

ITM LAI



Etude de la dispersion des fumées en cas d'incendie dans un entrepôt logistique Site de Saint Hilaire Les Andrésis

Approuvé par	VACHON Marc	Expert Senior Maîtrise des Risques Industriels	2/09/2019	
Vérifié par	GRUET Chrystelle	Responsable Activité Maîtrise des Risques Industriels	2/09/2019	
Rédigé par	VACHON Marc	Expert Senior Maîtrise des Risques Industriels	2/09/2019	
	Nom et Prénom	Fonction	Date	Visa

SOMMAIRE

1.	OBJET DU DOCUMENT	4
2.	DOCUMENTATION DE REFERENCE	5
3.	DONNEES	6
4.	FEU DE STOCKAGE.....	8
4.1.	Caractérisation de la molécule équivalente du combustible	8
4.2.	Effets toxiques	8
4.2.1.	Réaction de combustion	8
4.2.2.	Seuils d'effets toxiques des fumées.....	8
4.2.3.	Terme source	9
4.2.4.	Conditions de dispersion	10
4.2.5.	Résultats	11
4.3.	Réduction de la visibilité	11
4.3.1.	Réaction de combustion incomplète	11
4.3.2.	Terme source	11
4.3.3.	Résultats	12
5.	ANNEXE : DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL MISE EN ŒUVRE	13
5.1.	Spécification du terme source.....	13
5.2.	Opacification locale de l'atmosphère	15

1. OBJET DU DOCUMENT

La société ITM LAI (groupe Intermarché) exploite une base logistique sur la commune de SAINT HILAIRE LES ANDRESIS (45).

L'établissement bénéficie d'un droit à fonctionner librement en raison de l'antériorité de son exploitation par rapport à l'intégration de l'activité de stockage au sein de la nomenclature des Installations Classées.

Actuellement l'établissement comprend 4 cellules. Il est prévu de rajouter 5 cellules dont les surfaces varient entre 1827 m² et 5948 m².

Dans ce cadre la société ITM LAI a sollicité Bertin Technologies en vue de l'évaluation du risque toxique et du risque de réduction de la visibilité lié à la dispersion de fumées en cas d'incendie impliquant l'une des nouvelles cellules de stockage.

Afin de se placer dans un cas majorant, la nouvelle cellule repérée 9 a été choisie pour les raisons suivantes :

- elle est susceptible d'abriter des produits générant des fumées toxiques en cas d'incendie (en particulier des polymères),
- parmi les cinq nouvelles cellules, sa surface est la plus importante (5 948 m²),
- elle est la plus proche d'un échangeur de l'autoroute A19, qui longe le terrain sur lequel se situe la base logistique.

Le présent document constitue le rapport établi par Bertin Technologies à l'issue des travaux.

2. DOCUMENTATION DE REFERENCE

DR01	Courriel QUALICONSULT du 14 mai 2019	-
DR02	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering	NFPA, 2 nd Edition (1995)
DR03	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	NOR : DEVP1013761C
DR04	INERIS - Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) : Toxicité et dispersion des fumées d'incendie, Phénoménologie et modélisation des effets (17/03/2005)	DRA35-Q16
DR05	Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation	DEVP0540371A

3. DONNEES

Le plan de masse de l'entrepôt (avec cellules existantes et extension en projet) est reporté figure 1 ci-dessous [DR01].

