



## AIRELLES ENVIRONNEMENT

### Dispersion de fumées en cas d'incendie sur une cellule de stockage de 6 000 m<sup>2</sup> - Evaluation des distances d'effets toxiques

Historique des révisions				
VERSION	DATE	COMMENTAIRES	Rédigé par	Vérifié par
A	Mars 2023	Création de document	M. VACHON	

**Client :** AIRELLES Environnement  
**Objet :** Dispersion de fumées en cas d'incendie sur une cellule de stockage de 6 000 m2  
 - Evaluation des distances d'effets toxiques

**Référence document :** N2201759-253-DE001-A  
**En date du :** 08/03/2023

Approuvé par			
Vérifié par			
Rédigé par	<b>VACHON Marc</b>	<b>Chef de projet Maîtrise des Risques Industriels</b>	
	Nom et Prénom	Fonction	Visa

## Table des matières

<b>1.</b>	<b>PREAMBULE</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>DOCUMENTS DE REFERENCE</b>	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>DONNEES</b>	<b>7</b>
<b>5.</b>	<b>CONDITIONS DE DISPERSION</b>	<b>8</b>
<b>6.</b>	<b>CARACTERISATION DES FOYERS</b>	<b>9</b>
6.1.	Caractérisation de la molécule équivalente .....	9
6.2.	Réaction de combustion.....	10
6.3.	Caractéristiques des foyers .....	10
<b>7.</b>	<b>RESULTATS</b>	<b>13</b>
7.1.	Dispersion toxique.....	13
7.2.	Réduction de la visibilité.....	13
<b>8.</b>	<b>ANNEXE : DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL MISE EN ŒUVRE</b>	<b>15</b>
8.1.	Spécification du terme source.....	15
8.2.	Opacification locale de l'atmosphère .....	17

## 1. PREAMBULE

---

Les résultats figurant dans le présent document ont été établis dans une configuration spécifique puis généralisés à toute cellule de surface 6 000 m<sup>2</sup> incluse dans un entrepôt et destinée au stockage de polymères.

La responsabilité de Naldéo Technologies et Industries (NTI) ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, NTI ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. Il n'y a pas d'obligation pour NTI d'actualiser ce document après cette date.

La responsabilité de NTI ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. NTI dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

## 2. CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT

---

AIRELLES ENVIRONNEMENT établit des dossiers réglementaires pour des entrepôts en projet.

Dans ce cadre, AIRELLES ENVIRONNEMENT a sollicité Naldéo Technologies et Industries (NTI) afin de disposer d'une évaluation des effets toxiques ainsi que des effets de réduction de la visibilité associés à la dispersion des fumées en cas d'incendie affectant une cellule de 6 000 m<sup>2</sup> destinée au stockage de polymères.

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

### 3. DOCUMENTS DE REFERENCE

[DR.01]	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering	NFPA, 2 <sup>nd</sup> Edition (1995)
[DR.02]	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
[DR.03]	INERIS Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme) susceptibles d'être émises par un incendie	Rapport 203887 – 2079442 v 3.0 (11/07/2022)
[DR.04]	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
[DR.05]	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	DRA35-Q16 (17/03/2005)

## 4. DONNEES

---

Les calculs sont effectués pour une cellule de 6 000 m<sup>2</sup> avec une hauteur de mur de 13,7 m.

Il est supposé la répartition massique suivante représentative des produits stockés :

- 30% bois / papier / carton assimilés à de la cellulose,
- 15% PVC,
- 15% mousse de polyuréthane,
- 5% PET,
- 35% PP.

## 5. CONDITIONS DE DISPERSION

Les conditions atmosphériques retenues pour les modélisations sont définies par la circulaire du 10 mai 2010 [DR.02].

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 1 : 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 2 : 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).

