

AIRELLES ENVIRONNEMENT



Etude de la dispersion des fumées en cas d'incendie dans un entrepôt logistique en projet

Approuvé par	VACHON Marc	Expert Senior Maîtrise des Risques Industriels		
Vérifié par	SERAL Yann	Ingénieur Maîtrise des Risques Industriels		
Rédigé par	VACHON Marc	Expert Senior Maîtrise des Risques Industriels		
	Nom et Prénom	Fonction	Date	Visa

Historique des évolutions

Indice	Date	Modifications (raisons principales, paragraphes et pages concernés)	Rédacteur / Vérificateur
A	07/2020	Première version	M. VACHON / Y. SERAL

SOMMAIRE

1.	OBJET DU DOCUMENT	4
2.	DOCUMENTATION DE REFERENCE	5
3.	DONNEES	6
4.	CONDITIONS DE DISPERSION	8
5.	CELLULE DE STOCKAGE TOUT-VENANT.....	9
5.1.	Caractérisation de la molécule équivalente.....	9
5.2.	Réaction de combustion	9
5.3.	Seuils d'effets toxiques des fumées.....	10
5.4.	Terme source	11
5.5.	Résultats	12
5.5.1.	Dispersion toxique.....	12
5.5.2.	Réduction de la visibilité	13
6.	ANNEXE : DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL MISE EN ŒUVRE	14
6.1.	Spécification du terme source.....	14
6.2.	Opacification locale de l'atmosphère	15

1. OBJET DU DOCUMENT

AIRELLES ENVIRONNEMENT établit un Dossier de Demande d'Autorisation Environnementale (DDAE) pour un entrepôt en projet sur la commune d'Ablaincourt-Pressoir (80). Cet entrepôt comporte 16 cellules de 6 000 m² dont :

- 2 cellules de stockages de liquides inflammables,
- 2 cellules de stockage de produits classés dangereux pour l'environnement (4510/4511),
- 12 cellules de stockage « tout-venant ».

Dans ce cadre, AIRELLES ENVIRONNEMENT a sollicité Bertin Technologies afin d'évaluer les effets toxiques associés à la dispersion des fumées, en cas d'incendie sur une cellule.

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

2. DOCUMENTATION DE REFERENCE

DR01	Courriel AIRELLES ENVIRONNEMENT du 26 juin 2020	-
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 est reporté figure 1 ci-dessous [DR01].