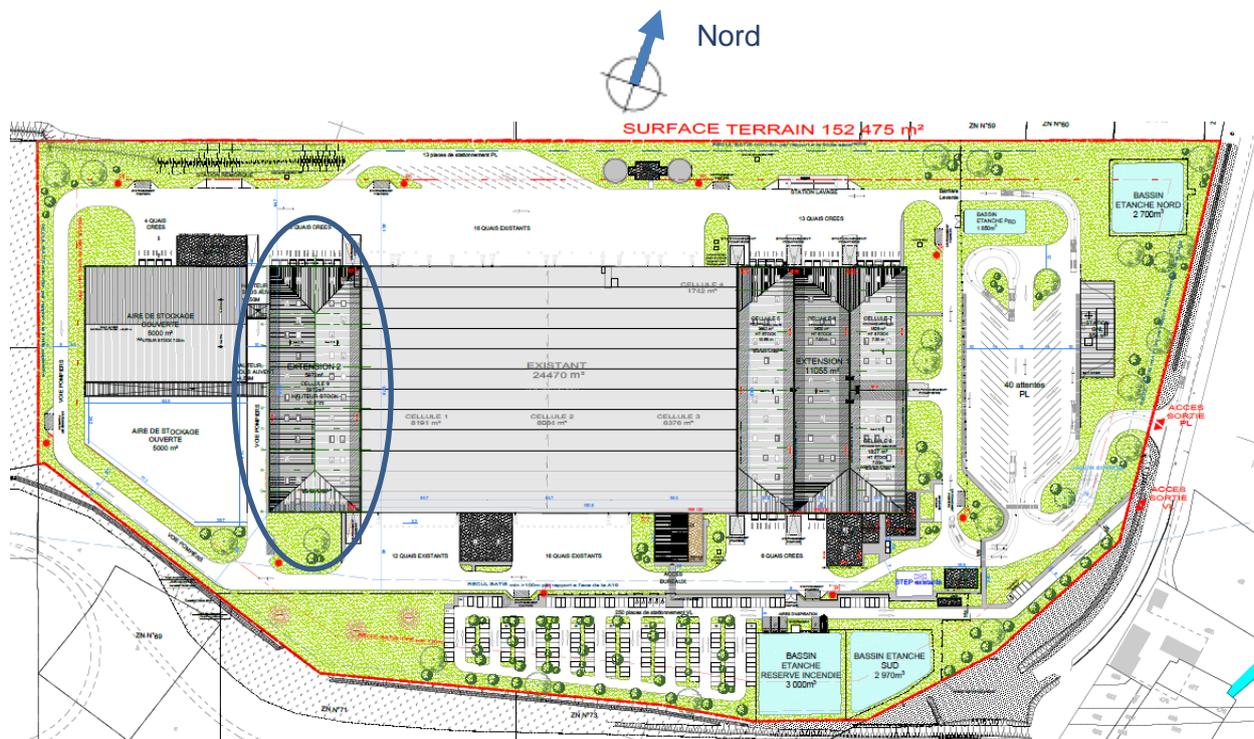


Figure 1 : Plan de masse de l'entrepôt

La cellule 9 (extension 2 entourée en bleu sur la figure ci-dessus), objet de l'étude, présente les dimensions intérieures suivantes :

- Longueur : 126,9 m
- Largeur : 46,9 m
- Hauteur au faîtage : 13 m
- Hauteur de stockage : 10 m

La paroi au niveau de la zone de quai implantée au nord-ouest du site est en bardage double peau et présente une résistance au feu de 30 minutes. Les autres parois sont des parois coupe-feu et présentent une résistance au feu de 2 heures ; elles dépassent de 1 m en toiture.

S'agissant d'une base logistique pour la grande distribution, les stocks varient dans le temps. Pour la réalisation des calculs il a été supposé la répartition massique suivante (pénalisante) :

- 40% bois / papier / carton assimilés à de la cellulose,
- 30% PVC,
- 30% mousse de polyuréthane.

Les cibles exposées à une éventuelle dispersion des fumées d'incendie sont les suivantes :

- L'échangeur d'autoroute A19 (au sud) situé à la distance minimale de 85 m de la cellule 9,
- Une habitation (au nord-ouest) située à la distance minimale de 165 m de la cellule 9.

En outre, la distance minimale entre la paroi extérieure Sud-Est de la cellule et la limite de propriété est de 50 m.

Compte tenu de la présence de parois coupe-feu sur 3 côtés de la cellule, les fumées sont supposées émises à hauteur des parois soit 13 m, avec effet cheminée.

4. FEU DE STOCKAGE

La méthode mise en œuvre pour reconstituer le terme source incendie est détaillée en annexe.

4.1. Caractérisation de la molécule équivalente du combustible

La formule brute de la molécule équivalente déduite de la composition indiquée au chapitre 3 est la suivante [DR02] :



La masse molaire M_p de cette molécule est de 0,0251 kg/mol.

4.2. Effets toxiques

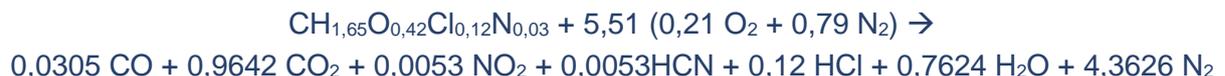
4.2.1. Réaction de combustion

La masse de CO émise par la combustion d'un kilogramme de la molécule équivalente est évaluée 0,034 kg/kg en fonction de l'émission par chacun des composés [DR02].

Il est en outre supposé, selon les recommandations d'utilisation du logiciel PHAST®, que 35% de l'azote se transforme en NO₂ et HCN. Cette valeur est proche des 40% indiqués par l'INERIS [DR04]. HCN et NO₂ sont supposés présents dans les produits en quantités volumiques (ou molaires) égales [DR04].

Tout le chlore de la molécule produit du chlorure d'hydrogène (HCl).

La réaction de combustion s'écrit par conséquent :



4.2.2. Seuils d'effets toxiques des fumées

Conformément à l'arrêté du 29 septembre 2005 [DR05] et à la fiche 1.1.11 de la circulaire du 10 mai 2010 [DR03], la durée d'exposition retenue est de 60 minutes.

Les seuils d'effet des principaux toxiques émis pour une durée d'exposition de 60 minutes sont récapitulés ci-après.

