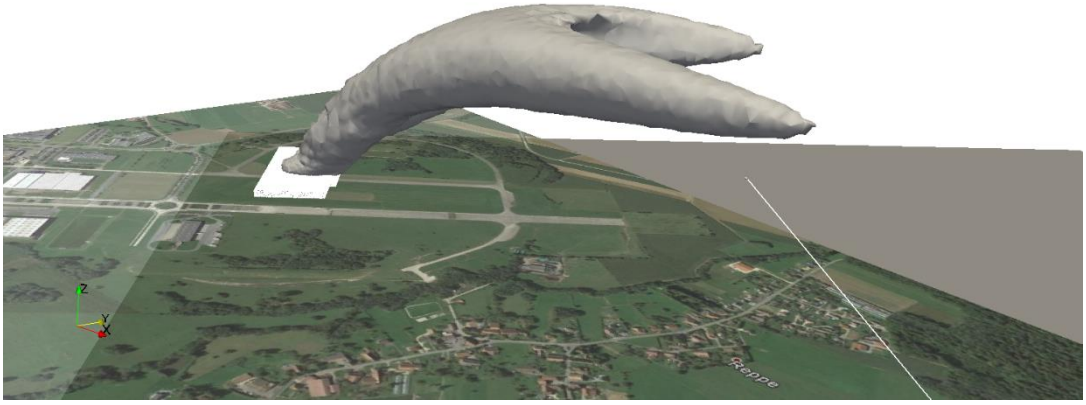
"Un seul métier, L'environnement Atmosphérique"

OCTOBRE 2019

SD ENVIRONNEMENT

Modélisation de la dispersion atmosphérique de fumées d'incendie sur le site de VAILOG à Fontaine (90150)



Références : Rapport ARIA/2019.052

Documents associés : -

Type de document : Rapport d'études
Avancement du document : Version 3
Accessibilité : Restreint

ARIA Technologies SA
8-10, rue de la Ferme – 92100 Boulogne Billancourt
Tél : +33 (0)1 46 08 68 60 – Fax : +33 (0)1 41 41 93 17 – E-mail : info@aria.fr
S.A au capital de 779 947 € - SIRET 379 180 474 00049 – Code APE 6201Z – RCS Nanterre B 379 180 474

ARIA Technologies	**Titre : Modélisation de la dispersion atmosphérique de fumées d'incendie sur le site de VAILOG à Fontaine (90150)**				
N° Action ARIA	2019.173				
N° Rapport ARIA	2019.052				
Nombre de pages	67	**Nombre de figures**	73	**Nombre d'annexes**	1
Auteur(s)	ARIA Technologies, Laurent Makke				
Sous-traitants	-				
Intérêt documentaire	Accessibilité	Confidentielle		Libre	
Oui	Non	ARIA Technologies		Restreinte	

Etat du document	Rédacteur Nom/ Visa/ Date	Vérificateur Nom/ Visa/ Date	Relecteur Nom/ Visa/ Date
Version V1	Laurent MAKKE 17/09/2019	-Maxime NIBART 17/09/2019	
Version V2	Laurent MAKKE 25/10/2019	Xiao WEI 25/10/2019	-
Version V3	Laurent MAKKE 28/10/2019	-	-

DIFFUSION INFORMATIQUE	Date	28/10/2019	Nombre total d'exemplaires édités	1
DESTINATAIRES	Nombre	DESTINATAIRES		Nombre
ARIA Technologies Archives	1	SD ENVIRONNEMENT		1

SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS **5**

1 INTRODUCTION **8**

2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR L'ETUDE DE DANGER **9**

2.1 LE TERME SOURCE 9
2.2 LES CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET ATMOSPHERIQUES 9
2.3 L'IMPACT SUR LES PERSONNES 10

3 LA MODELISATION DE LA DIPERSION DES FUMEES **10**

3.1 DONNEES DU SITE 11
3.2 DESCRIPTION DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES 13
3.3 CARACTERISTIQUES DU TERME SOURCE 16
3.3.1 Produits issus de la combustion *16*
3.3.2 Scénario 1 : Mal ventilé *17*
3.3.3 Scénario 2 : Bien ventilé. *18*
3.4 RECAPITULATIF DES CAS TRAITES 18
3.5 VALEURS TOXICOLOGIQUES RETENUES POUR LES SUBSTANCES DE FUMEES D'INCENDIE 19

4 PRESENTATION GENERALE DU LOGICIEL UTILISE **20**

5 PRESENTATION DES RESULTATS **21**

5.1 VISUALISATION DES CARTES DE CONCENTRATIONS AU SOL 21
5.1.1 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 1 ..... *21*
5.1.2 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 2 ..... *23*
5.1.3 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 3 ..... *25*
5.1.4 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 4 ..... *27*
5.1.5 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 5 ..... *29*
5.1.6 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 6 ..... *31*
5.2 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN CO AU SOL 33
5.3 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN CO SUR LE DOMAINE 33
5.4 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCL AU SOL 34
5.5 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCL SUR LE DOMAINE 36
5.6 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCN AU SOL 37
5.7 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCN SUR LE DOMAINE 39
5.8 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN NO2 AU SOL 39
5.9 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN NO2 SUR LE DOMAINE 41
5.10 VISUALISATION DES SEUILS TOXICOLOGIQUES 41
5.10.1 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 1 ..... *42*
5.10.2 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 2 ..... *44*
5.10.3 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 3 ..... *46*
5.10.4 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 4 ..... *48*
5.10.5 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 5 ..... *50*
5.10.6 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 6 ..... *52*
5.11 DETERMINATION DE LA DISTANCE DE DANGER 54

6 SYNTHESE DE L'ETUDE **62**

7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 63

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU CODE_SATURNE 64

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Représentation schématique de la méthodologie de l'étude de dispersion de fumées issues d'incendie ; Figure issue de [1] 9
Figure 2 : Site de VAILOG 11
Figure 3 : Domaine de Calcul 12
Figure 4 : Bâtiments pris en compte dans l'étude et maillage 12
Figure 5 : Direction du vent pénalisante pour l'étude 14
Figure 6 : Profils verticaux de vent et de température 15
Figure 7 : Concentration de CO au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 21
Figure 8 : Concentration de HCL au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 21
Figure 9 : Concentration de HCN au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 22
Figure 10 : Concentration de NO2 au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 22
Figure 11 : Concentration de CO au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 23
Figure 12 : Concentration de HCL au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 23
Figure 13 : Concentration de HCN au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 24
Figure 14 : Concentration de NO2 au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 24
Figure 15 : Concentration de CO au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D. 25
Figure 16 : Concentration de HCL au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D 25
Figure 17 : Concentration de HCN au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D 26
Figure 18 : Concentration de NO2 au sol (1m) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D 26
Figure 19 : Concentration de CO au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F 27
Figure 20: Concentration de HCL au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F 27
Figure 21: Concentration de HCN au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F 28
Figure 22: Concentration de NO2 au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F28
Figure 23 : Concentration de CO au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 29
Figure 24 : Concentration de HCL au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 29
Figure 25 : Concentration de HCN au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 30
Figure 26 : Concentration de NO2 au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 30
Figure 27 : Concentration de CO au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 31
Figure 28 : Concentration de HCL au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 31
Figure 29 : Concentration de HCN au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 32
Figure 30 : Concentration de NO2 au sol (1m) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 32
Figure 31 : Carte de concentration de HCL > 60 mg/m3 – Cas 4 35
Figure 32 : Carte de concentration de HCL > 60 mg/m3 – Cas 6 35
Figure 33 : Carte de concentration de HCN > 45 mg/m3 – Cas 4 38
Figure 34 : Carte de concentration de HCN > 45 mg/m3 – Cas 6 38

Figure 35 : Carte de concentration de NO2 > 75 mg/m3 – Cas 4 40
Figure 36 : Carte de concentration de NO2 > 75 mg/m3 – Cas 6 40
Figure 37 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 42
Figure 38 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 42
Figure 39 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 43
Figure 40 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 3F 43
Figure 41 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 44
Figure 42 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 44
Figure 43 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 45
Figure 44 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 5D 45
Figure 45 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D 46
Figure 46 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D 46
Figure 47 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D 47
Figure 48 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie débutant mal ventilé – Météo 10D 47
Figure 49 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F 48
Figure 50 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert)) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F 48
Figure 51 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F 49
Figure 52 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert)) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F 49
Figure 53 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 50
Figure 54 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 50
Figure 55 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 51
Figure 56 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D 51
Figure 57 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 52
Figure 58 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 52
Figure 59 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 53
Figure 60 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D 53

Figure 61 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F – Zoom 55
Figure 62 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D – Zoom 55
Figure 63 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D – Zoom 56
Figure 64 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé mal ventilé – Météo 3F – Zoom 56
Figure 65 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F – Zoom 57
Figure 66 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D – Zoom 57
Figure 67 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D – Zoom 58
Figure 68 : Isosurface d'HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F – Zoom 58
Figure 69 : Isosurface d'HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D – Zoom 59
Figure 70 : Isosurface d'HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D – Zoom 59
Figure 71 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 3F – Zoom 60
Figure 72 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 5D – Zoom 60
Figure 73 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – Incendie généralisé bien ventilé – Météo 10D – Zoom 61

1 INTRODUCTION

La société SD ENVIRONNEMENT souhaite compléter ses études réglementaires pour son client VAILOG par une étude de danger sur le risque incendie.

La société SD ENVIRONNEMENT a chargé ARIA Technologies de réaliser l'étude de danger sur la dispersion atmosphérique des fumées émises par différents scénarii d'incendie sur le site de VAILOG à Fontaine (90150)

L'objectif de cette étude est de déterminer la dispersion atmosphérique des fumées toxiques émises par 2 scénarii d'incendie.

Pour chacun de ces scénarii, trois conditions météorologiques de dispersion des fumées seront étudiées :

- une situation avec un vent fort et une atmosphère neutre entrainant un rabattement de panache près du sol ;
- une situation avec un vent moyen et une atmosphère neutre simulant les conditions météorologiques les plus courantes ;
- une situation avec un vent faible et une atmosphère très stable, entrainant une mauvaise dispersion.

La démarche retenue s'appuie d'une part sur la méthodologie de caractérisation du terme source de l'INERIS [1] et d'autre part, sur l'utilisation d'un modèle numérique 3D. Les simulations permettent le calcul des grandeurs thermodynamiques et des distributions spatiales des polluants.

Le code de calcul utilisé est le Code_Saturne développé par EDF R&D et intégré dans la plateforme ARIA Local. Il s'agit d'un code eulérien de mécanique des fluides 3D qui résout numériquement les équations de Navier-Stockes.

2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE POUR L'ETUDE DE DANGER

La simulation de la dispersion des fumées d'incendie et leur impact s'articulent autour de la connaissance du terme source, des conditions météorologiques et atmosphériques dans lequelles s'effectue la dispersion et de la toxicité des produits sur les personnes (Figure 1).

2.1 LE TERME SOURCE

Dans le cadre des études de danger d'incendie d'entrepôt (par exemple), il est important de rassembler toutes les informations concernant la nature et la quantité de combustible stocké. Cette information permet de déterminer, le bilan molaire et massique des composés chimiques et de calculer, à partir des hypothèses sur la nature du foyer (incendie bien ventilé ou mal ventilé), les caractéristiques thermo-cinétiques et physico-chimiques du terme source à savoir :

- Le débit de fumée (air + polluants)
- La fraction massique des polluants dans le mélange
- La puissance convective

Le modèle utilisé étant un code CFD (Mécanique des Fluides Numériques), la hauteur des émissions et la vitesse d'émissions sont résolues directement par le code de calcul de manière déterministe et non paramétrique. Le terme source se restreint donc à la connaissance des 3 items listés ci-dessus.

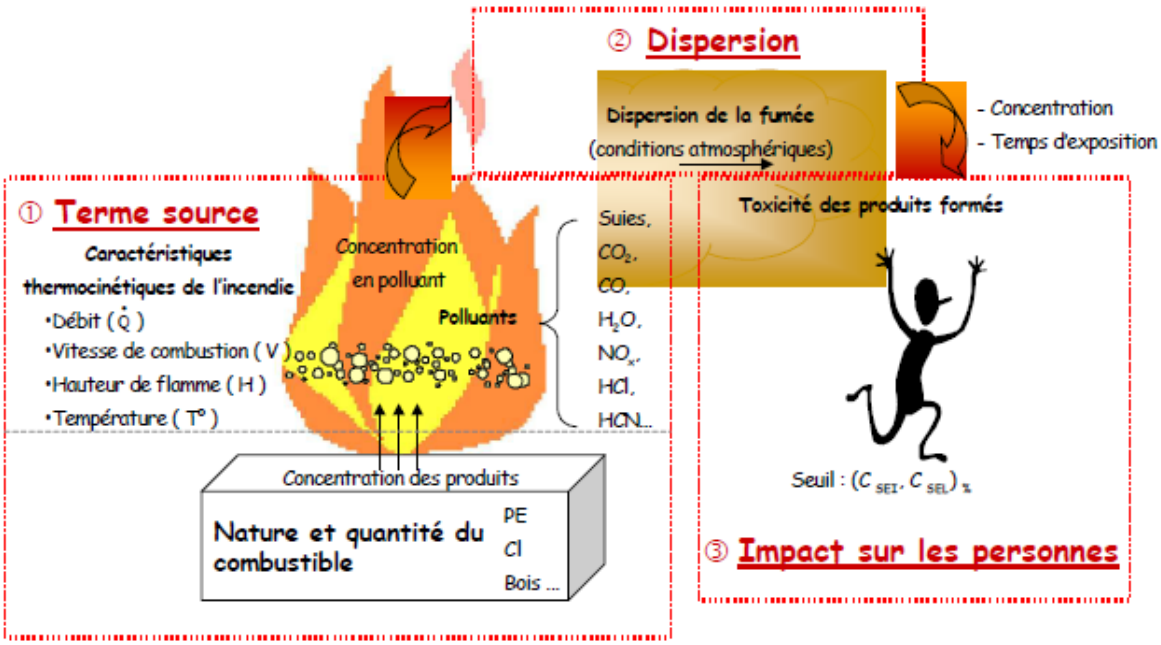


Figure 1 : Représentation schématique de la méthodologie de l'étude de dispersion de fumées issues d'incendie ; Figure issue de [1]

2.2 LES CONDITIONS METEOROLOGIQUES ET ATMOSPHERIQUES

Deux mécanismes sont prépondérants dans la dispersion des polluants atmosphériques :

- le transport du polluant par le vent (influence des obstacles et des conditions météorologiques) ;
- la diffusion du polluant par la turbulence thermique et mécanique.