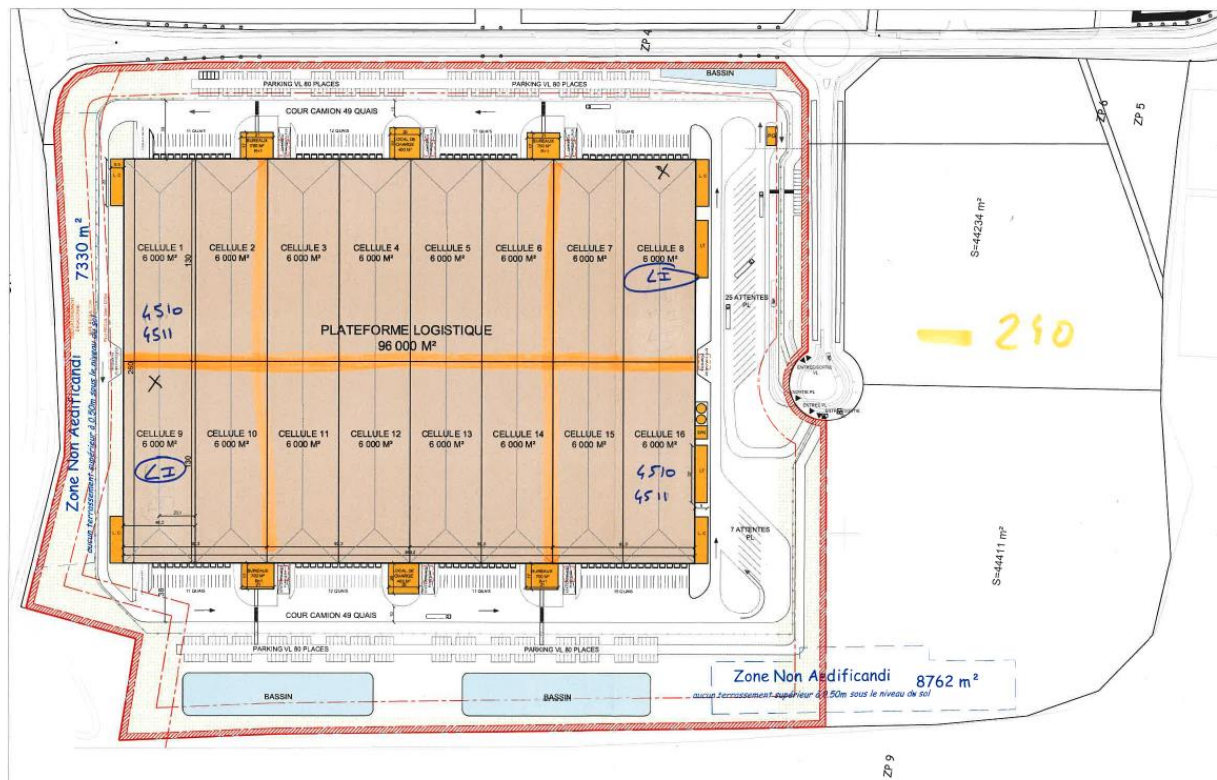


Figure 1 : Plan de masse de l'entrepôt

Les cellules présentent les caractéristiques suivantes :

Longueur	130 m
Largeur	48,2 m
Hauteur moyenne	13,8 m
Surface de stockage	6 000 m ²

Tableau 1 : Caractéristiques des cellules

Du point de vue de la toxicité des fumées, le retour d'expérience montre que ce sont les polymères dans les stockages « tout-venant » qui induisent les conséquences les plus importantes :

- Leurs débits de combustion sont faibles par comparaison avec ceux des liquides inflammables, ce qui réduit la quantité de mouvement initiale des panaches de fumées,
- Ils peuvent contenir du chlore et ou de l'azote qui génèrent des produits toxiques.

Pour la réalisation des calculs il a été supposé la répartition massique suivante (pénalisante) :

- 20% bois / papier / carton assimilés à de la cellulose,
- 35% PVC,
- 35% mousse de polyuréthane,
- 10% PET.

Les parois surlignées en orange sur la figure 1 sont coupe-feu 4 h.

Les autres murs séparatifs sont CF 2 heures. Par ailleurs les pignons est et ouest sont REI 120.

Par conséquent, les fumées sont supposées émises à hauteur des parois, avec effet cheminée (guidage des fumées par les parois).

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 2 : 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
A	3
B	3 et 5
C	5 et 10
D	5 et 10
E	3
F	3

Tableau 3 : Détails des conditions atmosphériques à utiliser pour un rejet vertical ou un rejet de gaz léger ou un rejet en altitude

Dans les cas envisagés (rejet vertical de gaz légers), les neuf conditions de dispersion sont retenues.

La température de l'atmosphère et du sol peut être fixée à 20°C pour les conditions de stabilité atmosphérique comprises 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 950 mm, valeur pénalisante du point de vue de la dispersion au voisinage de l'entrepôt (une importante hauteur de rugosité contribue à augmenter la hauteur de la couche limite atmosphérique, réduire la vitesse à proximité du sol et par conséquent diminuer l'influence des effets de dilution).

5. CELLULE DE STOCKAGE TOUT-VENANT

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

5.1. Caractérisation de la molécule équivalente

Sur la base de la répartition massique indiquée au chapitre 3, la formule brute déterminée pour la molécule équivalente est la suivante :



Les débits de combustion des différents composés sont évalués à partir des données figurant dans la référence [DR02] :

Composé	Débit de combustion (g/m ² /s)
Bois / Papiers / Carton	14
Polychlorure de vinyle (PVC)	6
Polyuréthane (PU)	29
Polyéthylène téréphtalate (PET)	20

Tableau 4 : Débits de combustion des différents constituants

Le débit de combustion moyen, compte tenu de la répartition massique, est évalué à 17 g/m²/s. Pour ce qui concerne la chaleur de combustion, l'application des formules de Boie et de Dulong [DR04] à la molécule moyenne conduit à retenir une valeur de 17,5 MJ/kg.