Les effets toxiques sont combinés suivant la loi d'additivité mentionnée par l'INERIS dans son ouvrage référencé OMEGA 16 [DR04]. Le seuil équivalent noté $\text{Seuil}_{\text{équivalent}}$ d'effet toxique est calculé selon la formule suivante :

$$\frac{1}{\text{Seuil}_{\text{équivalent}}} = \sum \frac{X_i}{\text{Seuil}_i}$$

avec :

X_i : fraction molaire du polluant identifié

Seuil_i : seuil d'effet du polluant i suivant le tableau 1 présenté ci-dessous.

Les seuils sont ramenés au mélange de gaz constituant les fumées.

Pour des fumées se dégageant en extérieur, la toxicité du monoxyde de carbone n'est pas prise en compte dans la mesure où les seuils de concentration associés à ce produit sont assez élevés au regard de ceux des autres composés.

Les seuils d'effets toxiques [DR05] sont les suivants pour le mélange de fumées.

Composé toxique	NO ₂	HCN	HCl	Fumées
Fraction molaire dans les fumées	8,47 10 ⁻⁴	8,47 10 ⁻⁴	1,92 10 ⁻²	/
Seuil des effets irréversibles sur une heure (ppm)	40	10 (ERPG2)	40	1 707
Seuil des premiers effets létaux sur une heure (ppm)	70	41	240	8 869
Seuil des effets létaux significatifs sur une heure (ppm)	73	63	379	13 209

Tableau 1 : Seuils d'effets toxiques

4.2.3. Terme source

Sur la base de données issues du SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR02], les caractéristiques de combustion évaluées pour le produit sont les suivantes :

- Taux de combustion moyen : 17 g/m²/s,
- Chaleur de combustion : 11,6 MJ/kg,
- Fraction d'énergie rayonnée : 0,42.

Le terme source finalement retenu pour le calcul de dispersion des fumées depuis le stockage est le suivant :

Terme source incendie	
Surface	5 948 m ²
Débit de combustion	101,1 kg/s
Composition des fumées	0,0305 CO + 0,9642 CO ₂ + 0,0053 NO ₂ + 0,0053HCN + 0,12 HCl + 0,7624 H ₂ O + 4,3626 N ₂
Débit total des fumées	740,3 kg/s
Vitesse de rejet	0,3 m/s
Température	600°C
Direction d'émission	Verticale
Hauteur d'émission des fumées	13 m

Tableau 2 : Terme source

Les distances d'effets toxiques sont évaluées à l'aide du logiciel PHAST® (version 6.7).

4.2.4. Conditions de dispersion

Les conditions atmosphériques retenues pour les modélisations sont définies par la circulaire du 10 mai 2010 [DR03].

Dans la grande majorité des cas, les conditions dites 3F (représentatives des conditions nocturnes) et 5D (représentatives des conditions diurnes), sont considérées. Les caractéristiques de ces conditions sont détaillées dans le tableau ci-dessous :

	Conditions 3F	Conditions 5D
Classe de stabilité	F (stable)	D (neutre)
Vitesse du vent	3 m/s	5 m/s
Température ambiante	15°C	20°C
Température du sol	15°C	20°C
Humidité relative de l'air	70%	70%

Tableau 3 : Détails des conditions atmosphériques 3F et 5D

Dans le cas d'un rejet vertical ou d'un rejet de gaz léger ou d'un rejet en altitude ayant pour conséquence une dispersion toxique, les conditions atmosphériques suivantes sont prises en compte, selon la circulaire du 10 mai 2010 :

Stabilité atmosphérique (Classes de Pasquill)	Vitesse de vent (m/s)
A	3
B	3 et 5
C	5 et 10
D	5 et 10
E	3
F	3

Tableau 4 : Détails des conditions atmosphériques à utiliser pour un rejet vertical ou un rejet de gaz léger ou un rejet en altitude

La température de l'atmosphère et du sol peut être fixée à 20°C pour les conditions de stabilité atmosphérique comprise entre A et E et à 15°C pour la condition de stabilité atmosphérique F. L'humidité relative est prise égale à 70%.

La hauteur des rugosités au sol est fixée à 500 mm, l'entrepôt étant entouré de bâtiments d'une quinzaine de mètres de haut (la hauteur des rugosités est fixée à 1/30^{ème} de la hauteur des obstacles).

4.2.5. Résultats

Aucun effet au sol n'est atteint comme le montre la figure ci-dessous (seuil des effets irréversibles dans les différentes conditions atmosphériques).