La stabilité de l'atmosphère est destinée à quantifier les propriétés diffuses de l'air dans les basses couches. Elle est souvent associée à la structure thermique de l'atmosphère : par exemple, l'atmosphère est stable et très peu diffusive lors des situations d'inversion thermique.

Elle peut être déterminée à partir des données de nébulosité et de vent et être classifiée six catégories, dites « classes de Pasquill » :

- classe A : très instable
- classe B : instable
- classe C : légèrement instable
- classe D : neutre
- classe E : stable
- classe F : très stable

Dans le cadre des études de danger pour des incendies, 3 conditions météorogologiques sont typiquement étudiées :

- 3F : Classe de stabilité F avec un vent de 3 m/s à 10m, condition défavorable à la dispersion.
- 5D : Classe de stabilité D avec un vent de 5 m/s à 10m, condition de dispersion la plus courante,
- 10D : Classe de stabilité D avec un vent de 10 m/s à 10m, condition de vent fort favorisant le rabattement du panache vers le sol.

2.3 L'IMPACT SUR LES PERSONNES

Le choix des conditions atmosphériques pour la simulation de la dispersion des fumées a été conditionné par leur impact sur le voisinage et les personnes. Le mode d'exposition aux fumées est l'inhalation. Pour les installations classées figurant sur la liste prévue au IV de l'article L. 515-8 du code de l'environnement, la délimitation des différentes zones de dangers pour la vie humaine mentionnées à l'article L. 515-16 du code de l'environnement correspond aux seuils d'effets de référence suivants :

- les seuils des effets irréversibles (SEI) délimitent la zone des dangers sigificatifs pour la vie humaine ;
- les seuils des premiers seffets létaux (SPEL) correspondant à une concentration létale de 1 % délimitent la zone des dangers graves pour la vie humaine ;
- les seuils des effets létaux significatifs (SELS) correspondant à une concentration létale 5 % délimitent la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

3 LA MODELISATION DE LA DIPERSION DES FUMEES

Les principales données nécessaires à la modélisation de rejets dans l'atmosphère concernent :

- les données d'émission ou caractéristiques de l'incendie ;
- les conditions météorologiques ;
- le site.

3.1 DONNEES DU SITE

Le domaine est choisi de façon :

- **à contenir le site ;**
- **à être suffisamment grand pour représenter correctement le panache des fumées et prendre en compte les premières habitations.**

Le nombre de mailles est de 1.39 millions cellules. Le maillage choisi est un maillage non structuré, discrétisant l'espace en tétraèdres, allant de 1 à 20 m de côté.

Le domaine représente une boîte de 1000 m de haut, 4000 m de côtés.

Le bâtiment de l'entrepôt a été pris en compte.

Figure 2 : Site de VAILOG

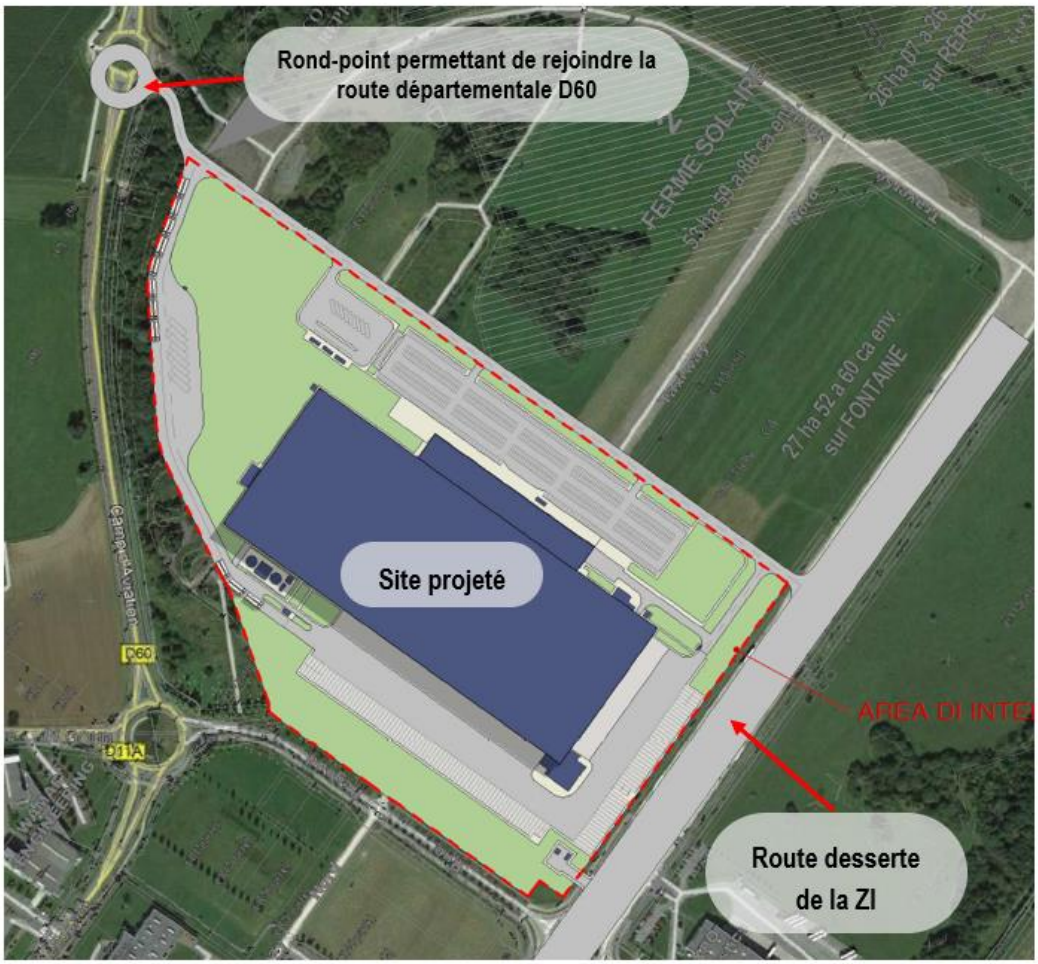


Figure 3 : Domaine de Calcul

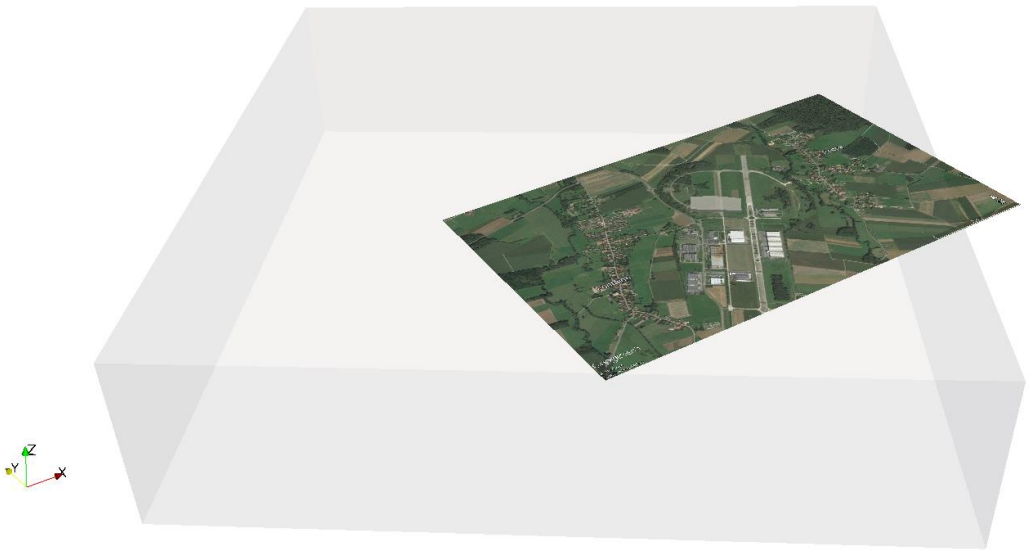
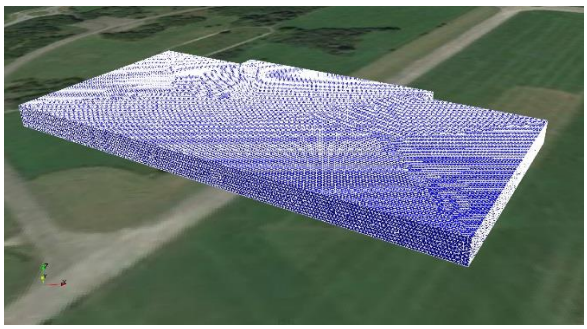
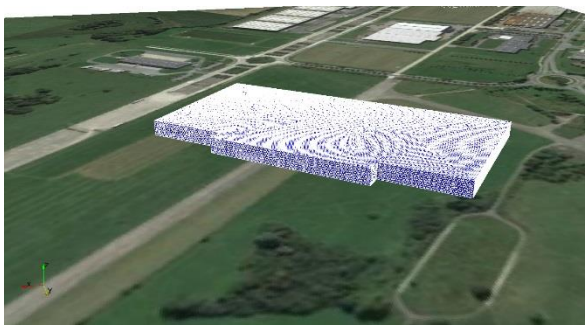


Figure 4 : Bâtiments pris en compte dans l'étude et maillage





3.2 DESCRIPTION DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Les paramètres météorologiques significatifs pour l'étude de la géométrie de panaches et leur dispersion dans l'atmosphère sont :

1. la vitesse du vent ;
2. la température extérieure ;
3. la stabilité atmosphérique.

La stabilité atmosphérique est destinée à quantifier les propriétés diffusives de l'air dans les basses couches, et conduit à distinguer 6 catégories de stabilité de l'atmosphère :

- Classe A : très fortement instable ;
- Classe B : très instable ;
- Classe C : instable ;
- Classe D : neutre ;
- Classe E : stable ;
- Classe F : très stable.

Ces paramètres sont variables dans le temps et dans l'espace. Ils résultent de la superposition de phénomènes atmosphériques à grande échelle (régime cyclonique ou anticyclonique) et de phénomènes locaux (influence de la rugosité, de l'occupation des sols et de la topographie).

Pour la présente étude, trois situations météorologiques ont été retenues. Elles sont caractérisées par :

situation n°1 :

- **atmosphère très stable** (classe F de Pasquill) ;
- vent faible de vitesse **3 m/s** ;
- température de l'air égale à **8°C**.

situation n°2 :

- **atmosphère neutre** (classe D de Pasquill) ;
- vent fort de vitesse **5 m/s** : situation météorologique la plus courante.
- température de l'air égale à **11°C**.

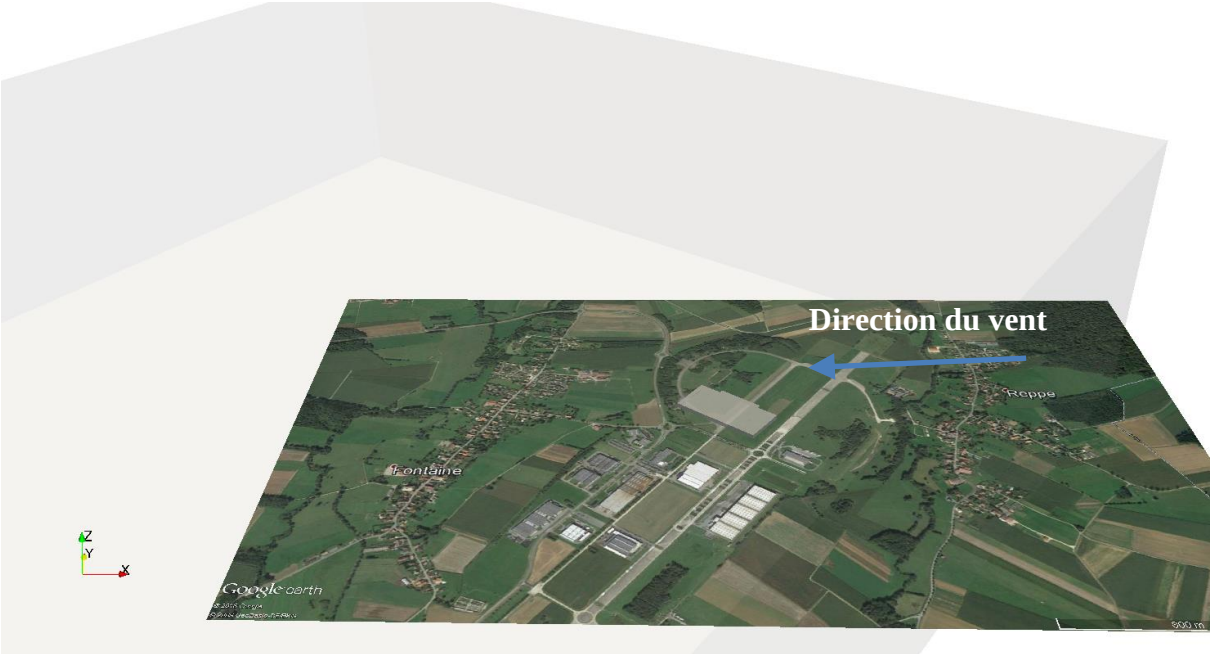
situation n°3 :

- **atmosphère neutre** (classe D de Pasquill) ;
- vent fort de vitesse **10 m/s** : les vents forts ont pour effet de « rabattre » le panache près du sol ;
- température de l'air égale à **11°C**.

La situation n°1 peut être considérée comme pénalisante pour les feux à fortes puissances thermiques, de même, la situation n°3 est pénalisante pour les débuts d'incendies et les feux de faible puissance.

La direction du vent, **90°**, a été choisie en fonction des deux directions dominantes de la rose des vents de la station Météo-France de Belfort-Dorans (située à 16.25 km du site) afin de minimiser la distance entre le foyer de l'incendie et la commune de Reppe (la plus proche).