Enfin, compte tenu des propriétés de chaque produit, les taux d'émission de monoxyde de carbone et de particules sont les suivants :

- Emission de 34 g de CO par kg de combustible brûlé,
- Emission de 131 g de particules (assimilées au carbone) par kg de combustible brûlé.

Le taux d'émission de particules est élevé de par la présence de PVC et de PU qui constituent les composés majoritaires.

5.2. Réaction de combustion

La réaction de combustion incomplète de la molécule équivalente dans l'air prend la forme :



Il est fait l'hypothèse que 35% de l'azote présent dans le combustible est transformé en NO₂.

La chaleur de combustion effective est de 12,7 MJ/kg, compte tenu de la quantité d'air requise à la stœchiométrie pour la réaction de combustion ci-dessus (420 kJ par mole d'oxygène consommée [DR02]). Cela conduit à une efficacité de combustion (ratio entre la chaleur de combustion effective et la chaleur de combustion complète évaluée à 17,5 MJ/kg) de 0,73, ordre de grandeur usuel pour la plupart des combustibles solides.

La fraction d'énergie convectée (énergie utilisée pour chauffer les gaz et les mettre en vitesse, voir méthode de calcul en annexe du présent document) est évaluée à 0,53 sur la base des caractéristiques des produits constituant le mélange. La fraction d'énergie rayonnée vers l'extérieur (complément de la fraction d'énergie convectée) vaut 0,47. Cette valeur est plutôt

élevée, l'intervalle de valeurs usuellement adoptées allant de 0,35 à 0,4 [DR02, DR04] ; ceci est dû à la présence de PVC et de PU qui produisent des fumées assez rayonnantes.

La fraction massique de particules dans les fumées est de $2,5 \cdot 10^{-2}$

5.3. 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 $Seuil_{\text{équivalent}}$ d'effet toxique est calculé selon la formule suivante :

$$\frac{1}{Seuil_{\text{équivalent}}} = \sum \frac{X_i}{Seuil_i}$$

avec :

X_i : fraction molaire du polluant identifié

$Seuil_i$: seuil d'effet du polluant i suivant le tableau 2 présenté ci-dessous.

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

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

Composé toxique	NO ₂	CO	HCl	Fumées
Fraction molaire dans les fumées	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	/
Seuil des effets irréversibles sur une heure (ppm)	40	800	40	981
Seuil des premiers effets létaux sur une heure (ppm)	70	3 200	240	4 063
Seuil des effets létaux significatifs sur une heure (ppm)	73	3 200	379	5 225

Tableau 5 : Seuils d'effets toxiques cellule tout-venant

5.4. Terme source

Le terme source est reconstitué pour une surface de stockage de 6 000 m² supposant que l'incendie déstructure entièrement la répartition en racks dans les cellules et que le combustible occupe alors toute la surface disponible, hormis la zone de préparation. Avec un taux de combustion de 17 g/m²/s, le débit total de combustion vaut 102 kg/s.

La quantité d'air nécessaire à la combustion est de 4,13 kg d'air par kg de combustible.

Le débit total de fumées vaut 523 kg/s.

La hauteur de rejet est fixée à 13,1 m.

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

Terme source incendie cellule	
Composition des fumées	0,142 CO + 1,277 C + 3,051 CO ₂ + 0,65 HCl + 2,325 H ₂ O + 0,147 NO ₂ + 13,40 N ₂
Débit	523 kg/s
Section débitante	Section de la cellule
Température	600°C
Hauteur d'émission	13,8 m
Direction d'émission	Verticale

Tableau 6 : Terme source incendie cellule

5.5. Résultats

Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel PHAST® version 6.7.