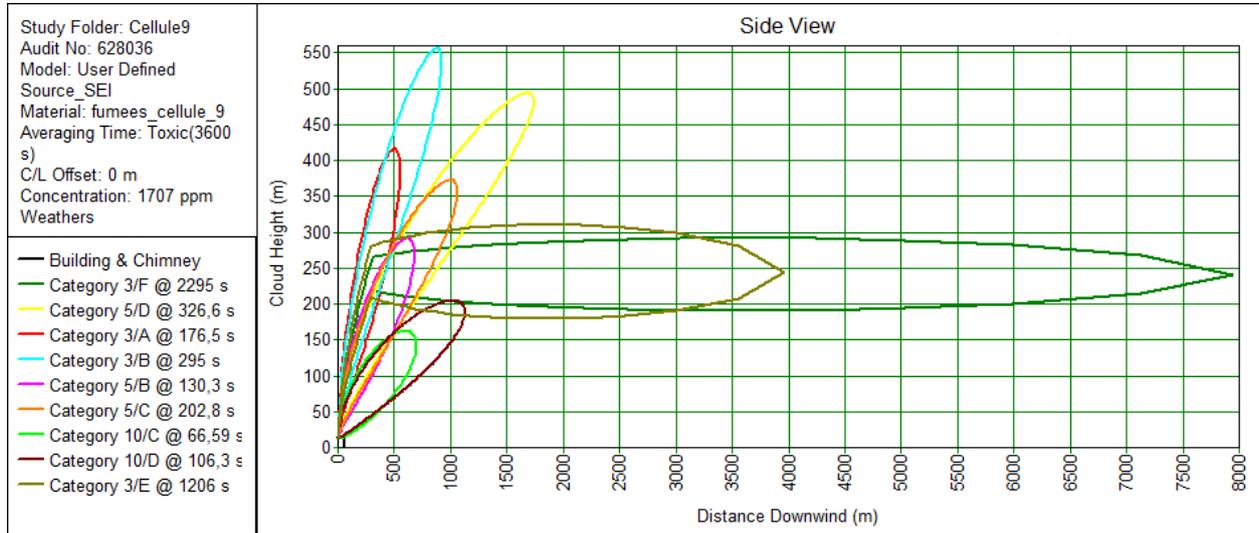


Figure 2 : Panache effets irréversibles

4.3. Réduction de la visibilité

4.3.1. Réaction de combustion incomplète

La masse de particules émises par la combustion d'un kilogramme de produit est évaluée à 111 g soit $y_s = 0,111$ (voir annexe).

La réaction de combustion tenant compte de cette donnée s'écrit :



La fraction massique y_p de particules (carbone) dans les fumées vaut $1,9 \cdot 10^{-2}$ kg/kg.

4.3.2. Terme source

Le terme source est reconstitué selon les mêmes hypothèses que celles de la dispersion toxique des fumées.

4.3.3. Résultats

Plus la distance de visibilité S est faible, plus l'atmosphère est obscurcie par les fumées.

Les concentrations en fumées sont maximales par grand vent (conditions 10C). Les distances de visibilité calculées au niveau des différentes cibles indiquées au chapitre 3 sont les suivantes :

Cible	Altitude de dispersion des fumées	Concentration en fumées	Distance de visibilité
Echangeur	13 m	14 ppm	> 1000 m
Habitation	13 m	54 ppm	320 m

Tableau 5 : Distances de visibilité au niveau des cibles

Bien que l'échangeur soit plus proche de la source que l'habitation, la concentration en fumées y est inférieure. Ceci est logique compte tenu de la hauteur de rejet des fumées : plus la distance à la source est importante, plus le panache a tendance à retomber au sol (à faible concentration).

La figure ci-dessous montre que la concentration maximale au sol en conditions 10C serait de l'ordre de 80 ppm à environ 400 m, soit une distance de visibilité minimale de 220 m.

Remarque : la traînée du bâtiment est prise en compte dans le sens de la longueur, ce qui est pénalisant vis-à-vis du rabattement du panache vers le sol.