Figure 5 : Direction du vent pénalisante pour l'étude

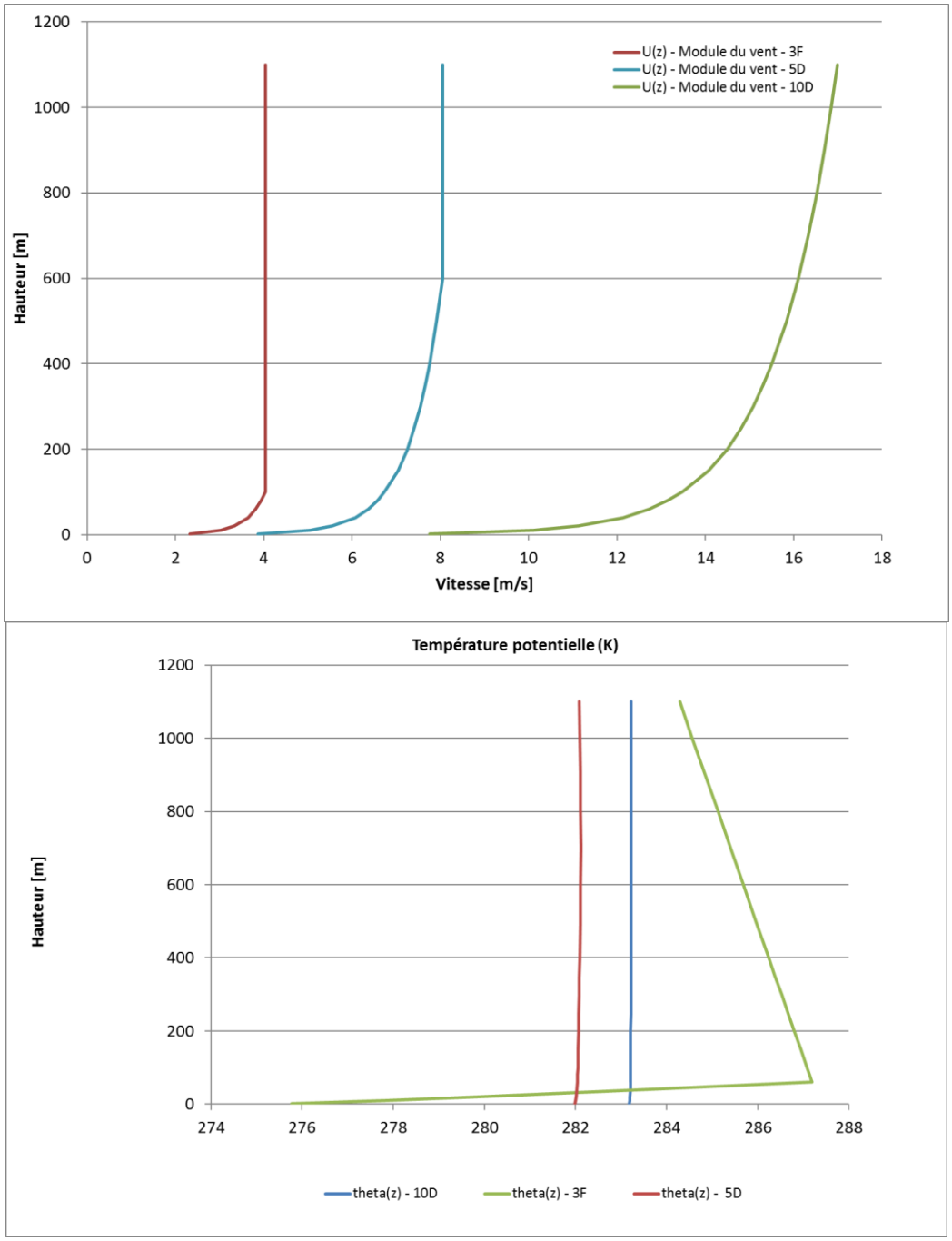


Notons que les distances trouvées pour cette direction peuvent raisonnablement être aussi utilisées pour d'autres directions du vent (tout autre paramètre identique), vu l'absence de topographie marquée ou d'obstacles importants autour du site.

Pour tenir compte de la structure verticale de l'atmosphère, nous avons pris des profils de couches limites calculés à partir des formules de Gryning.

Les profils verticaux de vents et de températures pour chacun des cas sont présentés sur la Figure 6.

Figure 6 : Profils verticaux de vent et de température



3.3 CARACTERISTIQUES DU TERME SOURCE

Pour le cas du site de VAILOG situé à Fontaine (90150), deux scénarii ont été retenus :

- Scénario 1 : incendie débutant associé à un foyer mal ventilé ;
- Scénario 2 : incendie généralisé associé à un foyer bien ventilé ;

3.3.1 Produits issus de la combustion

Les matières stockées et les principaux gaz toxiques susceptibles de se dégager lors de la combustion de ces produits sont :

Matières impliquées dans l'incendie	Eléments constitutifs principaux	Principaux gaz de combustion toxiques susceptibles de se dégager
Bois- Papier-Carton	C, H, O	CO2, CO
Polyuréthane	C, H,N	CO2, CO, HCN, NO2
Polychlorure de vinyle (PVC)	C, H, Cl	CO2, CO, HCl

On réalise un bilan atomique pour déterminer les taux de productions des gaz toxiques en considérant la répartition des matières suivante :

Matières impliquées dans l'incendie	% massique	%C	%H	%O	%Cl	%N
Bois-Papier-Carton	50.00%	44.40%	6.20%	49.40%	-	-
Polyuréthane	25.00%	40.45%	7.87%	35.96%	-	15.73%
Polychlorure de vinyle	25.00%	38.40%	4.80%	-	56.80%	-

Les hypothèses concernant le rapport de mélange entre le CO et le CO2 dans les fumées sont ([1] et [4]) :

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
CO, CO2	100% C => CO + CO2 [CO]/[CO2] = 5 kg/kg =	100% C => CO + CO2 [CO]/[CO2] = 10 kg/kg
HCL	100% Cl => HCl	100% Cl => HCl
HCN, NO2	100%N => 40% (NO2 + HCN) + 60% N2	100%N => 40% (NO2 + HCN) + 60% N2

Les taux de production massique de gaz toxiques par kilogramme de produit brulé sont alors :

	Incendie débutant mal ventilé	Incendie généralisé bien ventilé
CO (kg/kg)	0.0040	0.0015
CO2 (kg/kg)	0.0200	0.0238
HCl (kg/kg)	0.00242	0.00242
HCN	0.00026	0.00026
NO2	0.00044	0.00044

3.3.2 Scénario 1 : Mal ventilé

Les caractéristiques du terme source du scénario 1 sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques du scénario 1 – Incendie débutant, feu mal ventilé

Paramètre	Unité	Feu mal ventilé
Surface au sol de l'incendie	m²	3808
Puissance thermique de l'incendie – Totale	MW	503
Puissance thermique de l'incendie – Partie convective	MW	327
Durée de l'incendie	s	Stationnaire
Débit des fumées (air entraîné et polluants)	kg/s	1565.9
CO (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00396
CO2 (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.01993
HCl (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00242
HCN (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00026
NO2 (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00044

3.3.3 Scénario 2 : Bien ventilé.

Tableau 2 : Caractéristiques du scénario 2 – Incendie généralisé, feu bien ventilé

Paramètre	Unité	Feu bien ventilé
Surface de l'incendie	m²	38080
Puissance thermique de l'incendie – Totale	MW	12205
Puissance thermique de l'incendie – Partie convective	MW	7933
Durée de l'incendie	s	Stationnaire
Débit des fumées (air entraîné et polluants)	kg/s	38030.2
CO (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00151
CO2 (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.02378
HCl (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00242
HCN (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00026
NO2 (fraction massique dans les fumées)	kg/kg	0.00044

3.4 RECAPITULATIF DES CAS TRAITES

Les différents cas traités sont résumés dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Tableau récapitulatif des cas traités

Scenarii	Cas	Situation météorologique
Incendie débutant	1	**3F** *(atmosphère très stable)*
	2	**5D** *(atmosphère neutre)*
	3	**10D** *(atmosphère neutre)*
Incendie généralisé	4	**3F** *(atmosphère très stable)*
	5	**5D** *(atmosphère neutre)*
	6	**10D** *(atmosphère neutre)*
	TOTAL	**6 cas**

3.5 VALEURS TOXICOLOGIQUES RETENUES POUR LES SUBSTANCES DE FUMEES D'INCENDIE

Les concentrations obtenues par simulation sont comparées à des seuils de référence : SPEL (Seuil des Premiers Effets Létaux), SEI (Seuil des Effets Irréversibles) et SELS (Seuil des Effets Létaux Significatifs). Les durées d'exposition retenues sont de 60 minutes pour le monoxyde de carbone, pour l'acide chlorhydrique, pour l'acide cyanhydrique et le monoxyde d'azote.

Tableau 4 – Seuils des effets irréversibles et létaux

Substance	Unité	CO	HCl	HCN	NO2
SELS[1] 60 min	mg/m^3	-	565 *(1)*	69 *(3)*	137 *(4)*
SPEL 60 min	mg/m^3	3 680	358 *(1)*	45 *(3)*	132 *(4)*
SEI 60 min	mg/m^3	920	60 *(1)*	-	75 *(4)*

(1) Fiche « Acide chlorhydrique » INERIS, consultation avril 2015
(2) Fiche « Monoxyde de carbone » INERIS, consultation avril 2015
(3) Fiche « Acide Cyanhydrique » INERIS, consultation avril 2015
(4) Fiche « Dioxyde d'Azote » INERIS, consultation avril 2015

[1] SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs

4 PRESENTATION GENERALE DU LOGICIEL UTILISE

ARIA Local, développé et maintenu par ARIA Technologies, s'appuie sur le solveur Code_Saturne, code complet de mécanique des fluides utilisé pour la simulation numérique de la dispersion de polluants dans l'environnement atmosphérique à petite échelle.

Développé depuis 1997 par la Division Recherche et Développement d'EDF/Laboratoire National d'Hydraulique, Code_Saturne est basé sur une approche en volumes finis co-localisés qui accepte des maillages de tout type (structuré, structuré par bloc, non structuré, hybride, conforme, non conforme, ...) et contenant tout type d'élément (tétraèdre, hexaèdre, pyramide, polyèdre quelconque, ...).

Code_Saturne a notamment été validé lors d'expérimentations in situ comme celle décrite ci-dessous :

- ✓ Étude de l'influence de la stratification atmosphérique dans la dispersion des polluants avec un logiciel de mécanique des fluides numérique : Prairie Grass (Etats-Unis) ;
- ✓ Étude de l'influence de la modélisation sur les résultats de simulations numériques (projet EMU : Evaluation of Modeling Uncertainties) ;
- ✓ Expérience MUST (Mock Urban Setting Test) réalisé par le WDTC (West Desert Center) en 2001 ;
- ✓ Expérience de Wangara en Australie (Clarke and al., 1971).

Une description détaillée du code de calcul Code_Saturne est fournie en Annexe 1.

5 PRESENTATION DES RESULTATS

Pour chaque simulation, les résultats sont représentés sous la forme de :

- **une carte de concentration au sol pour chacun des polluants.**
- **une vue 3D de côté et de dessus permettant de visualiser le panache, présentée sous forme d'isosurfaces de concentration ;**

5.1 VISUALISATION DES CARTES DE CONCENTRATIONS AU SOL

5.1.1 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 1

*Figure 7 : Concentration de CO au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*

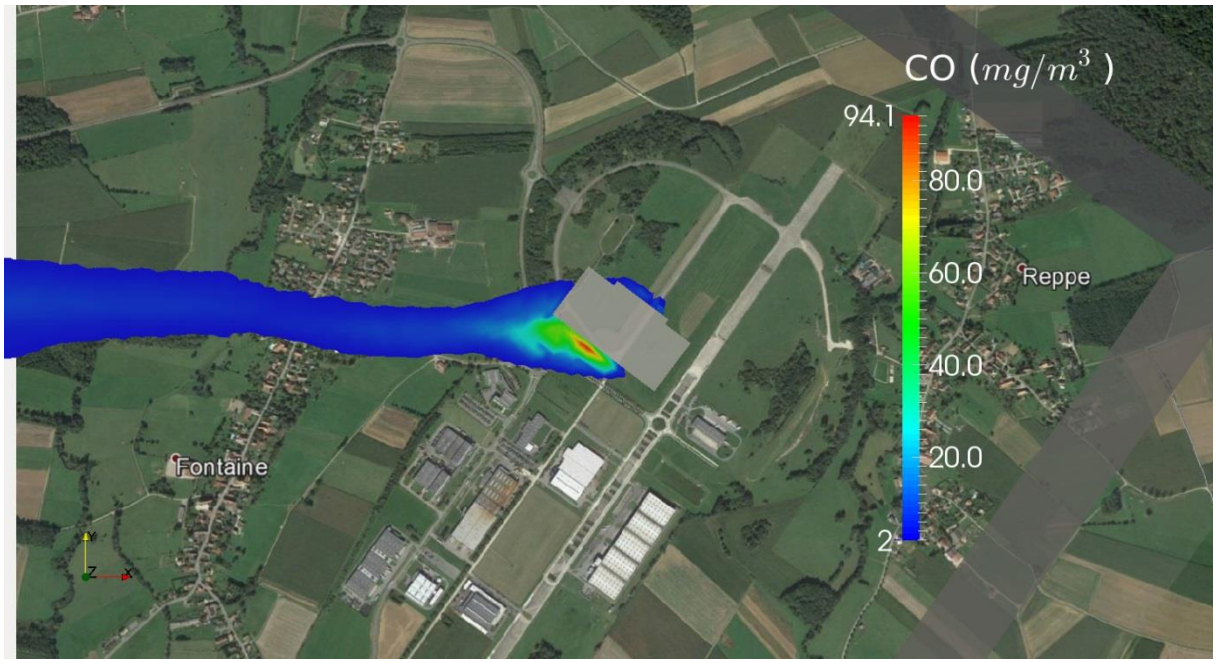


*Figure 8 : Concentration de HCL au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*

