



INGEA INGENIERIE

Dispersion de fumées d'incendie - Evaluation des distances d'effets (site AGRISTO d'ESCAUDŒUVRES)



Historique des révisions				
VERSION	DATE	COMMENTAIRES	Rédigé par	Vérifié par
B	Février 2025	Prise en compte des remarques client	M. VACHON	Y. SERAL
A	Janvier 2025	Création de document	M. VACHON	Y. SERAL

Client : INGEA Ingénierie
Objet : Dispersion de fumées d'incendie - Evaluation des distances d'effets (site AGRISTO d'ESCAUDŒUVRES)

Référence document : N2500061-200-DE001-B
En date du : 06/02/2025

Approuvé par	VACHON Marc	Chef de projet Maîtrise des Risques Industriels	
Vérifié par	SERAL Yann	Chef de projet Maîtrise des Risques Industriels	
Rédigé par	VACHON Marc	Chef de projet Maîtrise des Risques Industriels	
	Nom et Prénom	Fonction	Visa

Table des matières

1.	RESUME	4
2.	CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT	5
3.	DOCUMENTS DE REFERENCE	6
4.	DONNEES	7
5.	CONDITIONS DE DISPERSION	8
6.	CARACTERISATION DU FOYER	9
6.1.	Répartition massique des produits stockés	9
6.2.	Caractérisation de la molécule équivalente	9
6.3.	Réaction de combustion.....	10
6.4.	Phases de l'incendie considérées pour les calculs de dispersion	11
6.5.	Caractéristiques du foyer	11
6.5.1.	Remarque préliminaire.....	11
6.5.2.	Paramètres d'émission.....	12
7.	RESULTATS	14
7.1.	Dispersion toxique.....	14
7.2.	Réduction de la visibilité.....	15
8.	CONCLUSION	17
9.	ANNEXE : DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL MISE EN ŒUVRE	18
9.1.	Spécification du terme source.....	18
9.1.1.	Composition des fumées hors entraînement d'air	18
9.1.2.	Débit de gaz combustibles	19
9.1.3.	Débit de produits de combustion stœchiométrique	19
9.1.4.	Puissance du feu.....	19
9.1.5.	Chaleur convectée	19
9.1.6.	Hauteur d'émission des fumées.....	19
9.1.7.	Débit total des fumées	20
9.1.8.	Température moyenne à hauteur d'émission	20
9.1.9.	Vitesse ascensionnelle.....	20
9.1.10.	Terme source	20
9.2.	Opacification locale de l'atmosphère	21
9.2.1.	Calcul de la concentration en fumées à distance du foyer	21
9.2.2.	Calcul de la concentration en particules à distance du foyer.....	21

1. RESUME

INGEA Ingénierie établit un dossier réglementaire pour une future usine de production de produits surgelés à base de pommes de terre, exploitée par la société AGRISTO et conçue par la société A CONSTRUCT. Cette usine sera implantée sur la commune d'Escaudœuvres (59).

Le site inclut un stockage qui abrite une partie des ingrédients utilisés pour la fabrication des produits surgelés ainsi que des matières nécessaires à l'emballage et à la palettisation de ces produits. L'incendie du stockage, dénommé « Drystore », est envisagé dans l'étude de dangers.

Dans ce cadre, Naldeo Technologies & Industries (NTI) a évalué les effets de la dispersion des fumées en termes de toxicité et d'atténuation de la visibilité.

Il s'avère que, compte tenu de la nature des produits impliqués dans l'incendie (essentiellement des films polyéthylène et des cartons), le risque d'effets toxiques resterait circonscrit à proximité immédiate (une dizaine de mètres) de la zone d'émission des fumées. Compte tenu de la hauteur minimale d'émission du panache (25 m au-dessus du sol), aucun effet toxique ne serait à redouter à hauteur d'homme.

Concernant l'opacification de l'atmosphère par les fumées au niveau du sol, la distance de visibilité resterait supérieure à 200 m, la zone concernée se situant approximativement entre 800 m et 1 400 m de l'entrepôt.

2. CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT

INGEA Ingénierie établit un dossier réglementaire pour une future usine de production de produits surgelés à base de pommes de terre, exploitée par la société AGRISTO et conçue par la société A CONSTRUCT. Cette usine sera implantée sur la commune d'Escaudœuvres (59).