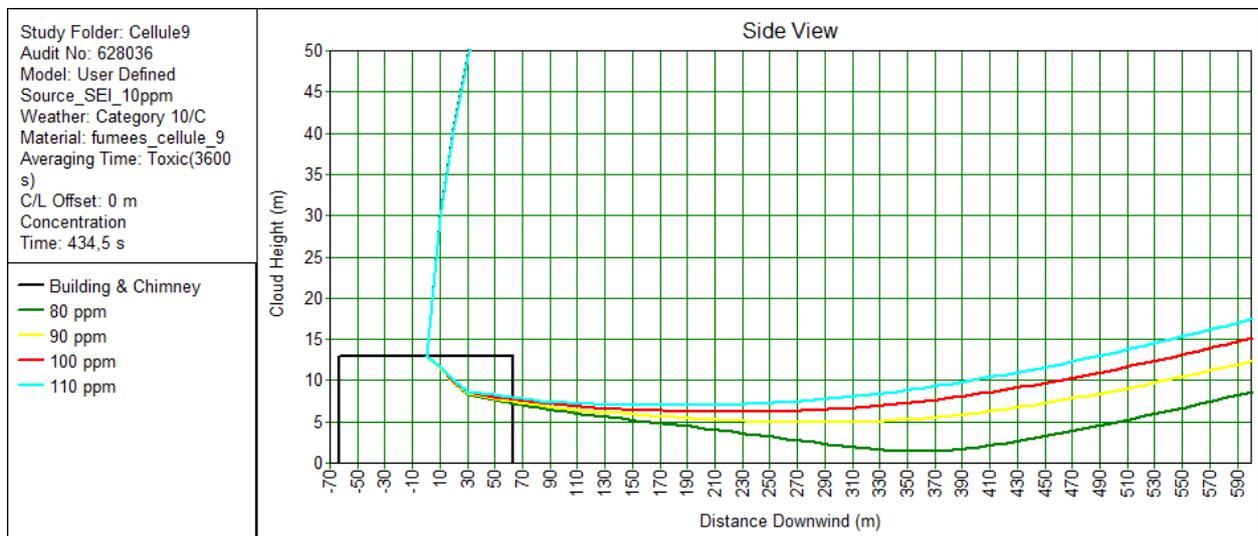


Figure 3 : Concentration des fumées au niveau du sol à distance de la cellule

L'atténuation de la visibilité à distance demeurera négligeable en cas d'incendie de la cellule 9.

5. ANNEXE : DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL MISE EN ŒUVRE

5.1. Spécification du terme source

Composition des fumées

Connaissant la formule chimique brute du produit, la réaction de combustion peut être caractérisée.

Les espèces présentes majoritairement dans les fumées sont le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et l'azote. Une combustion dans le cadre d'un incendie n'est cependant jamais complète : du monoxyde de carbone (CO) ainsi que des particules (assimilées au carbone pur C) peuvent être émis par une combustion incomplète.

La combustion est supposée instantanée à proximité de la source.

La concentration y_p en particules dans les fumées peut être calculée à partir de la réaction de combustion incomplète du produit. Le SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR02] indique pour différents produits combustibles :

- La masse de y_{CO} de monoxyde de carbone formée par kg de combustible brûlé,
- La masse y_s de « fumées » (particules) formée par kg de combustible brûlé.

Ces deux valeurs fournissent les équations manquantes pour équilibrer la réaction de combustion en complément des bilans atomiques, en supposant que les particules sont formées exclusivement de carbone solide C. y_{CO} et y_s étant exprimées en kg/kg, les coefficients molaires du carbone et du monoxyde de carbone n_C et n_{CO} de la réaction s'écrivent :

$$n_C = y_s M_p / 0,012$$
$$n_{CO} = y_{CO} M_p / 0,028$$

M_p désignant la masse molaire du combustible en kg/mol.

Les autres coefficients relatifs au dioxyde de carbone, à la vapeur d'eau, à l'azote etc... sont déduits par bilan atomique.

La fraction massique de particules y_p dans les fumées peut ainsi être déduite.

Débit de combustion

Pour un feu se développant en atmosphère libre, le débit de combustion est tel que :

$$\dot{m} = \dot{m}'' A$$

\dot{m}'' : débit de pyrolyse par unité de surface (kg/s/m²)

A : surface en feu (m²)

Chaleur convectée

La chaleur convectée (chaleur non dissipée par rayonnement et servant à chauffer les gaz et les mettre en vitesse) \dot{Q}_c (kW) est donnée par :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}'' \times A \times \chi_{conv} \times \Delta H_{ch}$$

avec

\dot{m}'' : débit de pyrolyse par unité de surface (kg/m²/s)

A : surface en feu (m²)

χ_{conv} : fraction convectée moyenne (-)

ΔH_{ch} : chaleur de combustion effective tenant compte de l'efficacité de combustion (kJ)

Les chaleurs de combustion effectives et les fractions d'énergie convectée sont par exemple disponibles dans le SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR02].

Vitesse ascensionnelle

La vitesse ascensionnelle moyenne \bar{V} du panache est donnée par la relation suivante tirée du SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR02]

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \times 1,97 \times \dot{Q}_c^{0,2}$$

où Q_c est exprimée en kW.

La relation d'origine donne la vitesse maximale sur l'axe du panache. Le facteur $\frac{1}{2}$ est introduit pour obtenir une vitesse moyenne compte tenu de la forme des profils de vitesse (profils gaussiens assimilés à des profils triangulaires).

Dans le cas étudié (émission à hauteur de parois), la vitesse d'émission correspond à la vitesse débitante sur la section de la cellule, avec prise en compte de l'effet cheminée.

Température des fumées

La température de fumées est de l'ordre de 600°C.

Terme source

La totalité du débit de fumées (gaz de pyrolyse et air stœchiométrique consommé au cours de la combustion) est supposé émis à 600°C, à la vitesse ascensionnelle calculée selon l'hypothèse ci-dessus.

5.2. Opacification locale de l'atmosphère

En cas d'incendie de grande ampleur, il existe des risques d'accident liés à une réduction de la visibilité à proximité comme illustré ci-dessous.