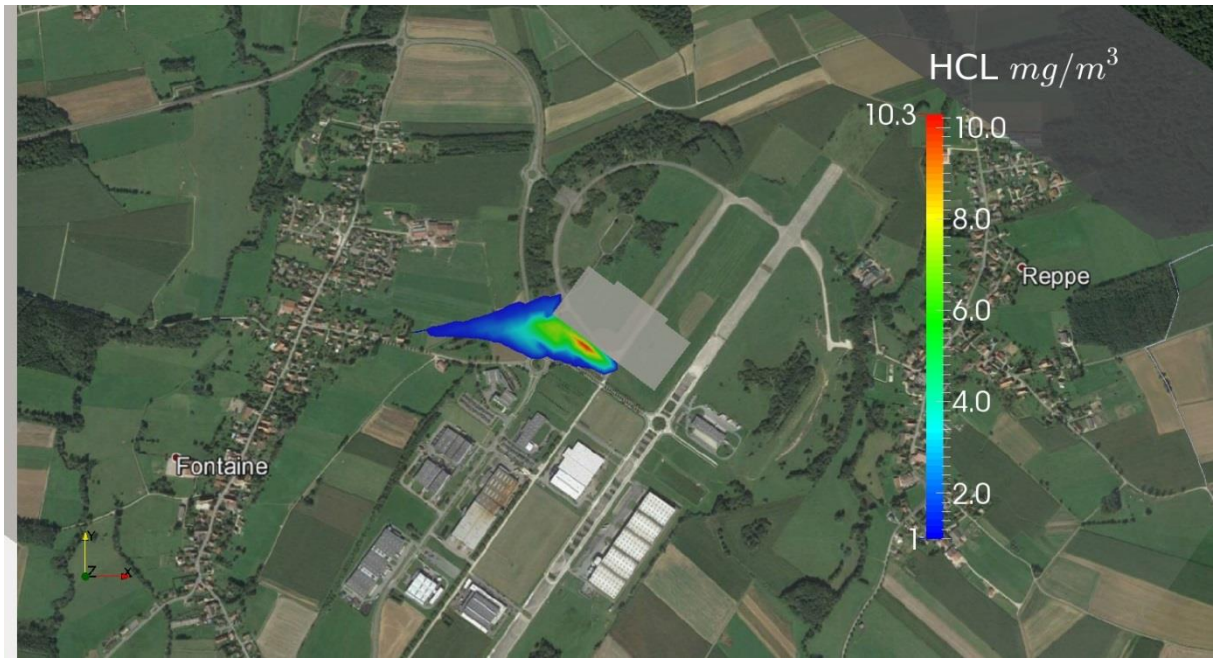


*Figure 9 : Concentration de HCN au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*

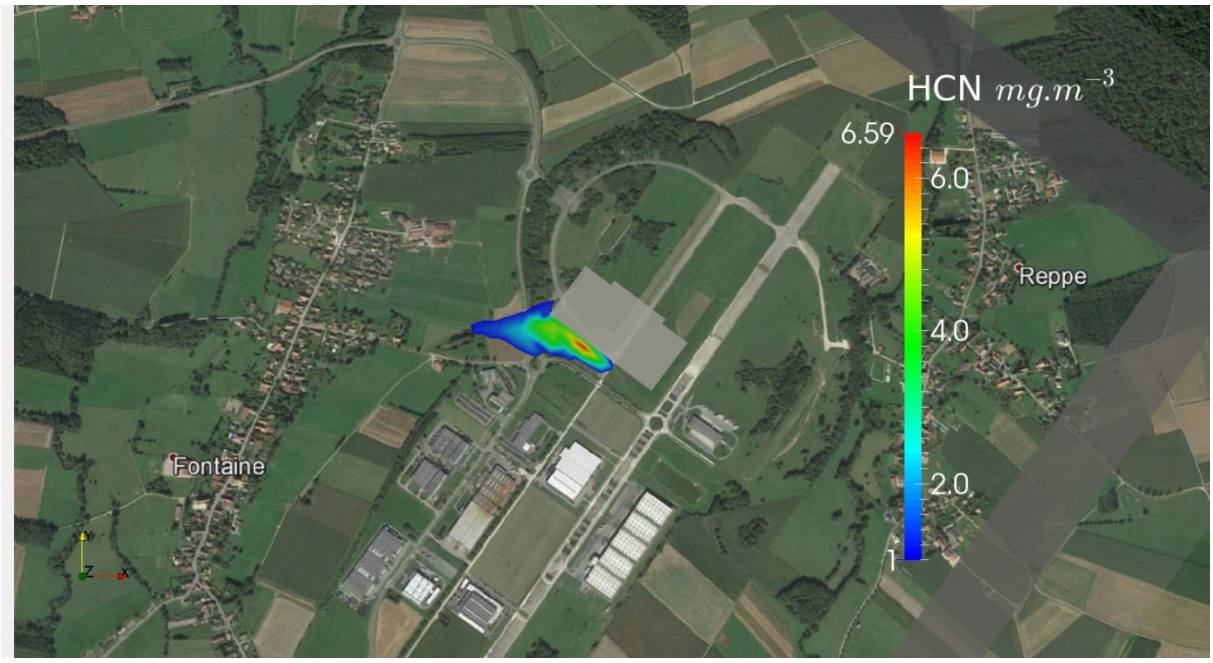
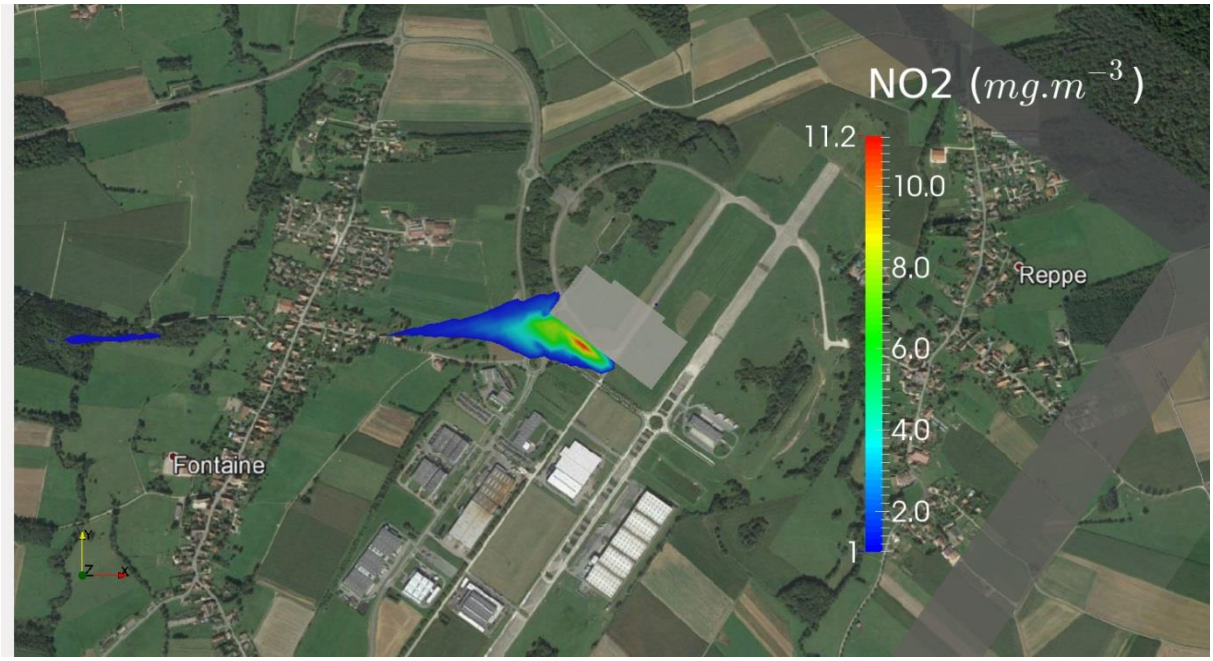


*Figure 10 : Concentration de NO2 au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*



5.1.2 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 2

*Figure 11 : Concentration de CO au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*

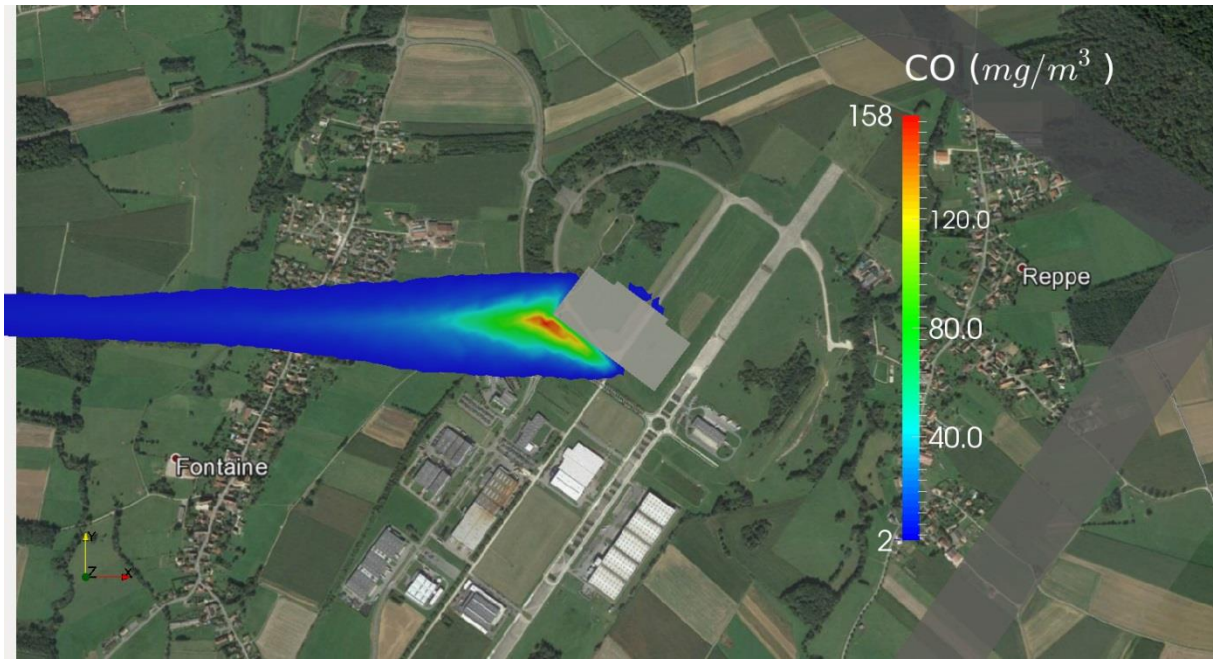


*Figure 12 : Concentration de HCL au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*

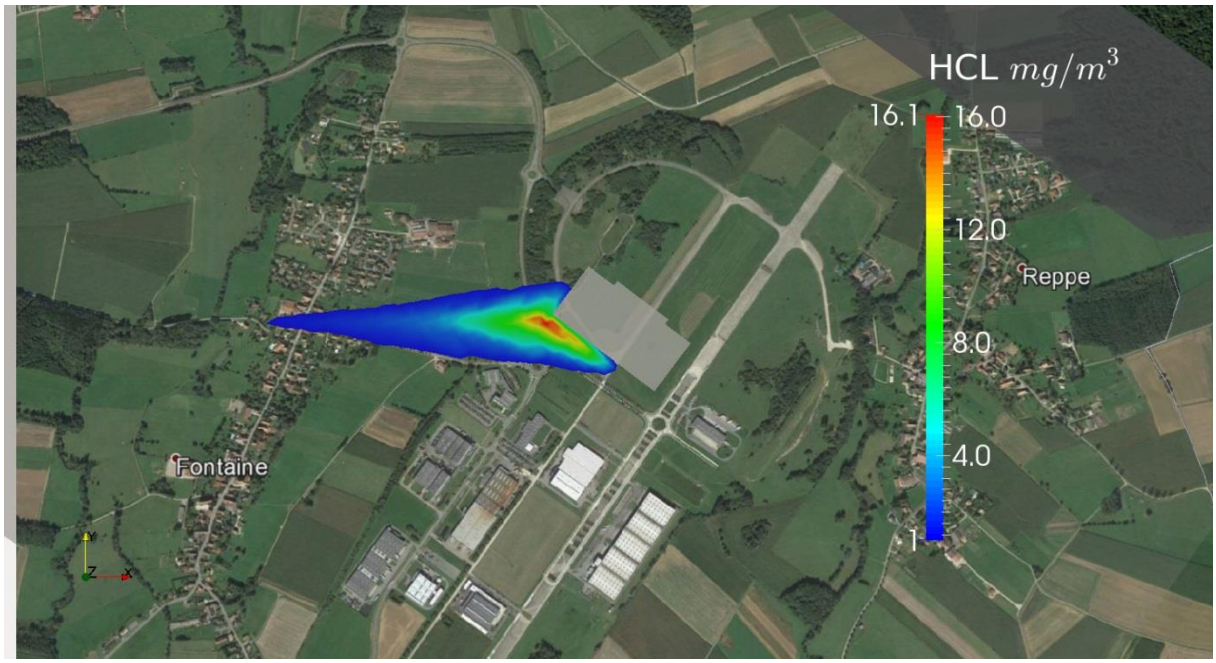


*Figure 13 : Concentration de HCN au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*