Le site inclut un stockage qui abrite une partie des ingrédients utilisés pour la fabrication des produits surgelés ainsi que des matières nécessaires à l'emballage et à la palettisation de ces produits. L'incendie du stockage, dénommé « Drystore », est envisagé dans l'étude de dangers.

Dans ce cadre, INGEA Ingénierie a sollicité Naldeo Technologies & Industries (NTI) pour évaluer les effets de la dispersion des fumées en termes de toxicité et d'atténuation de la visibilité.

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

3. DOCUMENTS DE REFERENCE

[DR.01]	CTICM Projet « Entrepôt AGRISTO Drystore » Note de synthèse pour la justification du calcul de flux radiatif avec FLUMILOG	Rapport SRI-24/073b- CHT/NEB (Juillet 2024)
[DR.02]	Courriels INGEA Ingénierie et A CONSTRUCT des 14, 16 et 20 janvier 2025	-
[DR.03]	SFPE Handbook of Fire Protection Engineering	NFPA, 2 nd Edition (1995)
[DR.04]	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.05]	INERIS Recensement des substances toxiques (ayant un impact potentiel à court, moyen et long terme) susceptibles d'être émises par un incendie https://www.ineris.fr/fr/omega-16-recensement-substances-toxiques-ayant-impact-potentiel-court-moyen-long-terme-susceptibles	Rapport 203887 – 2079442 v 4.0 (8/06/2023)
[DR.06]	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.07]	https://substances.ineris.fr/le-portail-substances-chimiques	

4. DONNEES

Le bâtiment concerné par l'étude est dédié au stockage d'une partie des ingrédients utilisés pour la fabrication des produits surgelés ainsi que des matières nécessaires à l'emballage et à la palettisation de ces produits. Ce bâtiment, dénommé « Drystore », est de type stockage automatisé en racks et peut abriter environ 21 300 palettes.

Le stockage, classé en rubrique 1510 et soumis à autorisation au sens de l'arrêté du 11 avril 2017 modifié, occupe une superficie au sol d'environ 6 100 m² avec des dimensions de 120 m x 51 m pour une hauteur moyenne de 34 m. La structure porteuse du bâtiment est en béton.

Un calcul des effets thermiques à l'aide de la méthode FLUMILOG a été effectué par le CTICM (centre technique industriel de la construction métallique) [DR.01] en tant que membre du comité technique FLUMILOG.

Les hypothèses prises en compte sont les suivantes :

- Les racks n'offrant aucune résistance au feu, les palettes vont s'effondrer les unes sur les autres en formant un unique îlot de même surface au sol que le stockage en rack initial soit 100 m x 50 m (5 000 m²) ;
- L'espace entre deux palettes superposées disparaît (les palettes s'empilent parfaitement) et elles restent intègres sur leur hauteur ; cela permet de maximiser la hauteur du stockage masse créé ; avec une hauteur de 2,5 m et 10 niveaux de palette, la hauteur de stockage est de 25 m.

Le calcul FLUMILOG donne une hauteur de flamme de 21,8 m pendant une durée de 150 min. Ainsi, la méthode FLUMILOG considère que les parois coupe-feu 2h s'effondrent au bout de 120 min et présentent alors une hauteur résiduelle de 3,4 m (10% de la hauteur initiale).

La courbe de puissance prend la forme suivante :