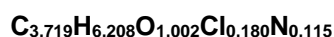


## 6. CARACTERISATION DES FOYERS

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

### 6.1. Caractérisation de la molécule équivalente

Sur la base de la répartition massique indiquée au chapitre 4, la formule brute déterminée pour la molécule équivalente est la suivante :



Les taux de combustion des différents composés sont évalués à partir des données figurant dans la référence [DR.01] :

Composé	Taux de combustion (g/m <sup>2</sup> /s)
Bois / Papiers / Carton	14
Polychlorure de vinyle (PVC)	6
Polyuréthane (PU)	29
Polyéthylène téréphtalate (PET)	20
Polypropylène (PP)	18

*Tableau 3 : Taux de combustion des différents constituants*

Le taux de combustion moyen, compte tenu de la répartition massique, est évalué à 16,8 g/m<sup>2</sup>/s.

Pour ce qui concerne la chaleur de combustion, l'application des formules de Boie et de Dulong à la molécule moyenne conduit à retenir une valeur de 26,6 MJ/kg.

Enfin, compte tenu des facteurs d'émission de chaque produit (voir annexe), les facteurs d'émission calculés pour le mélange sont les suivants :

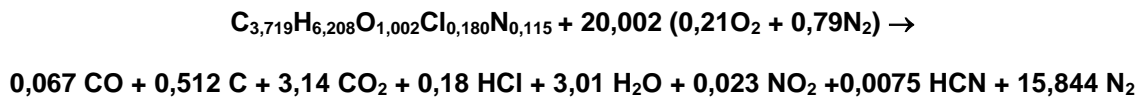
Facteur d'émission CO (g/kg)	Facteur d'émission particules assimilées au carbone (g/kg)	Facteur d'émission NO <sub>2</sub> (g/kg)	Facteur d'émission HCN (g/kg)	Facteur d'émission HCl (g/kg)
25,05	82,2	13,8	0,27	48

*Tableau 4 : Facteurs d'émission associés aux différents produits*

Pour ce qui concerne le chlorure d'hydrogène, la totalité du chlore est supposée transformée en HCl afin de respecter le bilan atomique (le facteur d'émission n'est pas pris en compte).

## 6.2. Réaction de combustion

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



Le besoin massique en air de combustion vaut  $s = 7,696$  kg air / kg combustible.

La chaleur de combustion effective est d'environ 21,8 MJ/kg. Cela conduit à une efficacité de combustion (ratio entre la chaleur de combustion effective et la chaleur de combustion complète évaluée à 26,6 MJ/kg) de 0,82, ordre de grandeur usuel pour la plupart des combustibles solides.

La fraction d'énergie convectée  $\chi_{conv}$  (énergie utilisée pour chauffer les gaz et les mettre en vitesse, voir annexe) est évaluée à 0,574 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 0,426. Cette valeur est légèrement supérieure aux valeurs usuelles qui vont de 0,35 à 0,4 [DR.01]. Ceci est dû à la présence de PVC et de mousse polyuréthane qui présentent des fractions de puissance rayonnée importantes.

## 6.3. Caractéristiques des foyers

L'évolution de puissance du feu en fonction du temps telle que calculée à l'aide du logiciel FLUMILOG® (en considérant une palette rubrique 2662) prend la forme suivante :

