOx (liés à la présence de colles dans les panneaux de particules de bois), de l'HCl, des HAP, des PCB, des dioxines-furanes, des métaux (en particulier plomb et 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.</p>

Matières impliquées dans l'incendie	Éléments constitutifs principaux	Principaux gaz de combustion toxiques susceptibles de se dégager d'après les FDS des produits et la littérature ([R7] à [R12])	
Polychlorure de vinyle (PVC)	C, H, Cl	CO ₂ , CO, HCl	<p>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) ([R7], [R8], [R11], [R12]).</p> <p>A noter : La bibliographie analysée ne fait pas référence à la production de PCB.</p>
Polyuréthane (PU)	C, H, O, N	CO ₂ , CO, HCN, NO ₂ ⁽⁶⁾	<p>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 ([R8]).</p>
Polyamide (PA)	C, H, O, N	CO ₂ , CO, HCN, NO ₂ ⁽⁶⁾	<p>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 (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 ([R7], ([R8]).</p>

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

⁽⁶⁾ 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.

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
CO, CO₂ (tous produits)	100% C => CO + CO ₂ $\frac{[CO_2]}{[CO]} = 5$ poids/poids ⁽⁷⁾ = 3,2 mol/mol	100% C => CO + CO ₂ $\frac{[CO_2]}{[CO]} = 10$ mol/mol ⁽⁸⁾ = 15,71 poids/poids
HCN, NO₂ (PU, PA)	100% N => 50% N ₂ + 50% (HCN + NO ₂) $\frac{[NO_2]}{[HCN]} = 0,3$ poids/poids ⁽⁹⁾ = 0,18 mol/mol	100% N => 50% N ₂ + 50% (HCN + NO ₂) $\frac{[NO_2]}{[HCN]} = 1$ mol/mol ⁽⁸⁾
HCl (PVC)	100% Cl => HCl	100% Cl => HCl

⁽⁷⁾ 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 [R3].

⁽⁸⁾ Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets – INERIS – rapport Ω16 [R2].

⁽⁹⁾ Handbook of fire protection engineering – Third Edition – SFPE [R4].

Les taux de production en gaz toxiques ainsi évalués sont :

	Incendie débutant	Incendie généralisé
CO (g/kg de produit brûlé)	359	138
CO₂ (g/kg de produit brûlé)	1 809	2 164
HCN (g/kg de produit brûlé)	12	7
NO₂ (g/kg de produit brûlé)	4	12
HCl (g/kg de produit brûlé)	58	58

3.4. DEBIT DES FUMÉES

	Incendie débutant	Incendie généralisé
Débit des fumées (kg/s)	160	9 976

Nota : Dans ce débit est comptabilisé l'air entraîné avec les fumées par les effets termo-convectifs.

Valeurs évaluées sur la base d'un PCI moyen de 30 MJ/kg pour la combustion complète (conditions bien ventilées ; valeur représentative des produits 2662) et d'un rendement de combustion de 95%.

3.5. 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
CO (% dans les fumées)	0,97%	0,15%
CO₂ (% dans les fumées)	4,90%	2,34%
HCN (% dans les fumées)	0,031%	0,007%
NO₂ (% dans les fumées)	0,010%	0,013%
HCl (% dans les fumées)	0,158%	0,063%

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

3.6. HAUTEUR, TEMPERATURE ET VITESSE D'EMISSION DES FUMÉES

	Incendie débutant	Incendie généralisé
Hauteur d'émission des fumées (m)	13,5 ⁽¹⁰⁾	26,25 ⁽¹¹⁾
Température des fumées (°C)	80 ⁽¹²⁾	265 ⁽¹³⁾
Vitesse d'émission des fumées (m/s)	7,5 ⁽¹³⁾	17 ⁽¹³⁾

⁽¹⁰⁾ Hauteur de la toiture (sortie des fumées par les exutoires ouverts).

⁽¹¹⁾ Hauteur des flammes déterminée par FLUMILOG dans le cadre de la modélisation des effets thermiques.

⁽¹²⁾ Température d'ouverture des exutoires.

⁽¹³⁾ Modèle Heskestad.