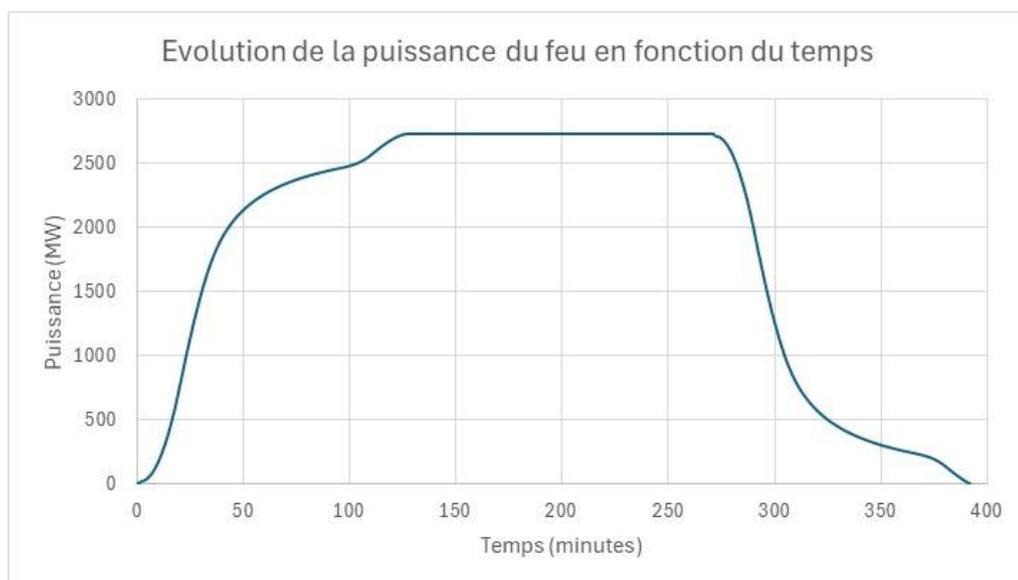


Figure 1 – Evolution de la puissance du feu en fonction du temps

5. CONDITIONS DE DISPERSION

Les conditions atmosphériques retenues pour les modélisations sont définies par la circulaire du 10 mai 2010 [DR.04].

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 (environ un trentième de la hauteur des bâtiments selon recommandation des concepteurs du logiciel PHAST® utilisé pour les calculs) ; cette valeur est **pénalisante** du point de vue de la dispersion (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 ce qui contribue au maintien de concentrations élevées).

6. CARACTERISATION DU FOYER

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

6.1. Répartition massique des produits stockés

La répartition massique des produits dans l'entrepôt a été caractérisée en concertation avec AGRISTO, A CONSTRUCT et INGEA Ingénierie, à partir des données mises à disposition par AGRISTO [DR.02].

Cette répartition est la suivante :

Produits	Masse totale (kg)	% massique
Polyéthylène	2 316 224	43,0%
Polypropylène	4 249	0,1%
Amidon (ingrédient)	518 400	9,6%
Acide oléique (ingrédient)	31 200	0,6%
Dextrose (ingrédient)	27 000	0,5%
Bois	485 832	9,0%
Cellulose (cartons)	1 999 800	37,2%

Tableau 3 – Répartition massique des produits dans l'entrepôt

Les deux produits présents majoritairement (80% de la masse stockée) sont le polyéthylène (en particulier les films d'emballage) et la cellulose (cartons).

Pour les besoins du calcul, les ingrédients alimentaires stockés dans l'entrepôt (flocons de pomme de terre, dextrose, crème, produits d'enrobage...) ont été assimilés à l'amidon (féculé de pomme de terre), à l'acide oléique (acide gras) et à la dextrose (sucre simple).

6.2. Caractérisation de la molécule équivalente

Sur la base de la répartition massique indiquée au paragraphe 6.1, la formule brute déterminée pour la molécule équivalente est la suivante :



La présence d'une petite quantité d'atomes de chlore dans la molécule est due à la présence du bois dont la combustion émet un peu de chlorure d'hydrogène [DR.05].

Les taux de combustion des différents composés sont évalués à partir des données figurant dans la référence [DR.03] et des données issues du logiciel PHAST® :

Composé	Taux de combustion (g/m ² /s)
Bois / Cartons	14
Amidon / Dextrose	8
Polypropylène (PP)	18
Polyéthylène (PE)	18
Acide oléique	28

Tableau 4 - Taux de combustion des différents constituants

Le taux de combustion moyen, compte tenu de la répartition massique, est évalué à 15,2 g/m²/s.

La chaleur de combustion dégagée par la molécule moyenne en situation d'incendie (tenant compte de la présence de produits imbrûlés tels que le monoxyde de carbone et les suies) vaut 24,6 MJ/kg.