5.5.1. Dispersion toxique

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

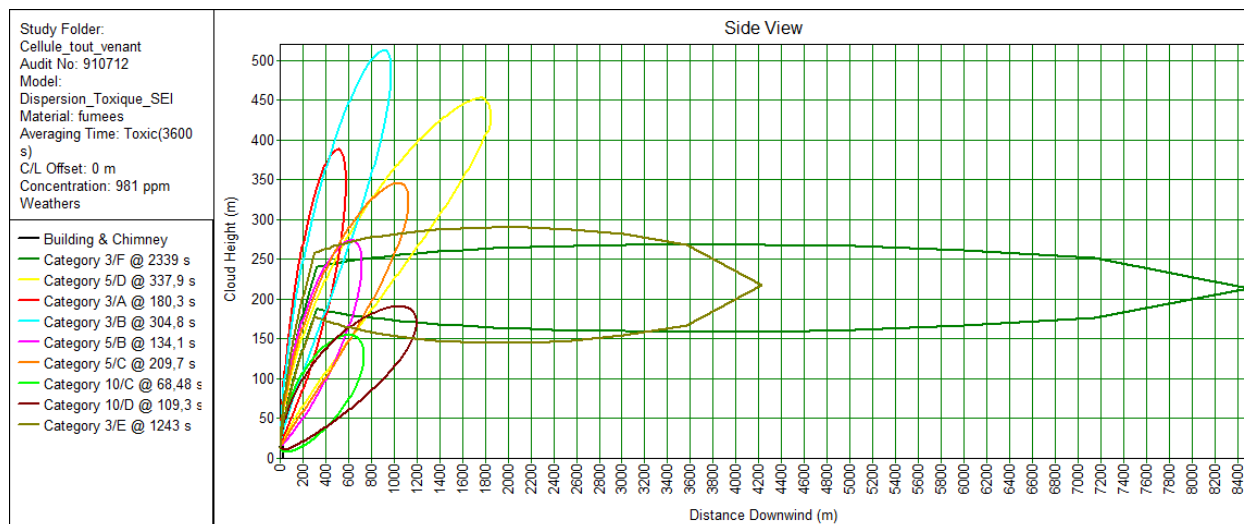


Figure 2 : Panache effets irréversibles

L'altitude minimale à laquelle les effets irréversibles sont atteints est de 8 m en conditions 10C (vent fort) à une quarantaine de mètres des bords de la cellule.

5.5.2. Réduction de la visibilité

La concentration en fumées amenant à une réduction de la visibilité de 10 m (panache de fumées noires) est de 1 316 ppm, compte tenu de la fraction massique de particules dans les fumées.