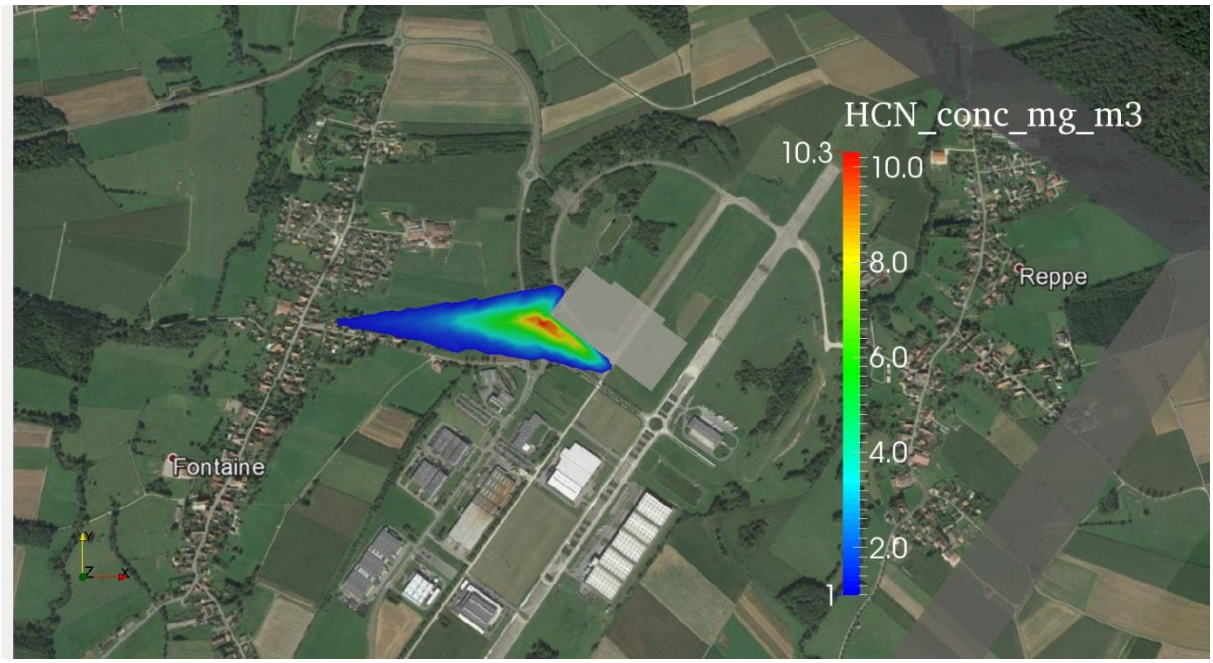
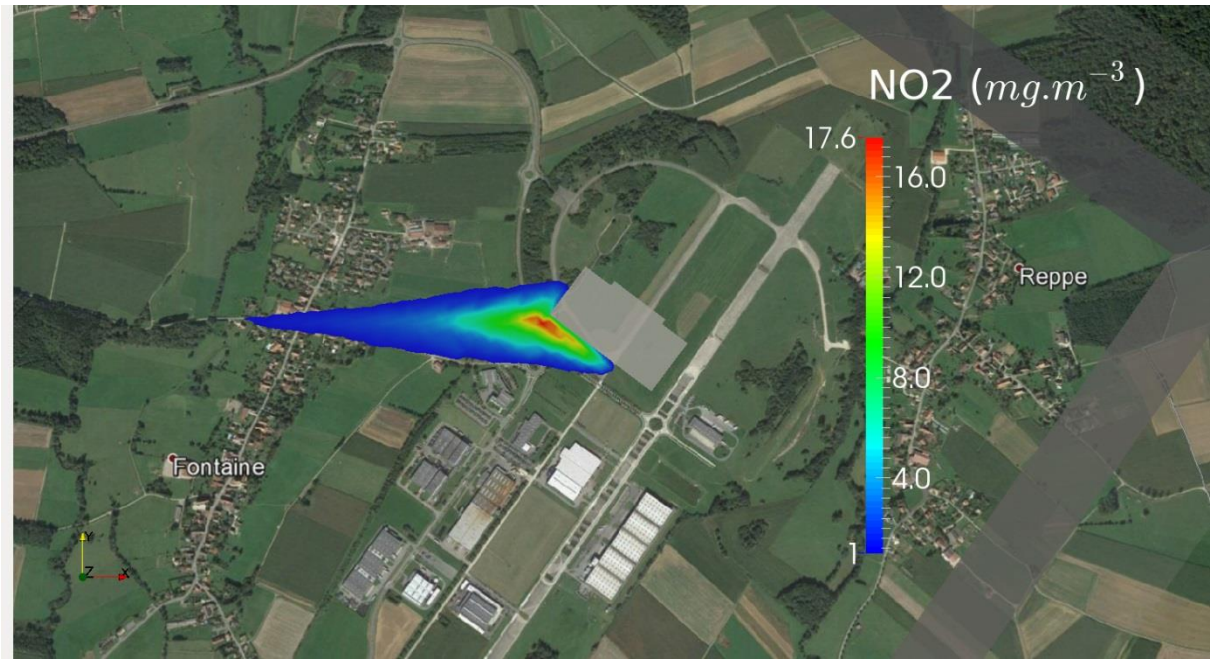


*Figure 14 : Concentration de NO2 au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*



5.1.3 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 3

*Figure 15 : Concentration de CO au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*

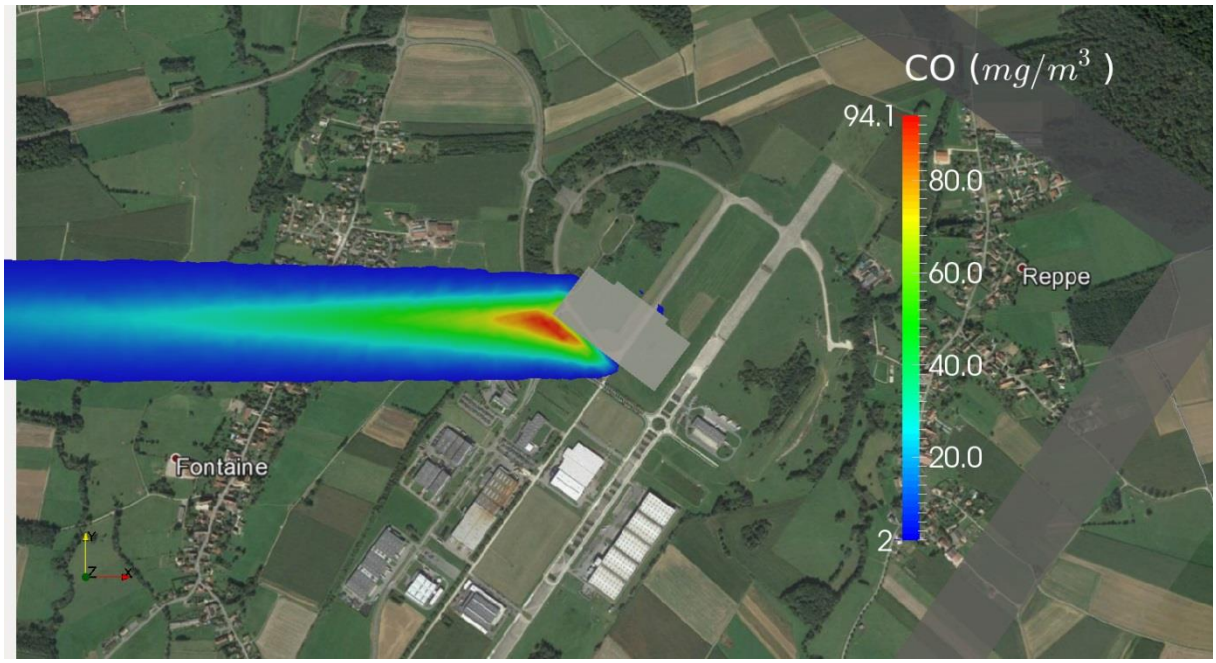


*Figure 16 : Concentration de HCL au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*

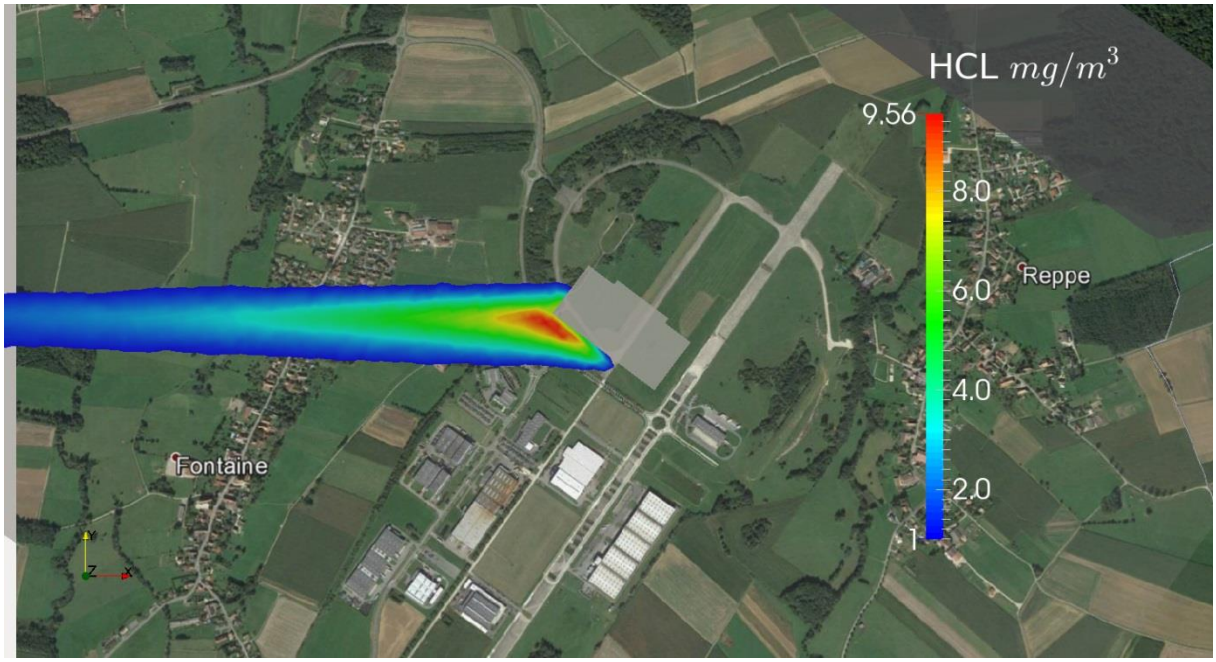


*Figure 17 : Concentration de HCN au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*

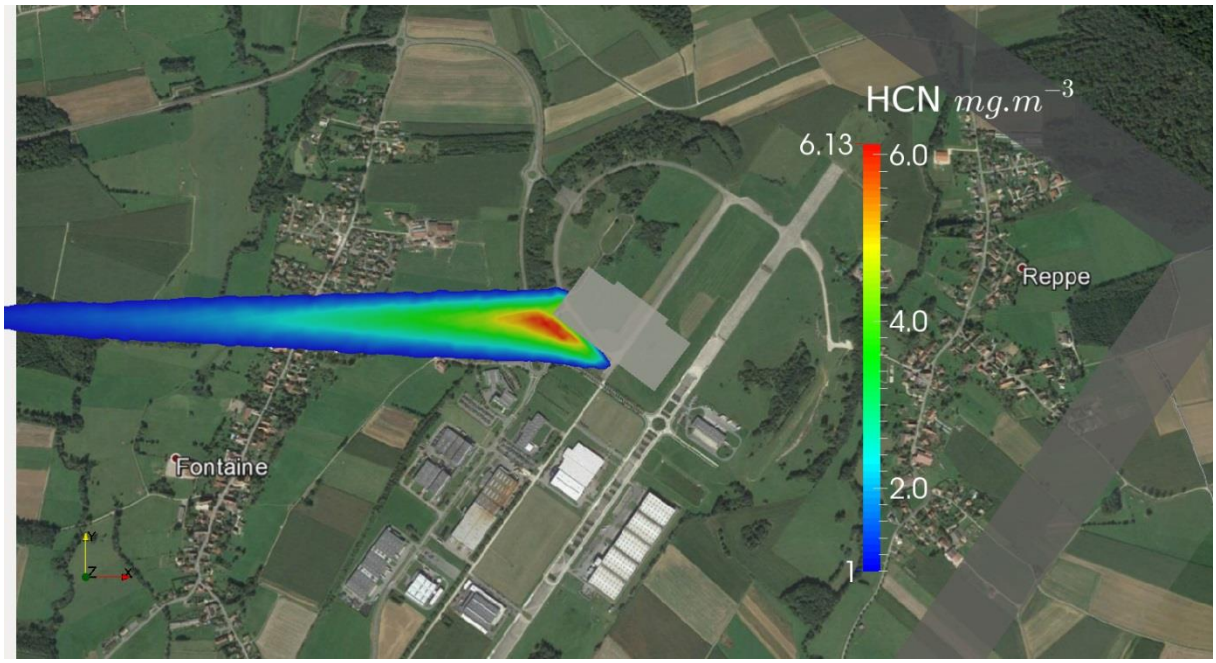
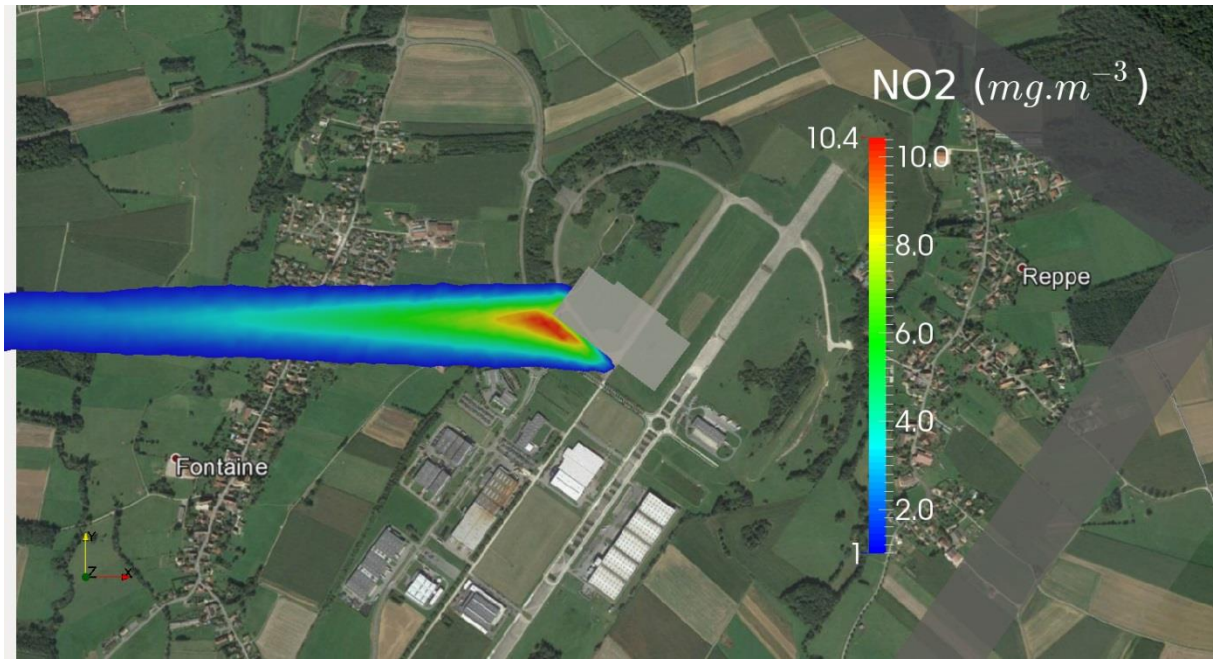