Connaissant les facteurs d'émission en espèces imbrûlés ou toxiques de chacun des produits stockés (voir annexe), les facteurs d'émission calculés pour le mélange sont les suivants :

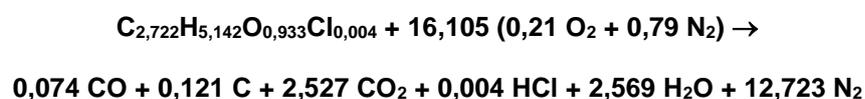
Facteur d'émission CO (g/kg)	Facteur d'émission particules assimilées au carbone (g/kg)	Facteur d'émission HCl (g/kg)
39	27,5	2,8

Tableau 5 - Facteurs d'émission associés à la molécule équivalente

La totalité du chlore est supposée transformée en chlorure d'hydrogène (HCl).

6.3. Réaction de combustion

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



Remarque : le combustible ne contenant aucun atome d'azote, la présence d'oxydes d'azote dans les produits de combustion n'est pas prise en compte ; en effet, la production éventuelle d'oxydes d'azote du fait de réactions impliquant l'azote atmosphérique est négligeable.

Le besoin massique en air de combustion vaut $s = 8,77$ kg air / kg combustible.

La fraction d'énergie convectée χ_{conv} (énergie utilisée pour chauffer les gaz et les mettre en vitesse, voir annexe) est évaluée à 0,6 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 0,4. Cette valeur correspond aux valeurs usuelles qui vont de 0,35 à 0,4 ([DR03], [DR.05]).

6.4. Phases de l'incendie considérées pour les calculs de dispersion

Deux phases successives sont considérées :

- Phase 1 correspondant aux deux premières heures de l'incendie pendant lesquelles les parois du stockage restent intègres,
- Phase 2 correspondant à la poursuite de l'incendie (4,5 heures) après effondrement des parois du stockage.

6.5. Caractéristiques du foyer

6.5.1. Remarque préliminaire

Compte tenu de l'évolution de la puissance du feu, l'application de la méthode de calcul décrite en annexe conduit à des hauteurs d'émission des panaches de fumées supérieures à la hauteur de flamme (21,8 m) mentionnée dans la référence [DR.01].

Par souci de cohérence avec les résultats issues du calcul FLUMILOG, les hauteurs d'émission retenues sont les suivantes :

120 premières minutes (parois coupe-feu intègres)	Entre 120 minutes et la fin du sinistre (parois coupe-feu effondrées)
Hauteur origine = 21,8 m (hauteur de flamme issue du calcul FLUMILOG) + 25 m (hauteur de stock après effondrement des racks) soit 46,8 m	Hauteur origine = 21,8 m (hauteur de flamme issue du calcul FLUMILOG)

Tableau 6 – Hauteur d'émission retenues

Le fait de prendre en compte une hauteur d'émission minorée conduit à des résultats majorants en termes d'effets à hauteur d'homme.

Dans la réalité, les parois vont probablement s'effondrer au-delà d'une durée de 120 minutes. Une fois effondrées (vers l'intérieur du stockage), elles vont réduire la surface en feu (donc la puissance) et la hauteur résiduelle du stock aura également diminuée. Sur la deuxième partie de l'incendie, la hauteur de rejet effective va donc se situer entre celle prise en compte sur les 120 premières minutes et une hauteur plus faible (avec débit réduit) due à la réduction de la surface en feu.

Le fait de fixer la hauteur de rejet à la hauteur moyenne de flamme depuis le sol (avec débit non réduit) pendant la seconde phase de l'incendie constitue par conséquent une hypothèse raisonnablement pénalisante.

6.5.2. Paramètres d'émission

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

	Phase 1 de l'incendie	Phase 2 de l'incendie
Débit de produits de combustion stœchiométrique	742,7 kg/s	
Débit de fumées à hauteur d'émission	5 978,7 kg/s	6 061,6 kg/s
Débit d'air entraîné à hauteur d'émission	5 236 kg/s	5 318,9 kg/s
Hauteur d'émission (voir paragraphe 6.5.1)	46,8 m	21,8 m
Température à hauteur d'émission	269°C	
Vitesse d'émission	12,6 m/s	12,5 m/s
Fraction volumique de monoxyde de carbone (CO)	0,051 % vol.	0,051 % vol.
Fraction volumique de particules assimilées au carbone (C)	0,084 % vol.	0,083 % vol.
Fraction massique de particules assimilées au carbone (C)	3,49 10 ⁻⁴ kg/kg	3,44 10 ⁻⁴ kg/kg
Fraction volumique de dioxyde de carbone (CO ₂)	1,748 % vol.	1,724 % vol.
Fraction volumique de vapeur d'eau (H ₂ O)	1,777 % vol.	1,753 % vol.
Fraction volumique chlorure d'hydrogène (HCl)	0,003 % vol.	0,003 % vol.
Fraction volumique d'azote (N ₂)	78,199 % vol.	78,214 % vol.
Fraction volumique d'oxygène (O ₂)	18,138 % vol.	18,172 % vol.