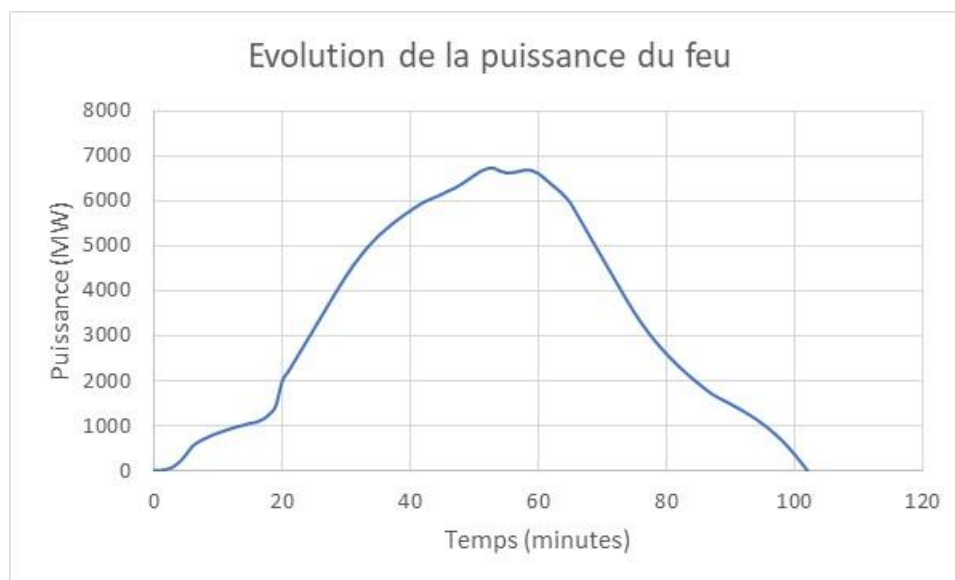


Figure 1 : Puissance du feu cellule de 6 000 m<sup>2</sup>

Selon la méthode de calcul décrite en annexe, les caractéristiques du foyer déduites de cette courbe de puissance sont les suivantes :

- Hauteur d'émission comptée depuis le sol (hauteur de toiture prise en compte) : 64,1 m,
- Débit de produits de combustion : 878 kg/s,
- Débit total de fumées à hauteur d'émission : 10 691,4 kg/s,
- Débit d'air entraîné à hauteur d'émission : 9 813,4 kg/s,
- Température moyenne des gaz : 269°C,
- Vitesse ascensionnelle moyenne 13,9 m/s.

La composition des fumées (en % mol.) à hauteur d'émission, compte tenu de l'air entraîné, est la suivante :

Produit	% molaire
CO	0,0243
C	0,1859
CO <sub>2</sub>	1,1398
H <sub>2</sub> O	1,0926
HCN	0,0027
NO <sub>2</sub>	0,0083
HCl	0,0653
N <sub>2</sub>	78,474
O <sub>2</sub>	19,0071

**Tableau 5 : Composition des fumées**

La fraction massique de particules dans les fumées  $y_p$  vaut  $7,74 \cdot 10^{-4}$ .

Les effets toxiques sont combinés suivant la loi d'additivité mentionnée par l'INERIS dans son ouvrage référencé OMEGA 16 [DR.05]. 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 [DR.03] sont les suivants pour le mélange de fumées.

Composé toxique	NO <sub>2</sub>	CO	HCN	HCl	Fumées
Fraction molaire dans les fumées	8,35E-05	2,43E-04	2,72E-05	6,53E-04	/
Seuil des effets irréversibles sur une heure (ppm)	40	800	4,6	40	<b>40 578</b>
Seuil des premiers effets létaux sur une heure (ppm)	70	3 200	41	240	<b>214 818</b>
Seuil des effets létaux significatifs sur une heure (ppm)	73	3 200	63	379	<b>296 231</b>

*Tableau 6 : Seuils d'effets toxiques cellule 6 000 m<sup>2</sup>*

## 7. RESULTATS

Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel PHAST® version 8.23.