3.7. TOXICITE DES FUMÉES

Les seuils de toxicité équivalents des fumées évalués à partir de la composition des fumées et des seuils de toxicité aiguë de chacun des composants des fumées (cf. § 3.2.4) sont :

	Incendie débutant	Incendie généralisé
SELSeq mg/m ³ ppm	ND ND	ND ND
SELeq mg/m ³ ppm	64 902 54 085	196 641 163 867
SEleq mg/m ³ ppm	12 711 10 593	42 570 35 475

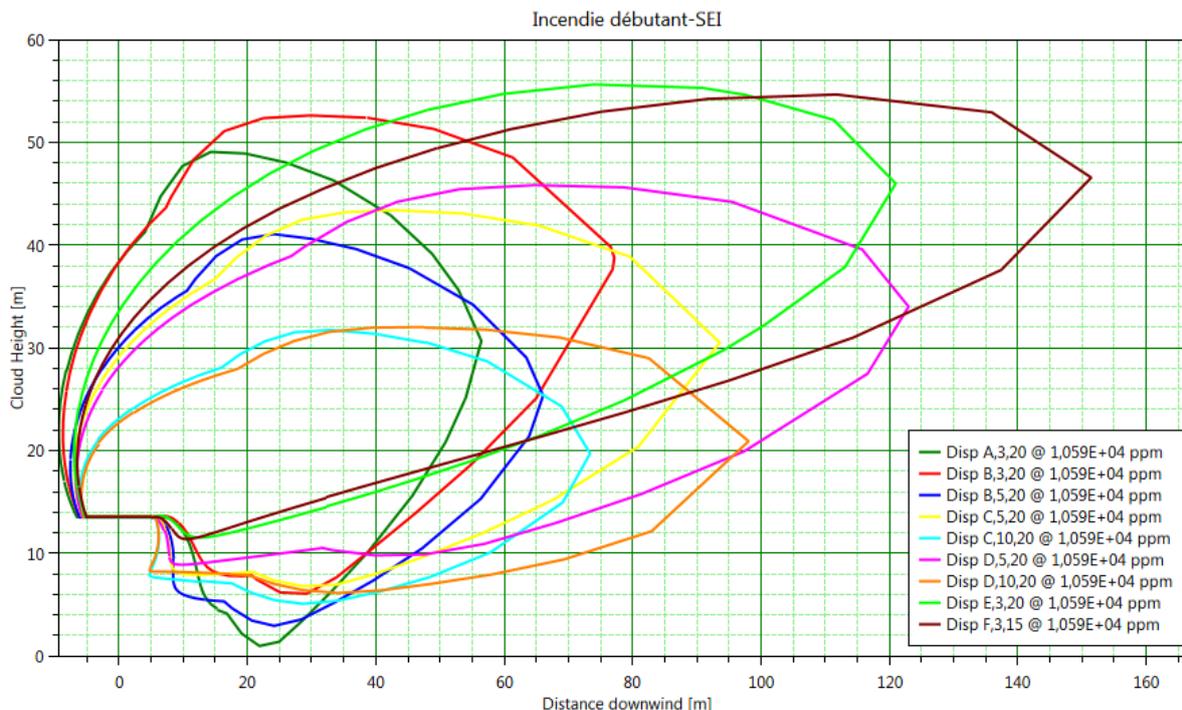
Nota : Le SELSeq n'est pas déterminé car pas de valeurs disponibles pour le CO et le CO₂. Par défaut, il sera pris égal dans cette étude au SPELeq.

3.8. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

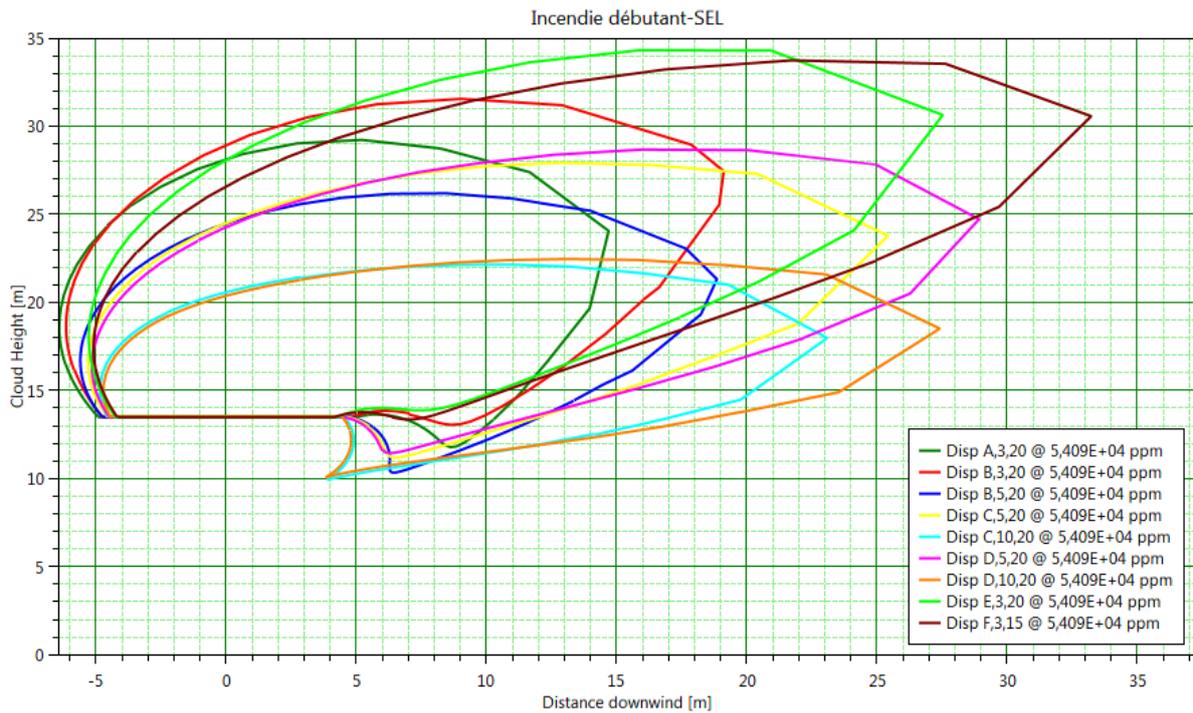
Voir graphes et distances d'effets en pages suivantes.