Tableau 7 – Caractéristiques des foyers (pour les deux phases de l'incendie)

Conformément à l'arrêté du 29 septembre 2005 [DR.06] et à la fiche 1.1.11 de la circulaire du 10 mai 2010 [DR.04], la durée d'exposition aux fumées toxiques retenue est de 60 minutes.

Les seuils d'effets toxiques des fumées sont déterminés suivant la loi d'additivité mentionnée par l'INERIS dans son ouvrage référencé OMEGA 16 [DR.05]. Le seuil équivalent noté $Seuil_{equivalent}$ d'effet toxique est calculé selon la formule suivante :

$$\frac{1}{Seuil_{equivalent}} = \sum \frac{X_i}{Seuil_i}$$

avec :

X_i : fraction volumique du polluant identifié

$Seuil_i$: seuil d'effet du polluant i suivant le Tableau 8 présenté ci-dessous.

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

Les seuils d'effets toxiques [DR.07] sont les suivants pour le mélange de fumées.

Composé toxique	CO		HCl		Fumées	
	Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2
Fraction volumique dans les fumées	5,12 10 ⁻⁴	5,05 10 ⁻⁴	2,77 10 ⁻⁵	2,73 10 ⁻⁵	/	/
Seuil des effets irréversibles sur une heure (ppm)	800 ppm		40 ppm		750 844 ppm	761 250 ppm
Seuil des premiers effets létaux sur une heure (ppm)	3 200 ppm		240 ppm		Non Atteint	Non Atteint
Seuil des effets létaux significatifs sur une heure (ppm)	3 200 ppm		379 ppm		Non Atteint	Non Atteint

Tableau 8 - Seuils d'effets toxiques

Les fumées ne présentent pas de seuils d'effets létaux du fait de la faible proportion de produits toxiques présents (combustibles essentiellement constitués de carbone, d'hydrogène et d'oxygène).

A titre de vérification, la puissance de l'incendie, calculée à partir des paramètres liés à la molécule moyenne, peut être comparée à la puissance moyenne déduite de la courbe d'évolution présentée Figure 1 :

Puissance de feu (molécule moyenne)	Puissance moyenne de l'incendie en phase 1	Puissance moyenne de l'incendie en phase 2
1 870 MW	1 865 MW	1 888 MW

Tableau 9 – Comparaison des puissances de feu

Les propriétés de la molécule moyenne sont adaptées à la configuration envisagée.

7. RESULTATS

Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel PHAST® version 8.9.

7.1. Dispersion toxique

Aucun effet au sol n'est atteint comme le montrent les figures ci-dessous (seuil des effets irréversibles dans les différentes conditions atmosphériques pour les deux phases de l'incendie). La partie toxique du panache est limitée à une faible zone à proximité immédiate du rejet.

Remarque : sur les figures ci-dessous le diamètre du panache est évalué à partir du débit des fumées et de la vitesse d'émission des fumées ; néanmoins, en pratique, la zone toxique sera limitée au voisinage de la surface réelle d'émission.