### 7.1. 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).

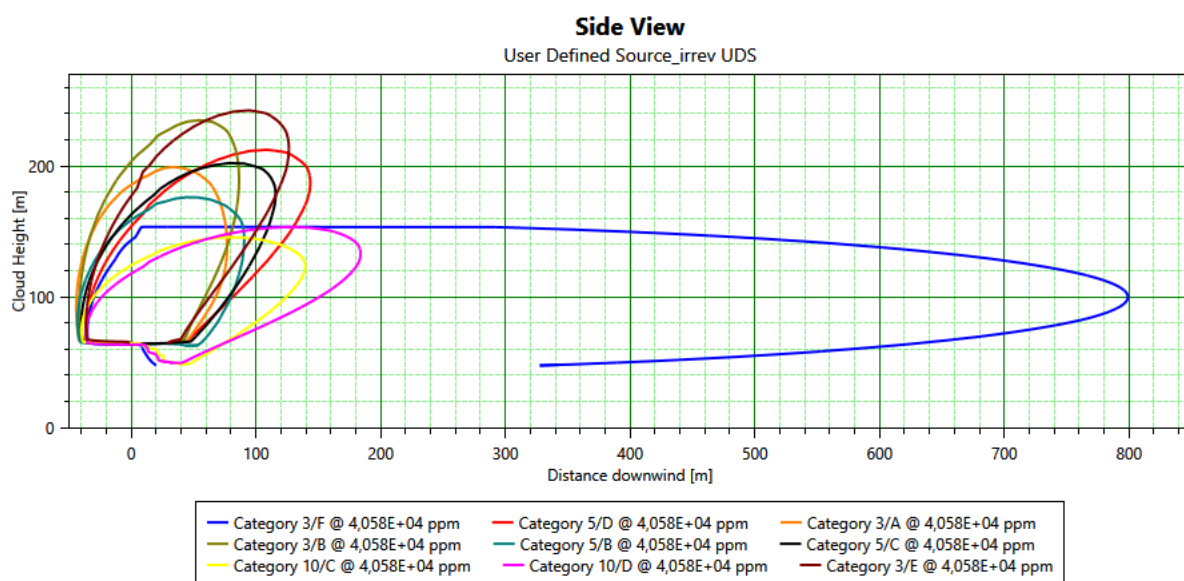


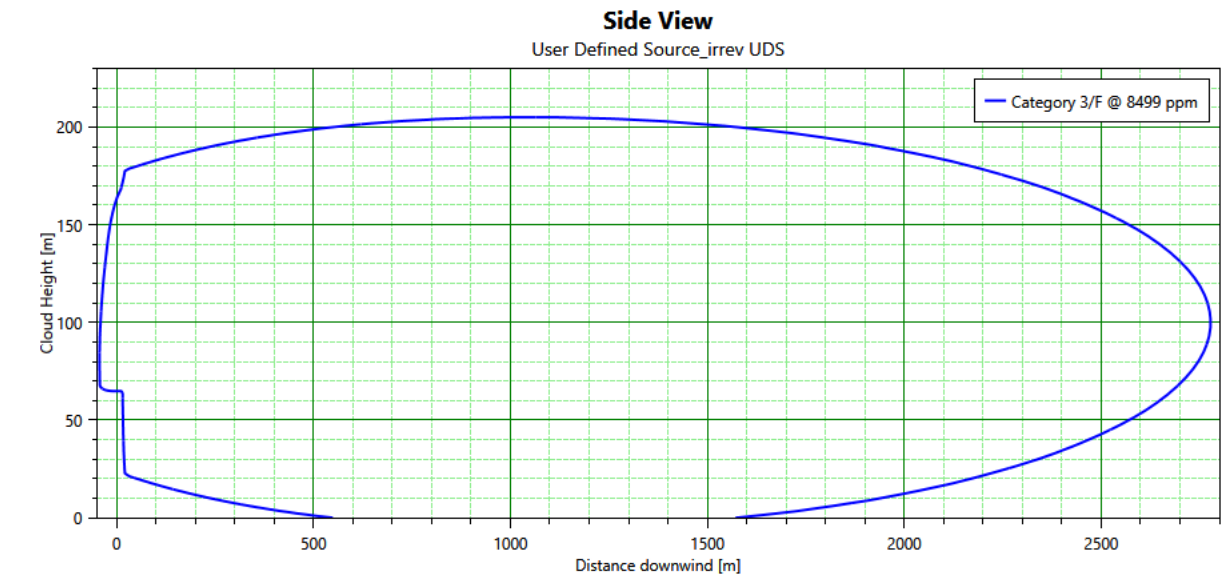
Figure 2 : Panache effets irréversibles

L'altitude minimale à laquelle les effets irréversibles sont atteints est de 47 m en conditions 3F, entre 20 et 350 m des bords de la cellule.