Feu avec guidage des fumées par les parois



Opacification par des fumées émises depuis le sol

Calcul de la concentration en fumées à distance du foyer

Sur la base de la réaction de combustion préalablement établie, la concentration volumique χ (m^3/m^3) des fumées (mélange de gaz de combustion) aux points considérés est calculée à l'aide du logiciel PHAST®.

Calcul de la concentration en particules à distance du foyer

La concentration C en particules (en kg/m^3) aux points considérés est obtenue par application de la relation :

$$C = \rho_{\text{air}} \chi Y_p$$

ρ_{air} désignant la masse volumique de l'air à température ambiante ($1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$). L'hypothèse de fumées à température proche de l'ambiante suppose une importante dilution par l'air, ce qui est en général effectivement vérifié à plusieurs dizaines de mètres du foyer.

Calcul du coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation des fumées K (en m⁻¹) est donné par (SFPE Handbook [DR02]) :

$$K = 7600 C$$

Distance de visibilité

Pour des objets réfléchissant la lumière, la distance de visibilité (en m) vaut :

$$S = 3/K$$

Plus la distance de visibilité est importante, moins l'atmosphère est obscurcie par les fumées.

Panache Saint Hilaire Les Andresis

En cas d'incendie sur la cellule 9 de la base logistique ITM LAI de Saint Hilaire Les Andr sis, les effets toxiques irréversibles associés aux fumées seraient atteints pour une concentration de 1707 ppm. Ce niveau de concentration correspond également à une distance de visibilité très faible (une dizaine de mètres). En effet, la distance de visibilité S est telle que :

$$S = 3,95 \cdot 10^{-4} / (\rho \chi y_p)$$

Avec :

χ : concentration volumique des fumées (1707 ppm soit $0,001707 \text{ m}^3/\text{m}^3$)

ρ : masse volumique de l'air ambiant ($1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$)

y_p : fraction massique de particules dans les fumées ($0,019 \text{ kg}/\text{kg}$ dans le cas envisagé)

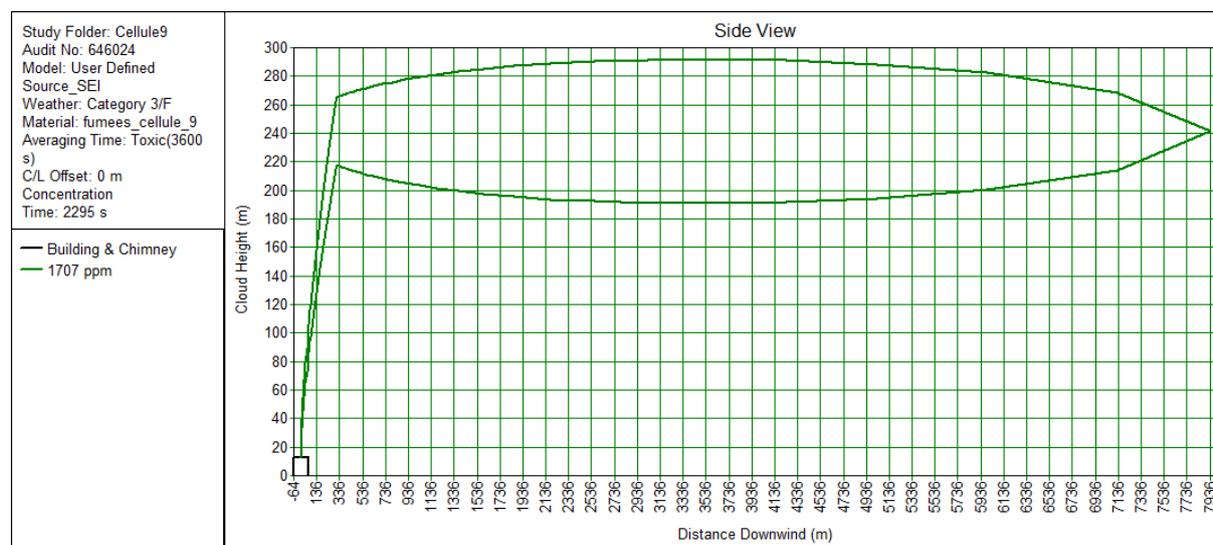
soit numériquement $S = 10 \text{ m}$.

Les contours du panache à la concentration représentative des effets toxiques irréversibles correspondent par conséquent à l'émission de fumées chargées en suies.

L'empreinte du panache à cette concentration fournit par conséquent un ordre de grandeur de la zone concernée par les éventuelles retombées de particules.

Dans les conditions envisagées, la distance de dispersion sous le vent est maximale dans les conditions 3F (en accord avec la circulaire du 10/05/2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers).