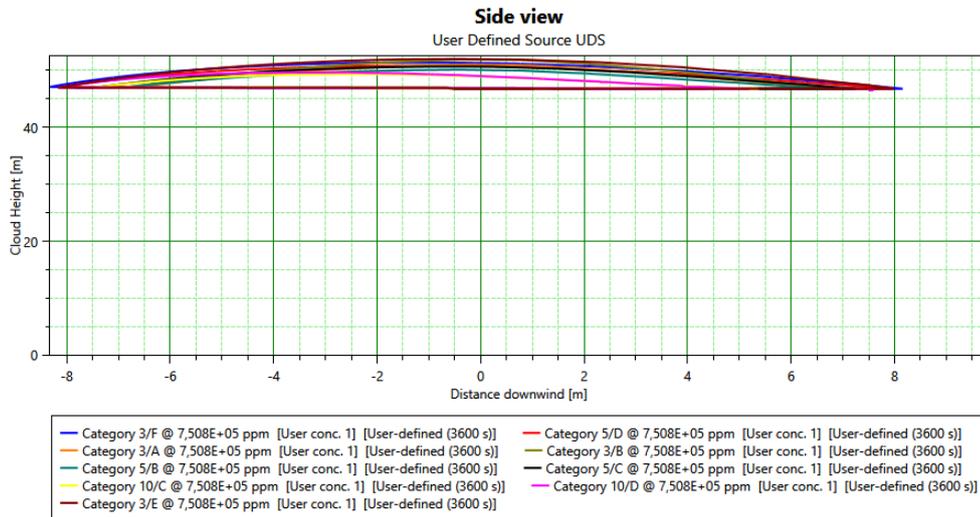


Figure 2 - Panache effets irréversibles phase 1

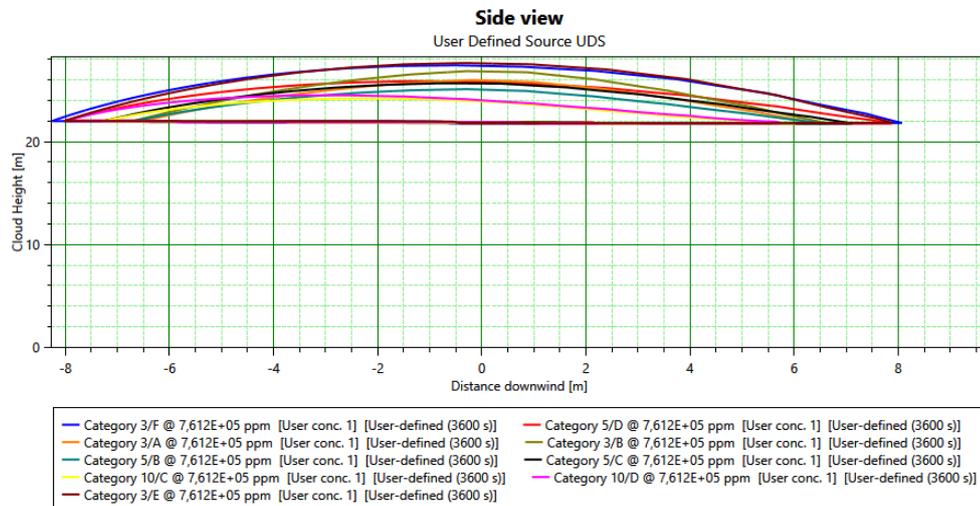


Figure 3 - Panache effets irréversibles phase 2

7.2. Réduction de la visibilité

La distance de visibilité est fonction de la concentration volumique des fumées chargées en particules (voir annexe).

	Phase 1 de l'incendie	Phase 2 de l'incendie
Distance de visibilité 50 m (fumées noires – forte opacification)	18 870 ppm	19 132 ppm
Distance de visibilité 100 m (opacification moyenne)	9 435 ppm	9 566 ppm
Distance de visibilité 200 m (opacification faible)	4 718 ppm	4 783 ppm

Tableau 10 – Distances de visibilité en fonction de la concentration des 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.

Les figures ci-dessous présentent l'allure du panache à ces niveaux de concentration dans les conditions 3F (les plus pénalisantes).