Nota : Les conditions météorologiques considérées sont celles recommandées par la circulaire du 10/05/2010 [R15] pour les rejets en hauteur.

3.8.1. INCENDIE DEBUTANT

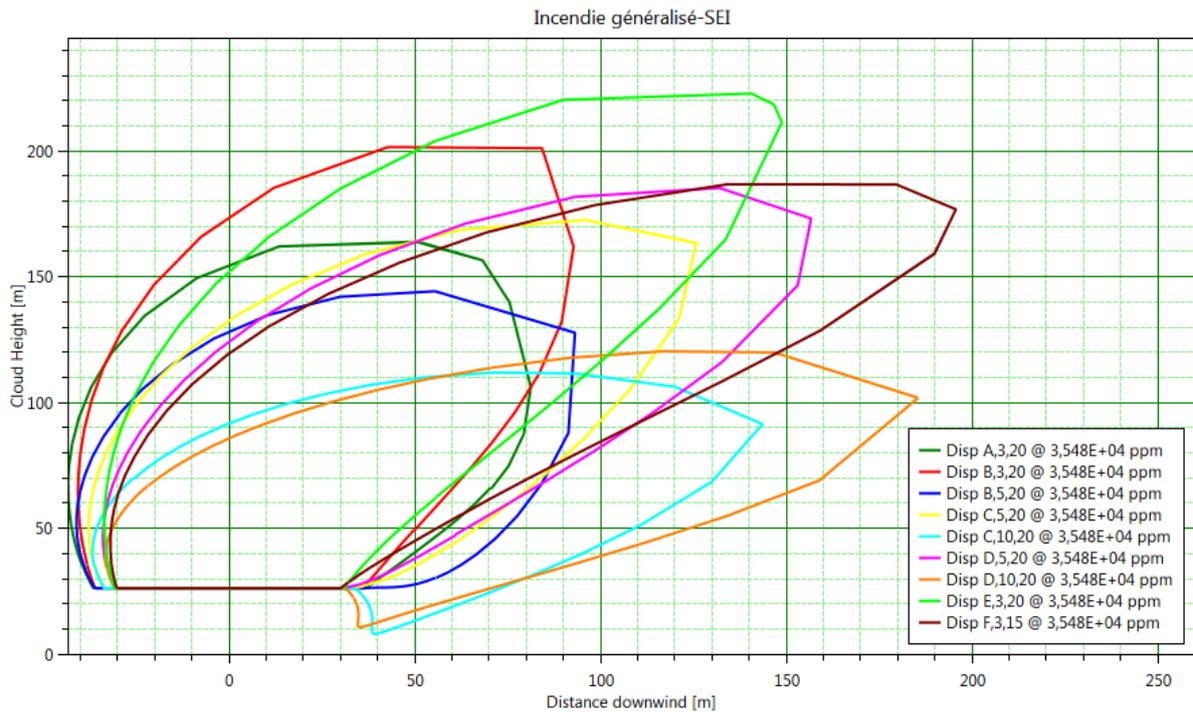


Coupe du panache en concentration correspondant au SEI équivalents des fumées

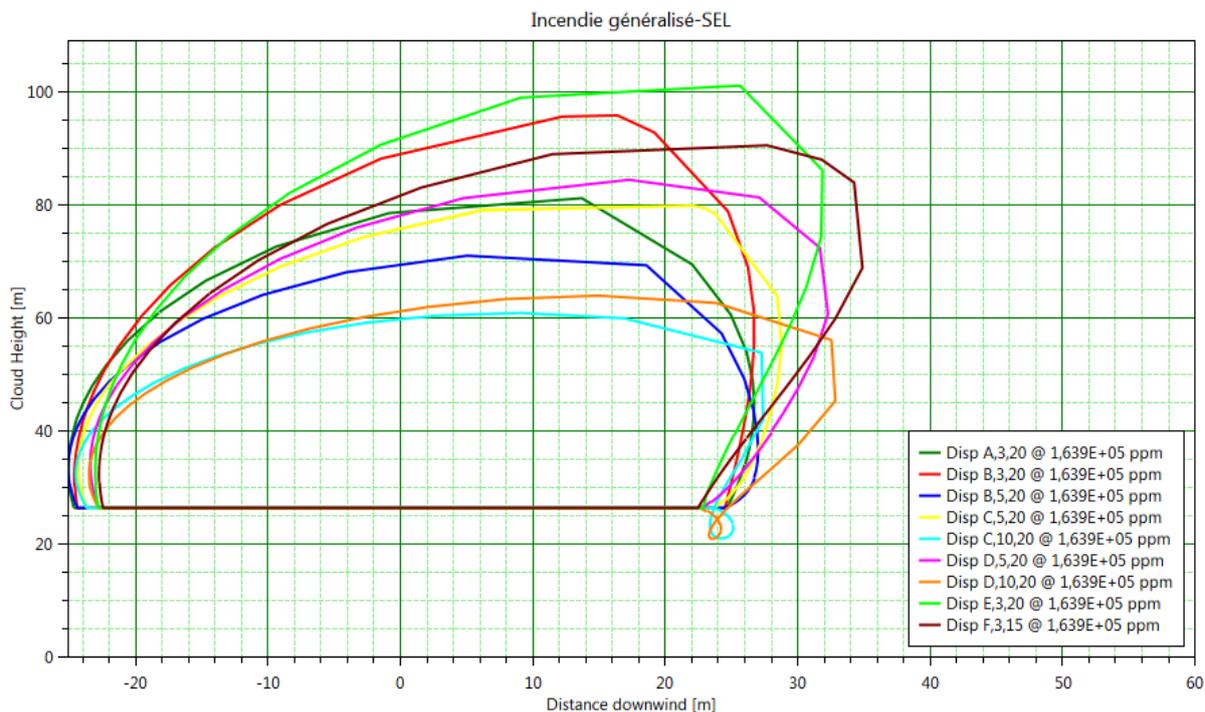


Coupe du panache en concentration correspondant au SPEL équivalent des fumées

3.8.2. INCENDIE GENERALISE



Coupe du panache en concentration correspondant au SEI équivalents des fumées



3.9. RESULTATS – CONCLUSIONS

Distances d'effets toxiques :

Remarque préalable : Sur les graphes PHAST présentés ci-avant, la partie du nuage de fumées qui semble redescendre en dessous de la hauteur d'émission n'est pas à prendre en compte car elle résulte d'artéfacts de calculs. Par exemple, dans le cas de l'incendie débutant (hauteur d'émission des fumées = 12,3 m), le graphe montre une retombée au niveau du sol, à une distance comprise entre 20 et 25 m. Cette retombée est jugée non représentative. Au plus, des effets à 10 m de hauteur peuvent être retenus.

	SPEL (SELS par défaut)	SEI
Incendie débutant Hauteur d'émission des fumées = 13,5 m (sortie exutoires)	Non atteint	Non atteint
Incendie généralisé Hauteur d'émission des fumées = 26,25 m (hauteur de flammes)	Non atteint	Non atteint

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.

Il n'y a pas, non plus de risque en hauteur (absence d'immeuble d'habitation dans l'environnement du site qui est dédié aux activités commerciales ou industrielles).

Impact des fumées sur la visibilité :

Les résultats sont donnés pour une cible à hauteur d'homme, placée à différentes distances du foyer et dans la configuration la plus pénalisante qui correspond à l'incendie débutant dans les conditions D10.

Distance du foyer (m)	Visibilité minimale (m)
100	< 60
200	110
250	145
300	170

Les fumées n'auraient plus d'impact significatif sur la visibilité au-delà d'environ 250 mètres de la cellule en feu (pour une cible à hauteur d'homme).

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.

Sont notamment concernés la RD202 à l'Est et l'aérodrome à l'Ouest.

Soulignons que les distances déterminées sont à considérer comme des ordres de grandeur car elles reposent sur un ensemble d'hypothèses et ont été déterminées à l'aide d'un modèle semi-empirique.