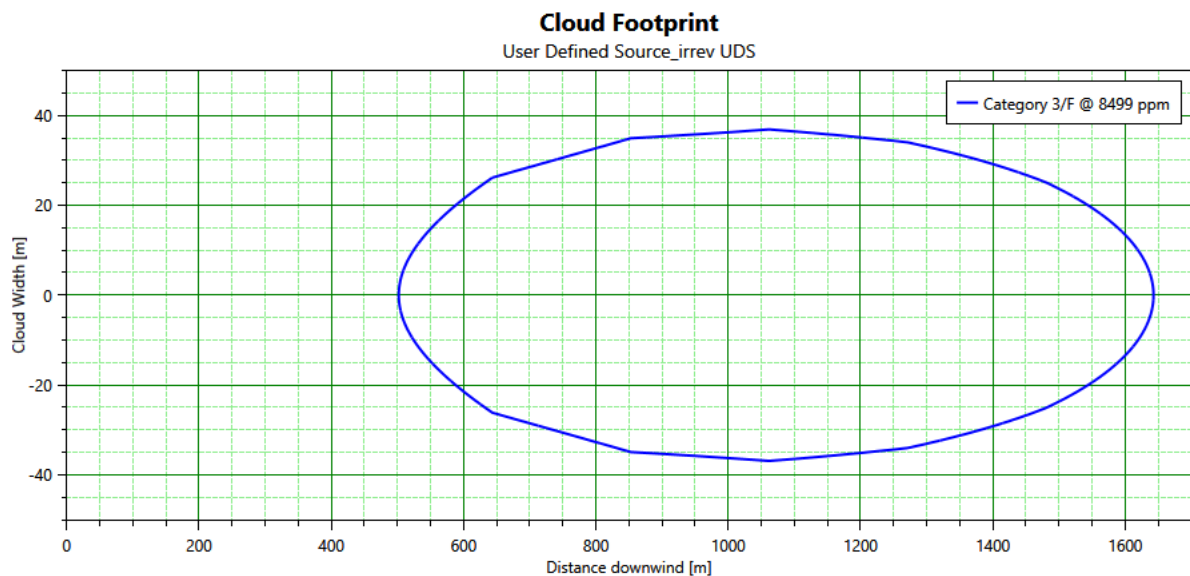
### 7.2. Réduction de la visibilité

La concentration en fumées amenant à une réduction de la visibilité de 50 m (panache de fumées noires) est de 8 499 ppm, compte tenu de la fraction massique de particules dans les fumées (pour mémoire, sur autoroute, une bande d'arrêt d'urgence est constituée de traits de 39 m séparés par des intervalles de 13 m. Une réduction de visibilité à 50 m équivaut à un trait et un intervalle).

La figure ci-dessous présente l'allure du panache à ce niveau de concentration dans les conditions 3F (les plus pénalisantes).



*Vue de côté*



*Vue de dessus à 1,5 m de haut*

**Figure 3 : Panache fumées noires**

La réduction de visibilité pourrait être importante sur plusieurs centaines de mètres (entre 550 m et 1 600 m).

## 8. ANNEXE : DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL MISE EN ŒUVRE

### 8.1. Spécification du terme source

La méthode d'établissement du terme source décrite ci-après est tirée de la référence [DR.03]. Elle est applicable à la caractérisation de l'incendie dans un bâtiment avec perte de la toiture.

#### **Composition des fumées hors entraînement d'air**

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. En outre, en fonction de la composition chimique des espèces, divers produits toxiques peuvent se trouver émis :

- Du cyanure d'hydrogène (HCN),
- Du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>),
- Du chlorure d'hydrogène (HCl),
- Du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>).

Le SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR.01] ainsi que le rapport de l'INERIS référencé [DR.03] fournissent des facteurs d'émission (en grammes par kilo de produit brûlé) pour différents produits combustibles. Dans la situation envisagée, les facteurs d'émission retenus sont les suivants pour chacune des espèces constituant le mélange (voir chapitre 4) :

	Facteur d'émission CO (g/kg)	Facteur d'émission particules assimilées au carbone (g/kg)	Facteur d'émission NO <sub>2</sub> (g/kg)	Facteur d'émission HCN (g/kg)	Facteur d'émission HCl (g/kg)
Cellulose	4	15	0,48	0	0
PVC	65	72	0,6	0	320
Mousse PU	30	188	92	1,8	0
PET	24	60	2	0	0
PP	24	59	0	0	0

**Tableau 7 : Facteurs d'émission associés aux différents produits**

Les facteurs d'émission pour le mélange sont évalués au prorata de la fraction massique de chacun des constituants.