*Figure 18 : Concentration de NO2 au sol (1m) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*



5.1.4 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 4

*Figure 19 : Concentration de CO au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*

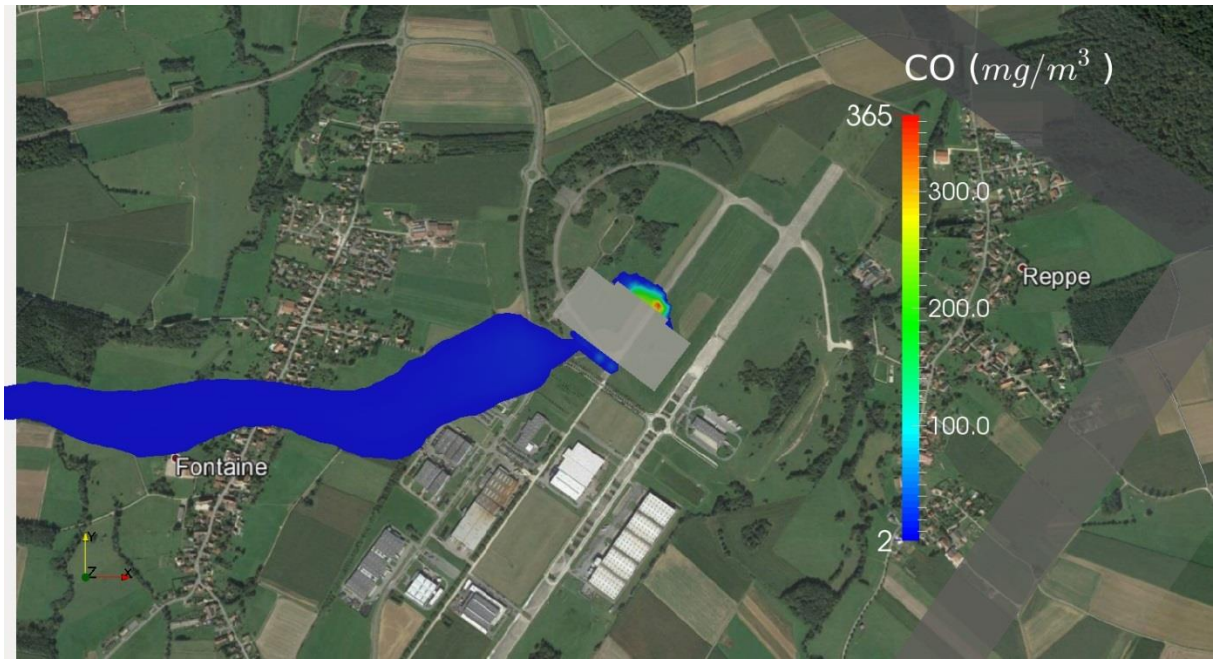


*Figure 20: Concentration de HCL au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*

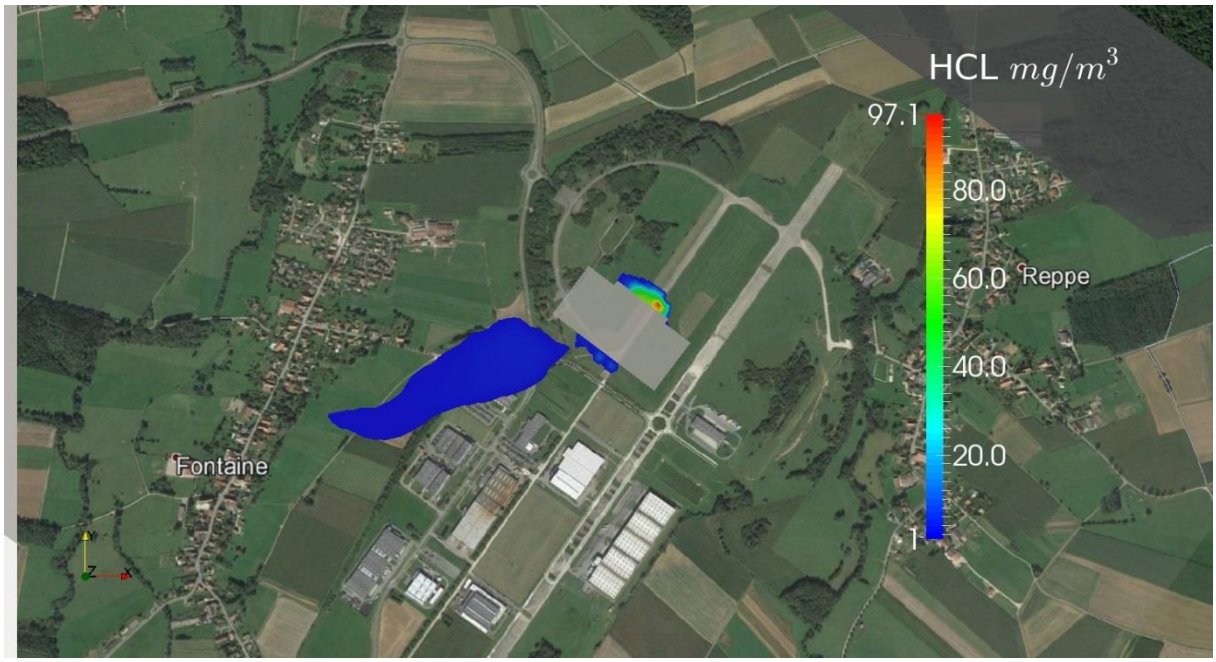


*Figure 21: Concentration de HCN au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*

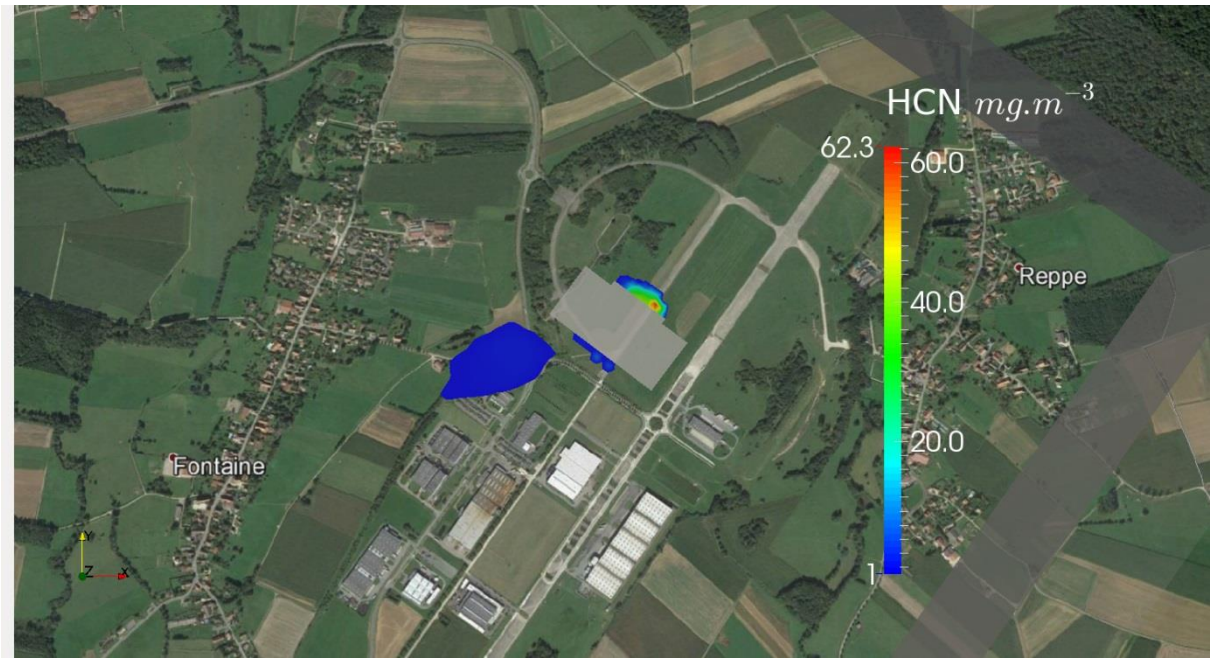
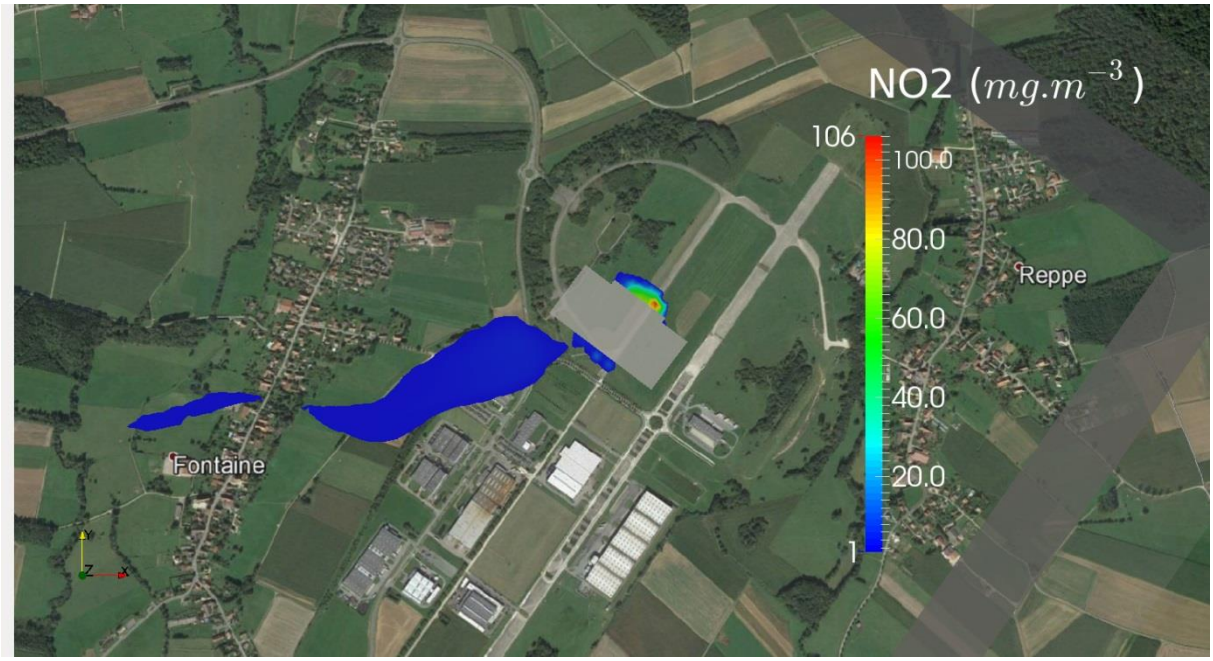


*Figure 22: Concentration de NO2 au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*



5.1.5 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 5

*Figure 23 : Concentration de CO au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*

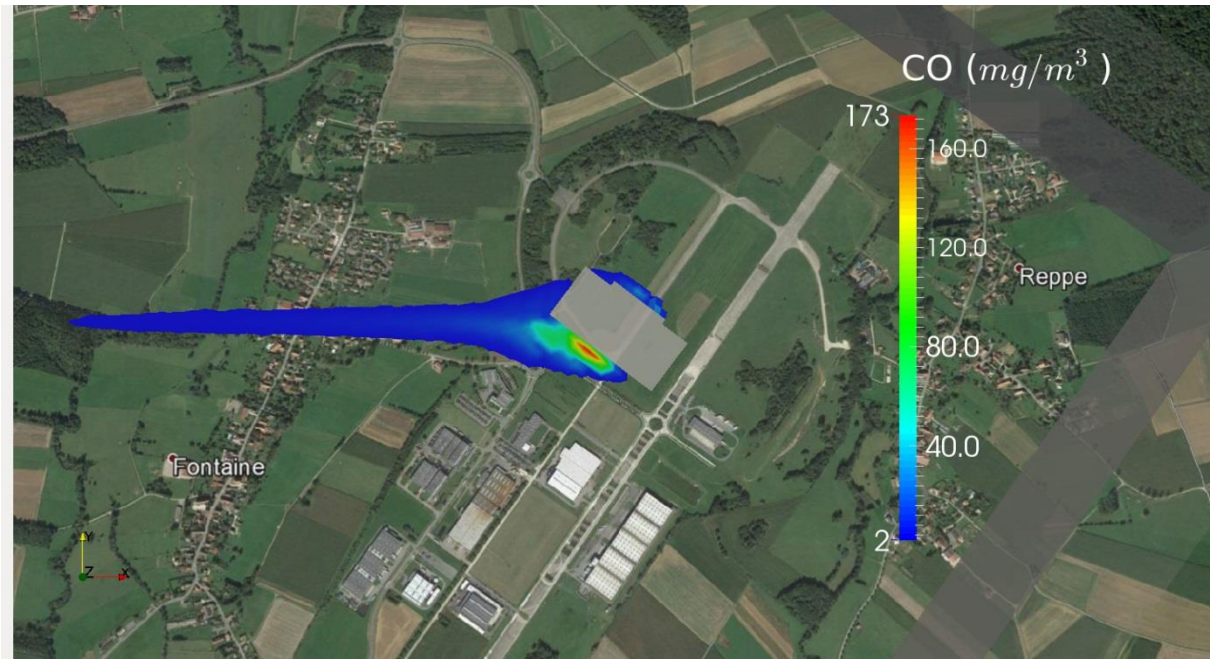


*Figure 24 : Concentration de HCL au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*