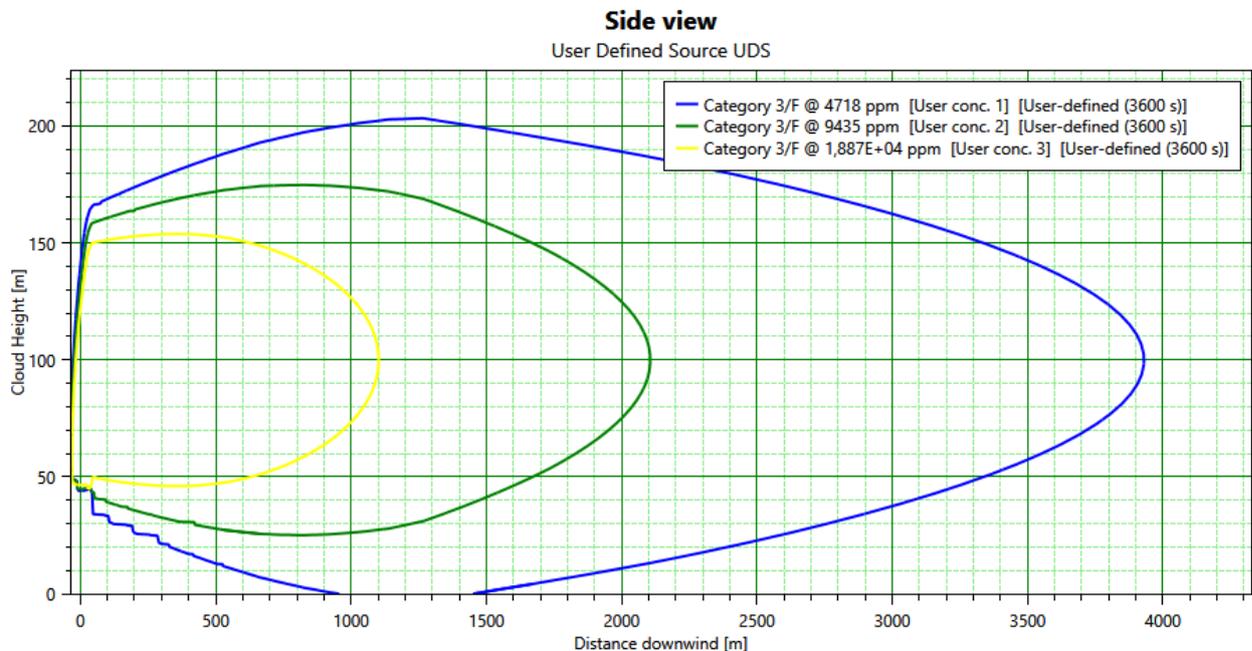


Figure 4 – Vues de côté du panache (phase 1 de l'incendie)