Ces éléments, en complément des bilans atomiques, permettent d'écrire la réaction de combustion supposée instantanée à proximité de la source.

**Débit de combustion**

Le débit de combustion est tel que :

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

$\dot{m}''$  : taux de combustion (kg/s/m<sup>2</sup>)

A : surface en feu (m<sup>2</sup>)

Le taux de combustion du mélange est évalué au prorata de la fraction massique de chacun des constituants.

**Débit de produits de combustion**

Le débit de produits de combustion est donné par :

$$\dot{m}_p = (1 + s) \dot{m}$$

s désignant le besoin massique en air de combustion (kg air par kg de produit) déduit de la réaction.

**Puissance du feu**

L'évolution de la puissance du feu  $\dot{Q}$  (en kW) en fonction du temps est tirée des résultats de FLUMILOG®.

**Chaleur convectée**

L'évolution de la chaleur convectée (chaleur non dissipée par rayonnement et servant à chauffer les gaz et les mettre en vitesse)  $\dot{Q}_c$  (kW) est évaluée, connaissant  $\dot{Q}$ , à l'aide de la relation :

$$\dot{Q}_c = \chi_{\text{conv}} \dot{Q}$$

$\chi_{\text{conv}}$  désignant la fraction convectée moyenne (-)

$\Delta H_{\text{ch}}$  : chaleur de combustion effective tenant compte de l'efficacité de combustion (kJ)

Les fractions d'énergie convectée sont disponibles dans le SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR02].

**Hauteur d'émission des fumées**

La hauteur d'émission des fumées  $z_1$  (m) est calculée par :

$$z_1 = z_0 + 0,166 \dot{Q}_c^{2/5}$$

$z_0$  désigne l'origine virtuelle du panache. Pour des stockages en entrepôt il est conseillé [DR.03] de prendre  $z_0 = 0$ , l'origine de l'axe z étant fixée à hauteur de toit.

**Débit total des fumées**

Le débit total de fumées  $\dot{m}_f$  (kg/s), correspondant à la somme du débit de produits de combustion et du débit d'air entraîné à la hauteur  $z_1$ , est donné par :

$$\dot{m}_f = 0,071 \dot{Q}_c^{1/3} (z_1 - z_0)^{5/3} (1 + 0,026 \dot{Q}_c^{2/3} (z_1 - z_0)^{-5/3})$$

Connaissant le débit total de fumées et le débit de produits de combustion, le débit d'air entraîné peut être déduit par différence et la composition des fumées à hauteur d'émission est évaluée par bilan massique.



### **Température moyenne à hauteur d'émission**

La température moyenne  $T_f$  des fumées (°C ou K) est donnée par :

$$T_f = T_\infty + 24,94 (\dot{Q}_c)^{2/3} (z_1 - z_0)^{-5/3} / 2$$

Avec  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$

### **Vitesse ascensionnelle**

En notant  $\Delta T_f = T_f - T_\infty$ , la vitesse ascensionnelle à hauteur d'émission est telle que :

$$U = 0,54 (\Delta T_f \dot{Q}_c)^{1/5} / 2$$

### **Terme source**

Les valeurs :

- De hauteur d'émission,
- De débit de fumées,
- De température des fumées,
- De vitesse ascensionnelle,

correspondent aux valeurs moyennes sur la durée du feu.

Les fumées sont supposées émises en direction verticale.

## **8.2. 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  $\chi$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) des fumées (mélange de gaz de combustion et d'air entraîné) aux points considérés est calculée à l'aide du logiciel PHAST®. Le terme source à imposer est évalué selon la méthode décrite au paragraphe 8.1.

### **Calcul de la concentration en particules à distance du foyer**

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

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

La fraction massique  $y_p$  de particules dans les fumées est calculée à hauteur d'émission.

$\rho_{\text{air}}$  désignant la masse volumique de l'air à température ambiante (1,2 kg/m<sup>3</sup>). 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<sup>-1</sup>) est donné par (SFPE Handbook [DR.01]) :

$$K = 7\,600\,C$$

### **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.