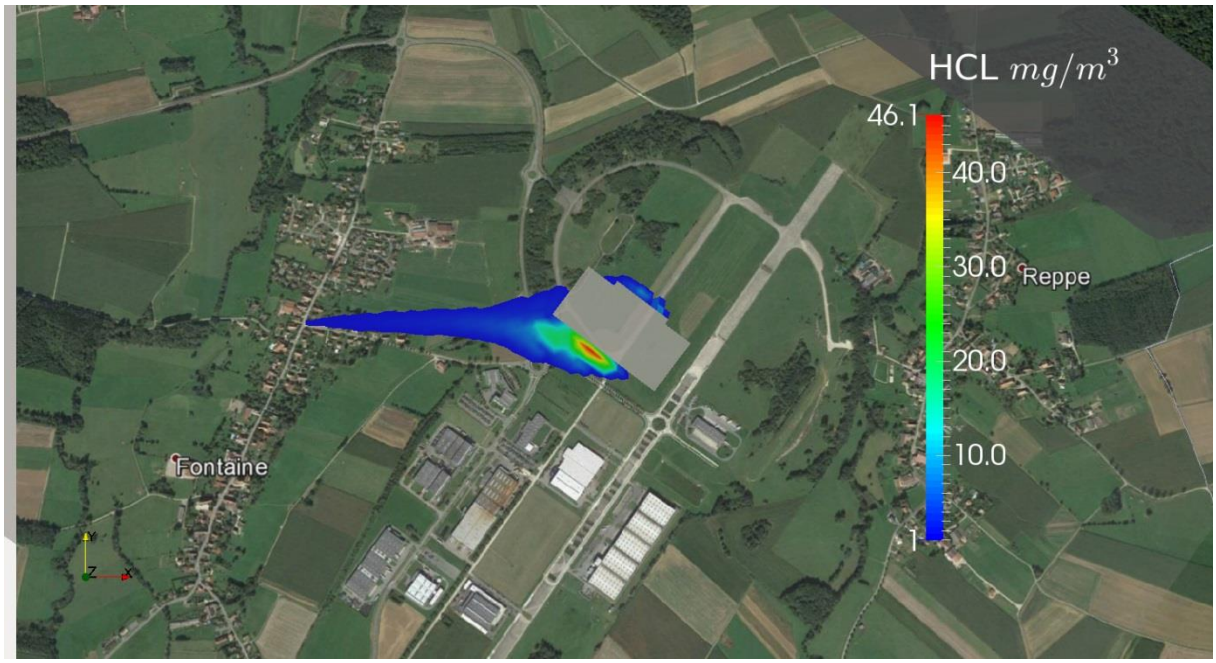


*Figure 25 : Concentration de HCN au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*

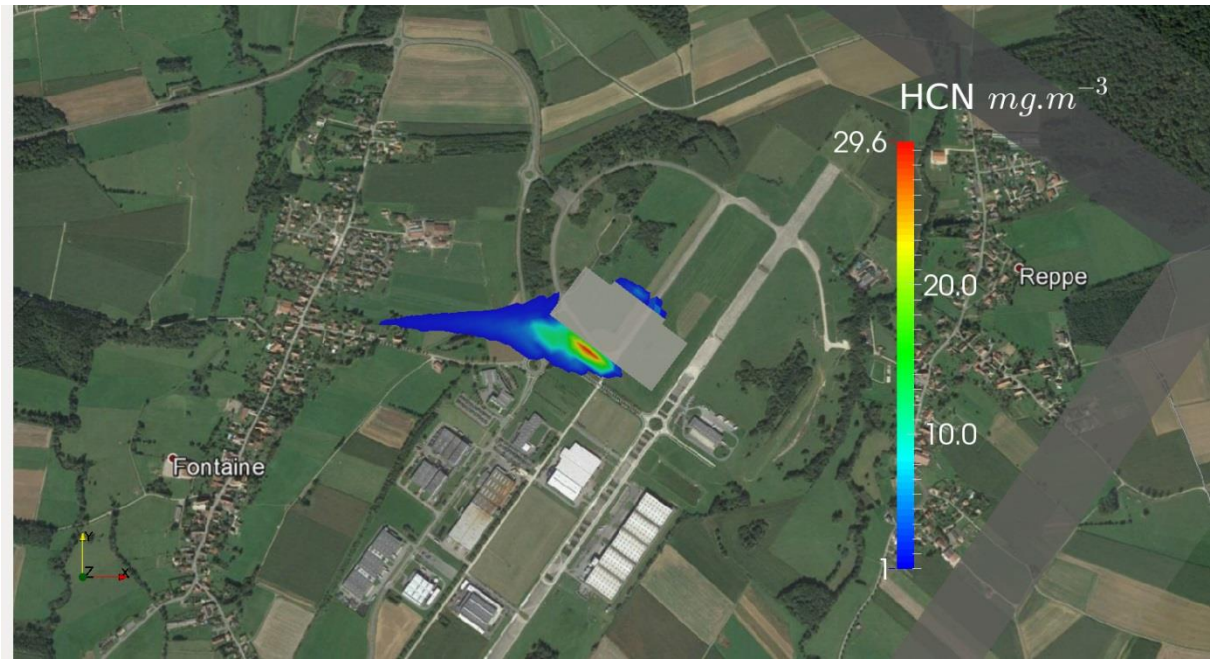
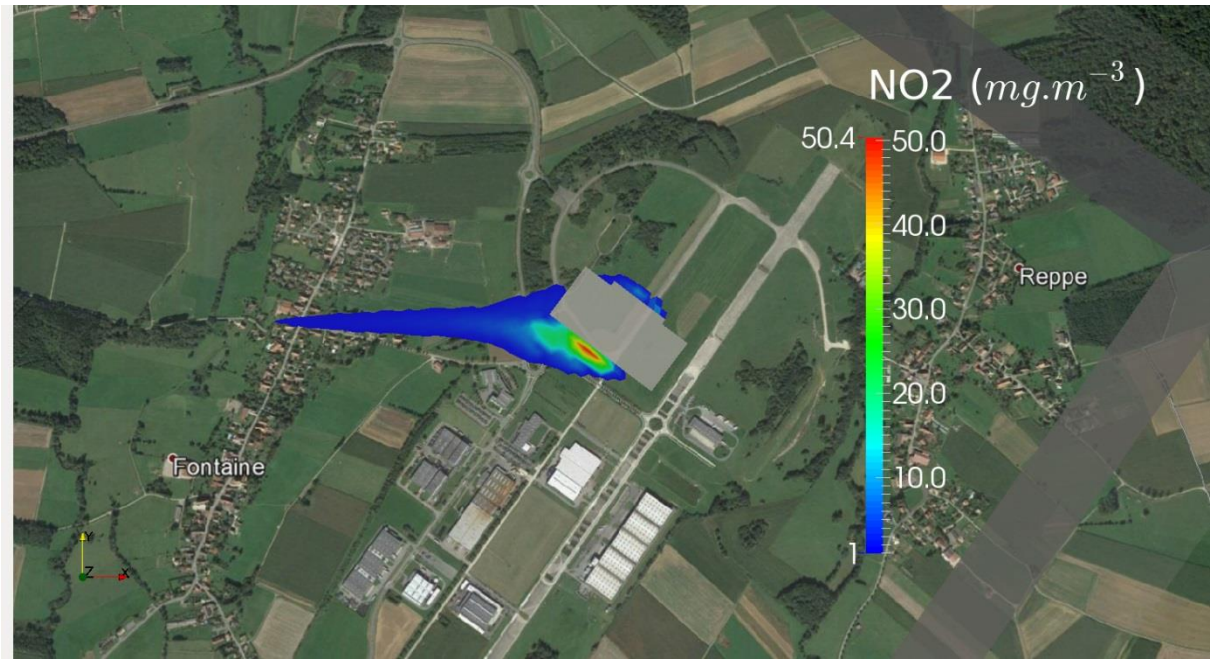


*Figure 26 : Concentration de NO2 au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*



5.1.6 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 6

*Figure 27 : Concentration de CO au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*

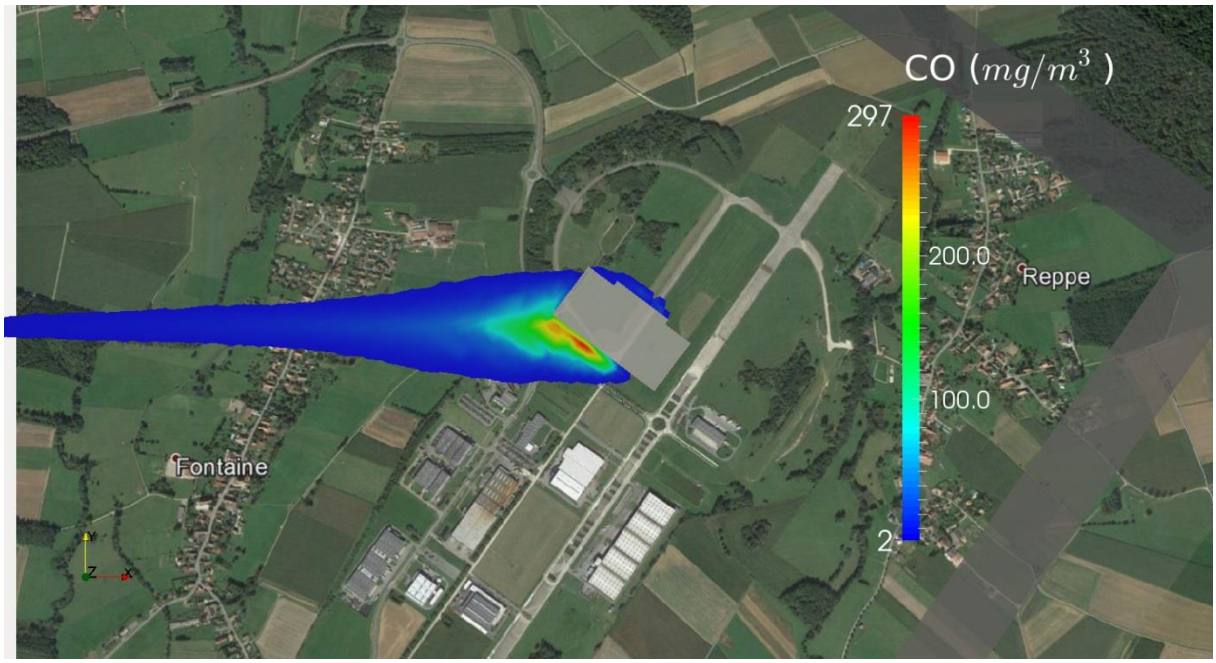


*Figure 28 : Concentration de HCL au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*

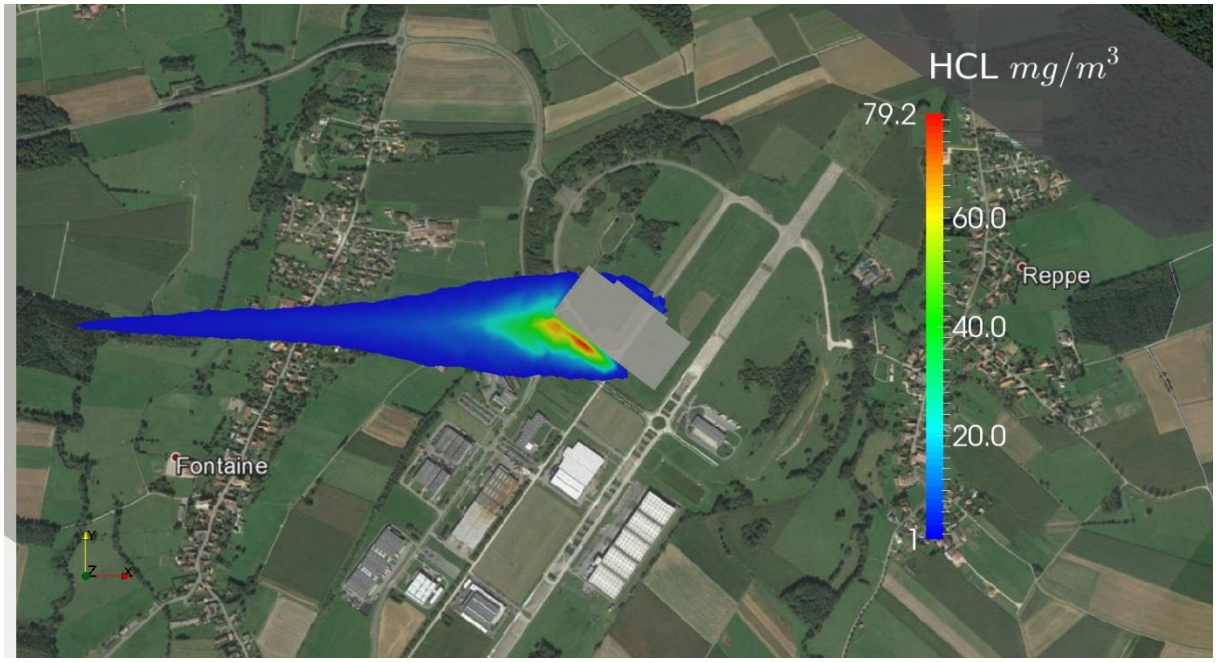


*Figure 29 : Concentration de HCN au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*