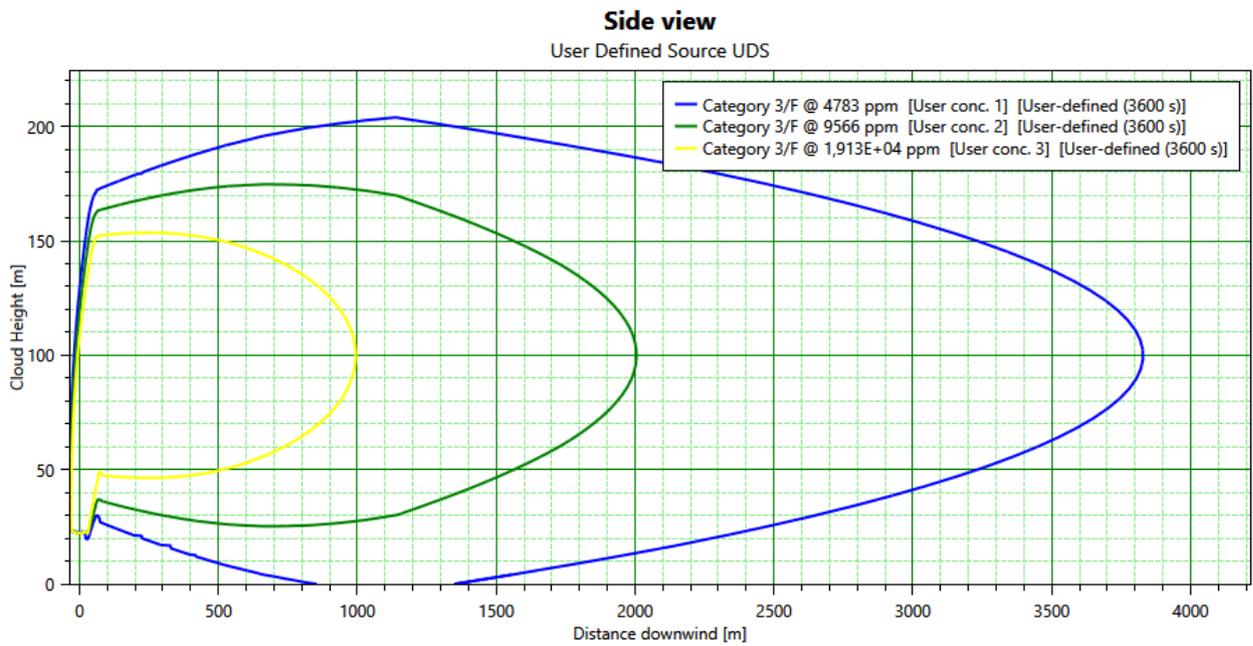


Figure 5 – Vues de côté du panache (phase 2 de l'incendie)

Une faible réduction de la visibilité pourrait être constatée à des distances de l'entrepôt comprises entre 800 m et 1 400 m.

8. CONCLUSION

Des calculs de dispersion de fumées ont été menés dans l'hypothèse d'un incendie affectant un bâtiment (dénommé Drystore) du futur site AGRISTO d'Escaudœuvres (59). Ce bâtiment est dédié au stockage d'une partie des ingrédients utilisés pour la fabrication des produits ainsi que des matières nécessaires à l'emballage et à la palettisation de ces produits

Il s'avère que, compte tenu de la nature des produits impliqués dans l'incendie (essentiellement des films polyéthylène et des cartons), le risque d'effets toxiques resterait circonscrit à proximité immédiate (une dizaine de mètres) de la zone d'émission des fumées. Compte tenu de la hauteur minimale d'émission du panache (25 m au-dessus du sol), aucun effet toxique ne serait à redouter à hauteur d'homme.

Concernant l'opacification de l'atmosphère par les fumées au niveau du sol, la distance de visibilité resterait supérieure à 200 m, la zone concernée se situant approximativement entre 800 m et 1 400 m de l'entrepôt.

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

9.1. Spécification du terme source

La méthode d'établissement du terme source décrite ci-après est tirée de la référence [DR.05].

9.1.1. 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 (NO₂),
- Du chlorure d'hydrogène (HCl),
- Du dioxyde de soufre (SO₂).

Le SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR.03] ainsi que le rapport de l'INERIS référencé [DR.05] 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 paragraphe 6.1) :

	Facteur d'émission CO (g/kg)	Facteur d'émission particules assimilées au carbone (g/kg)	Facteur d'émission HCl (g/kg)
Cellulose	58	1	0
Amidon / Dextrose	19	11	0
Polypropylène	24	60	0
Polyéthylène	24	60	0
Acide linoléique	19	11	0
Bois	56	1	32

Tableau 11 - 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.

9.1.2. Débit de gaz combustibles

Le débit de gaz combustibles est tel que :

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

\dot{m}'' : taux de combustion (kg/s/m²)

A : surface en feu (m²)

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

9.1.3. Débit de produits de combustion stœchiométrique

Le débit de produits de combustion stœchiométrique (hors dilution par l'air) 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.

9.1.4. Puissance du feu

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

9.1.5. 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 :

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

χ_{conv} désignant la fraction convectée moyenne (-)

Les fractions d'énergie convectée sont disponibles dans le SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [DR.03].

9.1.6. 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.05] de prendre $z_0 = 0$, l'origine de l'axe z étant fixée à hauteur de toit.

9.1.7. 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.

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

9.1.9. Vitesse ascensionnelle

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

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

9.1.10. Terme source

Les valeurs :

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

correspondent aux valeurs moyennes sur chacune des phases du feu.

Les fumées sont supposées émises en direction verticale.

9.2. 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.

9.2.1. Calcul de la concentration en fumées à distance du foyer

Sur la base de la réaction de combustion préalablement établie, la concentration volumique CV (m³/m³) 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 9.1.

9.2.2. Calcul de la concentration en particules à distance du foyer

La concentration massique C en particules (en kg/m³) aux points considérés est obtenue par application de la relation :

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

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

ρ_{air} désignant la masse volumique de l'air à température ambiante (1,2 kg/m³). 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 [DR.03]]):

$$K = 7\,600 C$$

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.