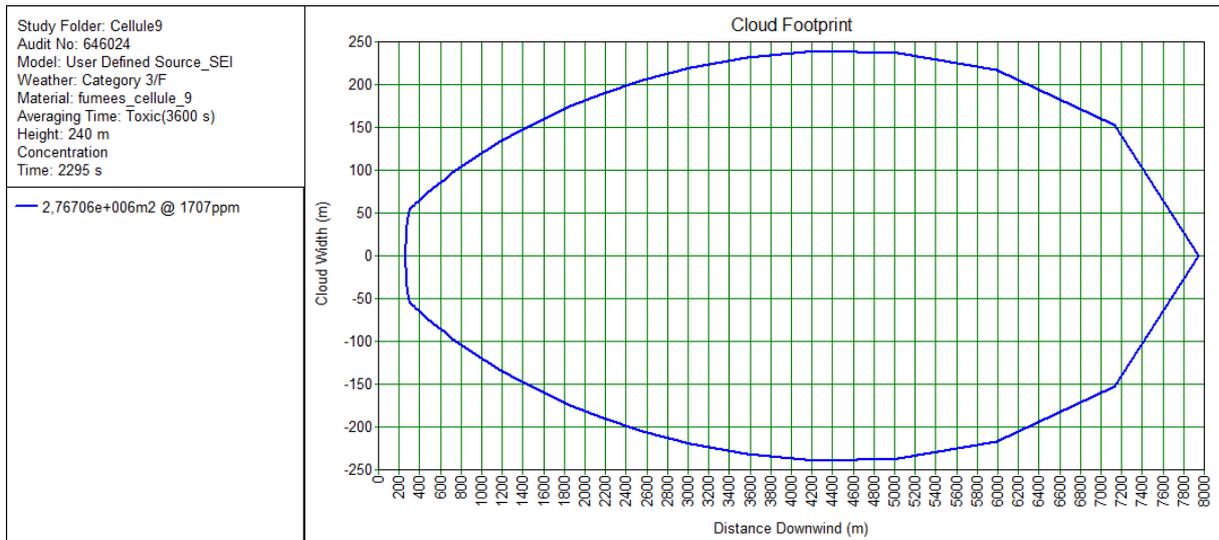
Le graphe ci-après illustre le développement du panache.



Vue de côté du panache

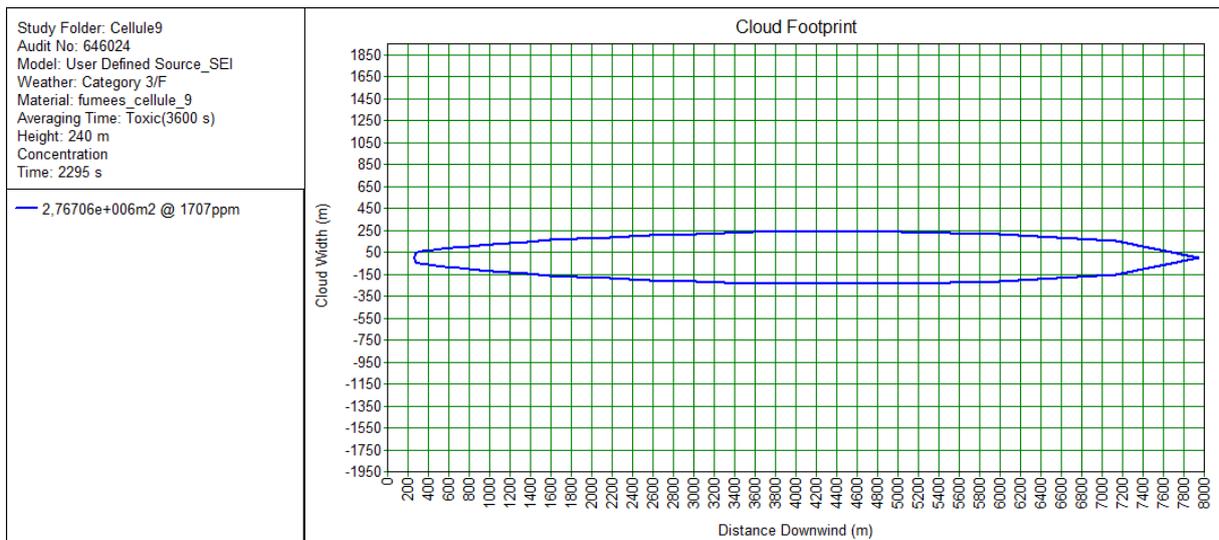
Le panache culmine à une altitude de 240 m.

L'empreinte du panache à 240 m d'altitude est reproduite ci-dessous.