La figure ci-dessous présente l'allure du panache à ce niveau de concentration

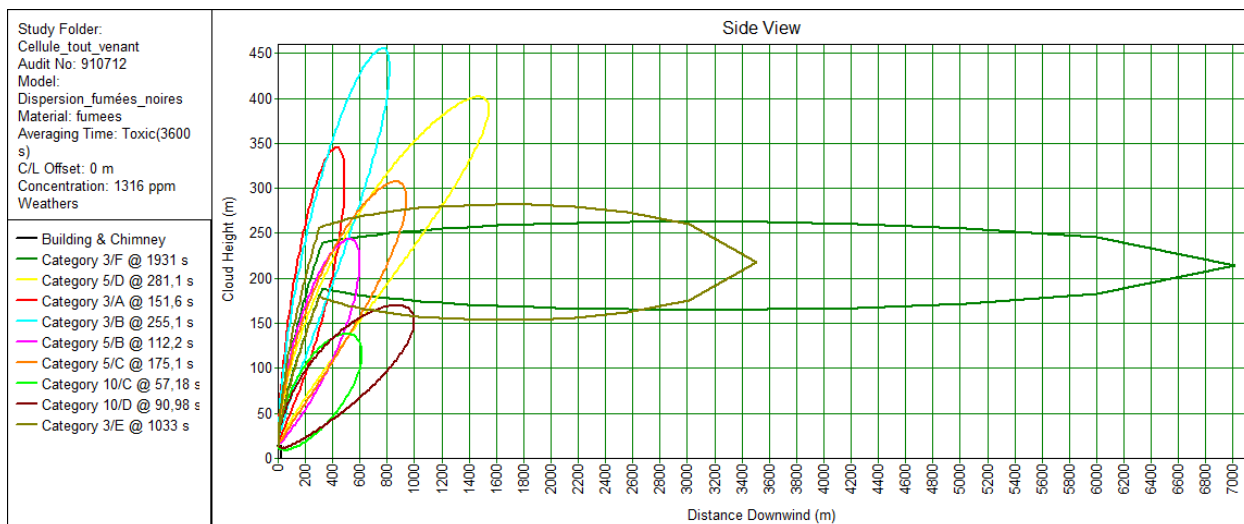


Figure 3 : Panache fumées noires

Le panache serait visible à plusieurs kilomètres.

L'opacification au sol est maximale par grand vent, en conditions 10C. La figure ci-dessous présente la forme du panache dans ces conditions à différentes concentrations :

- 132 ppm correspondant à une distance de visibilité de 100 m (opacification modérée),
- 212 ppm correspondant à une distance de visibilité de 60 m (forte opacification)
- 280 ppm correspondant à une distance de visibilité de 50 m,
- 346 ppm correspondant à une distance de visibilité de 40 m.

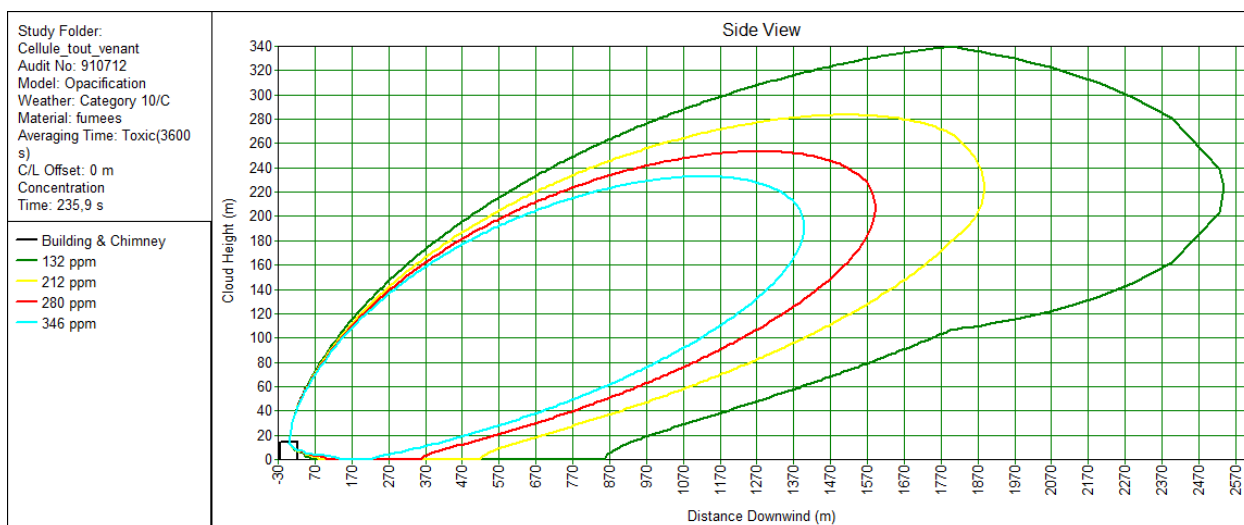


Figure 4 : réduction de la visibilité

La visibilité **au niveau du sol** risque donc d'être réduite dans un rayon de 850 m autour de l'entrepôt.

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

6.1. 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.

6.2. 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.

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®. Le terme source à imposer est évalué selon la méthode décrite au paragraphe 5.1.

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 :

$$C = \rho_{air} \chi y_p$$

ρ_{air} désignant la masse volumique de l'air à température ambiante ($1,2 kg/m^3$). 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.