Vue en plan du panache à l'altitude de 240 m

La largeur maximale du panache est d'environ 500 m à 4 500 m en aval de la cellule en feu sous le vent. Dans un **repère orthonormé** l'empreinte du panache serait la suivante :



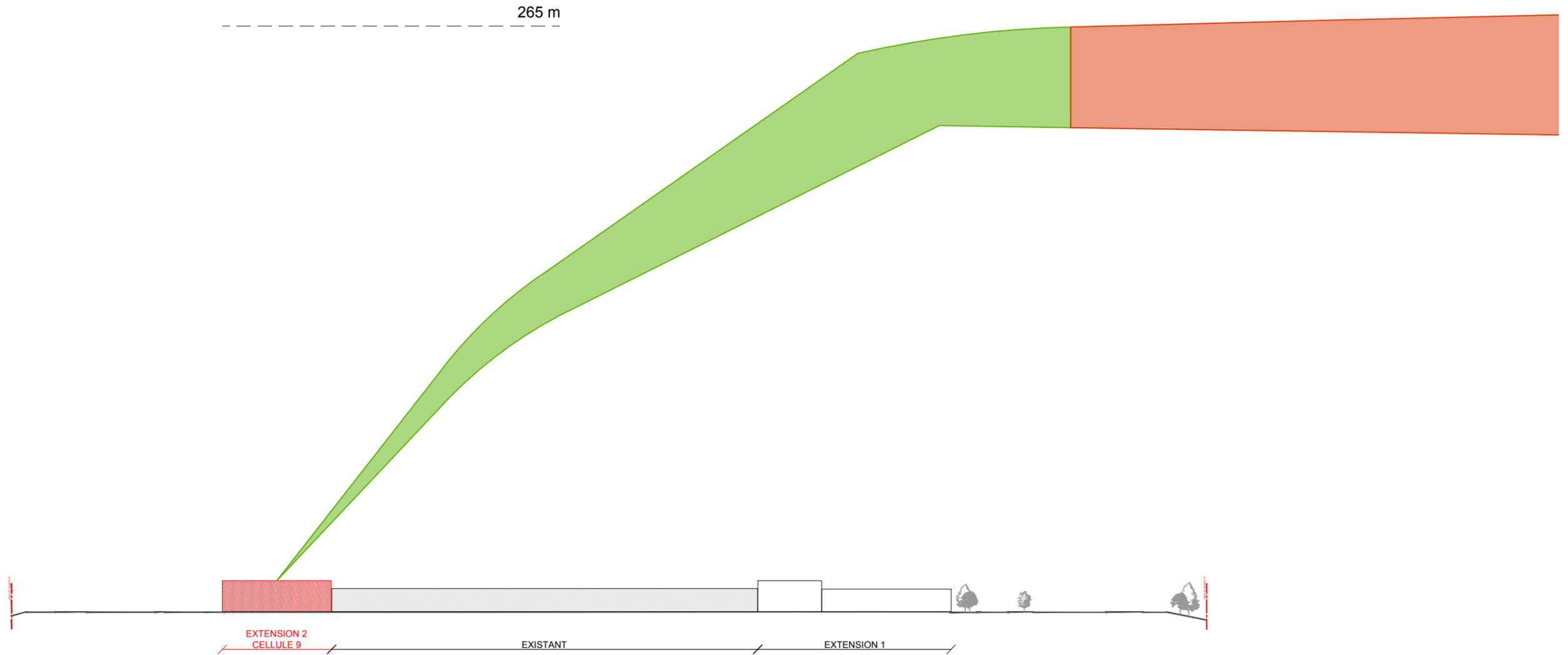
Les figures ci-après permettent de matérialiser le panache dans les conditions les plus défavorables.



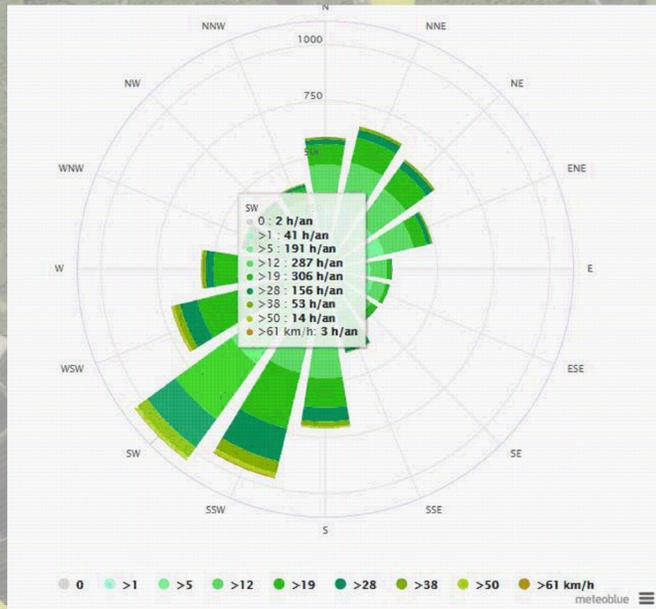
DISTANCE
336 - 1 536 m
HAUTEUR
200 - 280 m



DISTANCE
0 - 336 m
HAUTEUR
0 - 265 m



COUPE DE PRINCIPE PANACHE DE FUMÉES	JAN 2020	967	
		1/2000	



Rose des vents