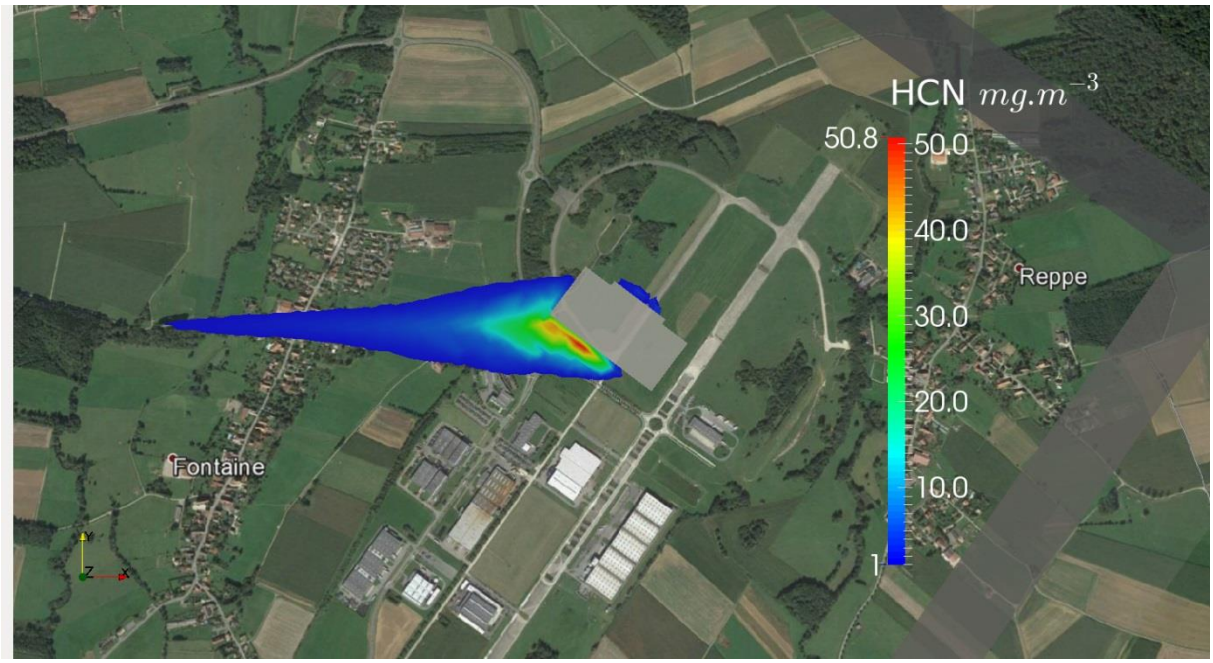
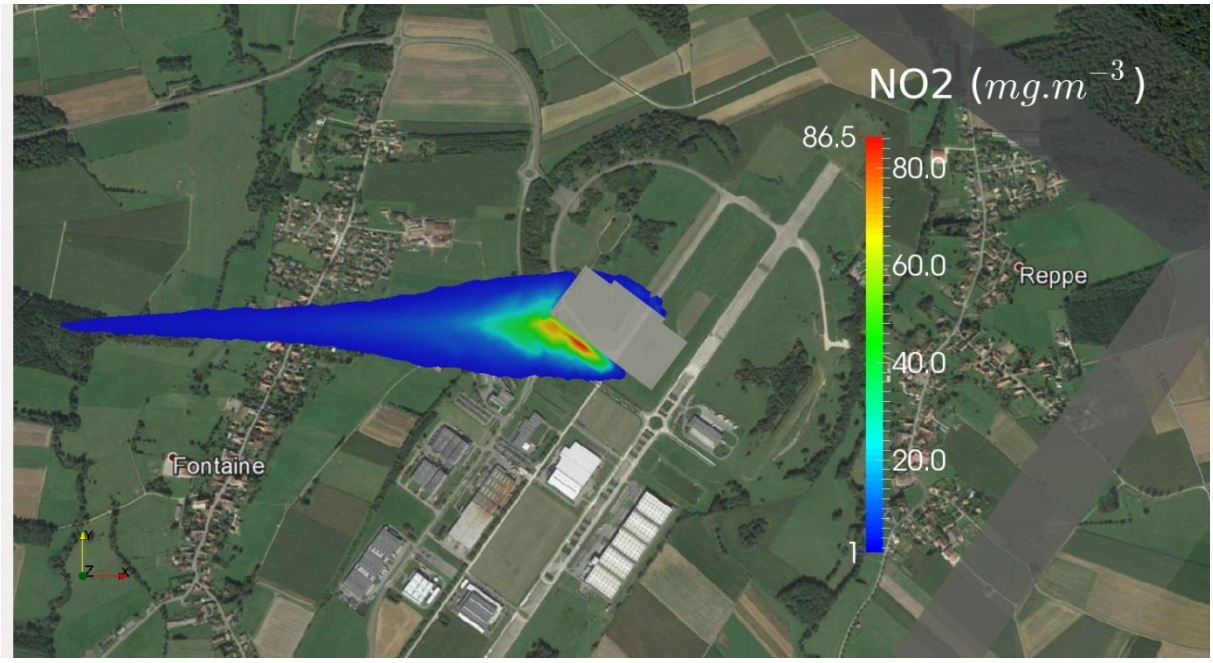


*Figure 30 : Concentration de NO2 au sol (1m) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*



5.2 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN CO AU SOL

Les concentrations maximales en **monoxyde de carbone** observées au sol sont reportées dans le Tableau 5.

*Tableau 5 - Concentrations maximales en **CO** au sol (1m)*

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10 D *(3)*	3F *(1)*	5D *(2)*	10 D *(3)*
Concentration maximale de CO au sol		**101**	**158**	**94**	**365**	**173**	**297**
Valeurs toxicologiques (mg/m³)	SELS 60 min	-					
	SPEL 60 min	3 680					
	SEI 60 min	920					

(1) Situation 3F : atmosphère très stable

(2) Situation 5D : atmosphère neutre

(3) Situation 10D : atmosphère neutre

Aucun des scénarios traités ne fait apparaître un dépassement des seuils de référence.

Les concentrations au sol calculées pour le monoxyde de carbone par le modèle sont représentées sur les Figure 7, Figure 11, Figure 15, Figure 19, Figure 23, Figure 27.

5.3 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN CO SUR LE DOMAINE

Les concentrations maximales en **monoxyde de carbone** observées sur **l'ensemble du domaine 3D** sont reportées dans le Tableau 6.

*Tableau 6 - Concentrations maximales en **CO** sur l'ensemble du domaine*

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10 D	3F	5D	10D
Concentration maximale de CO		**691.7**	**366.7**	**184.7**	**1694.0**	**1584.6**	**1212.2**
Valeurs toxicologiques (mg/m³)	SELS 60 min	-					
	SPEL 60 min	3 680					
	SEI 60 min	920					

(4) Situation 3F : atmosphère très stable

(5) Situation 5D : atmosphère neutre

(6) Situation 10D : atmosphère neutre

Tous les cas du scénario 2 font apparaître un dépassement du SEI sur le CO. La visualisation du dépassement des seuils toxicologiques par des isosurfaces vont permettre de mesurer l'étendue tridimentionnelle des zones de dangers.

5.4 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCL AU SOL

Les concentrations maximales en **acide chlorhydrique** observées au sol sont reportées dans le Tableau 7.

*Tableau 7 - Concentrations maximales en **HCL** au sol (1m)*

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*	3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*
Concentration maximale de HCL au sol		**10.3**	**16.1**	**9.56**	**97.1**	**46.1**	**79.2**
Valeurs toxicologiques (mg/m^3)	SELS 60 min	565					
	SPEL 60 min	358					
	SEI 60 min	60					

(1) Situation 3F : atmosphère très stable

(2) Situation 5D : atmosphère neutre

(3) Situation 10D : atmosphère neutre

Les concentrations au sol calculées pour le **acide chlorhydrique** par le modèle sont représentées sur les Figure 8, Figure 12, Figure 16, Figure 20, Figure 24, Figure 28.

Les seuls cas présentants un **dépassement du SEI** sont les **cas 6.** Dans le cas d'un incendie généralisé avec un vent fort rabattant le panache, le seuil est dépassé. Dans le cas d'un incendie généralisé avec un vent faible, la stabilité atmosphérique ne favorise pas la dispersion et on peut constater une accumulation de gaz toxiques dans certaines zones. Toutefois ces deux dépassements du SEI sont observés en champ très proche comme le montre les Figure 31 et Figure 32.

*Figure 31 : Carte de concentration de **HCL > 60 mg/m3** – Cas 4*

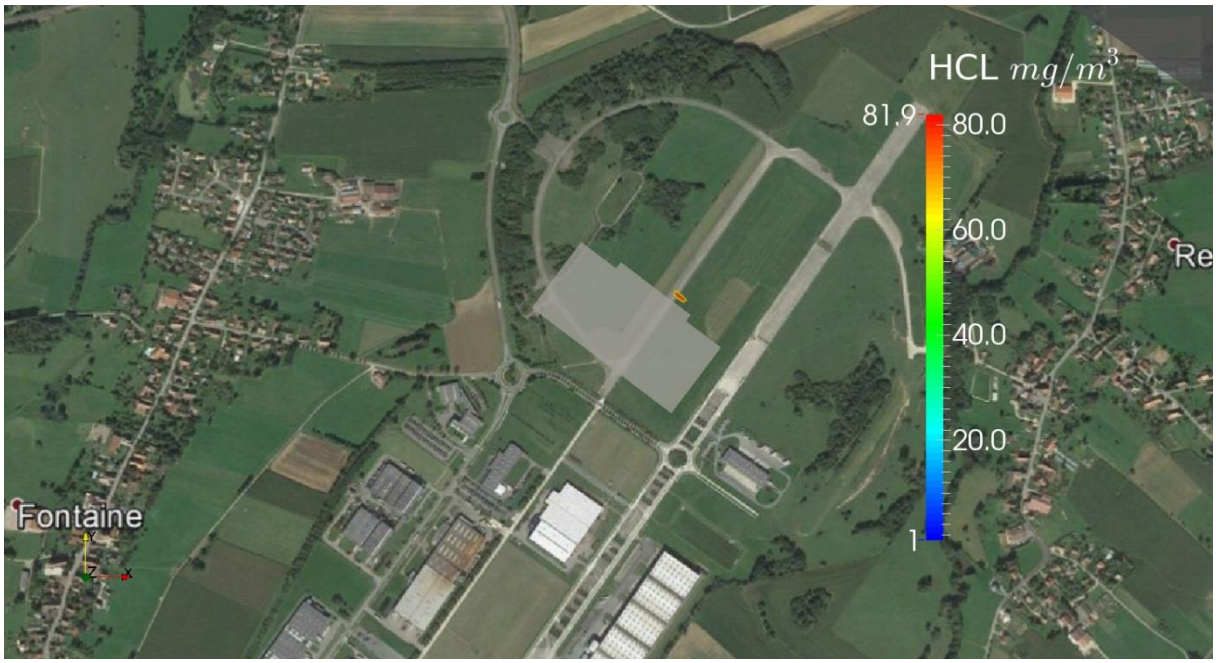
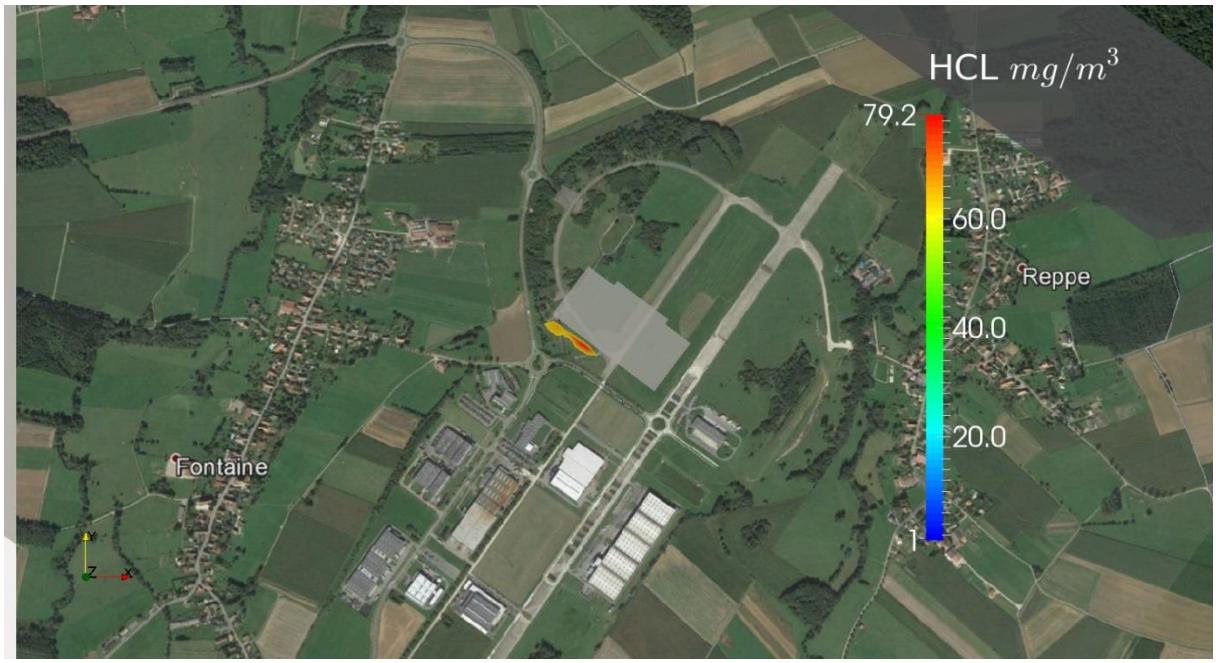


*Figure 32 : Carte de concentration de **HCL > 60 mg/m3** – Cas 6*



5.5 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCL SUR LE DOMAINE

Les concentrations maximales en **acide chlorhydrique** observées sur **l'ensemble du domaine 3D** sont reportées dans le Tableau 8.

Tableau 8 - Concentrations maximales en HCL sur l'ensemble du domaine

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*	3F	5D	10D
Concentration maximale de HCL		**70.30**	**37.25**	**18.8**	**450.9**	**421.8**	**322.7**
Valeurs toxicologiques (mg/m^3)	SELS 60 min	565					
	SPEL 60 min	358					
	SEI 60 min	60					

(1) Situation 3F : atmosphère très stable
(2) Situation 5D : atmosphère neutre
(3) Situation 10D : atmosphère neutre

Tous les cas du scenario 2 (Incendie généralisé, feu bien ventilé) ainsi que le cas 1 (3F mal ventilé) font apparaître un dépassement des seuils de référence. La visualisation du dépassement des seuils toxicologiques par des isosurfaces vont permettre de mesurer l'étendue tridimentionnelle des zones de dangers.

5.6 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCN AU SOL

Les concentrations maximales en **acide cyanhydrique** observées au sol sont reportées dans le Tableau 9.

*Tableau 9 - Concentrations maximales en **HCN** au sol (1m)*

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*	3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*
Concentration maximale de HCN au sol		**6.6**	**10.3**	**6.13**	**62.3**	**29.6**	**50.8**
Valeurs toxicologiques (mg/m³)	SELS 60 min	69					
	SPEL 60 min	45					
	SEI 60 min	-					

(1) Situation 3F : atmosphère très stable

(2) Situation 5D : atmosphère neutre

(3) Situation 10D : atmosphère neutre

Les concentrations au sol calculées pour le **acide cyanhydrique** par le modèle sont représentées sur les Figure 9, Figure 13, Figure 17, Figure 21, Figure 25 et Figure 29.

Les seuls cas présentants un **dépassement du SEI** sont les **cas 4 et 6.** Dans le cas d'un incendie généralisé avec un vent fort rabattant le panache, le seuil est dépassé. Dans le cas d'un incendie généralisé avec un vent faible, la stabilité atmosphérique ne favorise pas la dispersion et on peut constater une accumulation de gaz toxiques dans certaines zones. Toutefois ces deux dépassements du SEI sont observés en champ très proche comme le montre les Figure 33 et Figure 34.

*Figure 33 : Carte de concentration de **HCN > 45 mg/m3** – Cas 4*

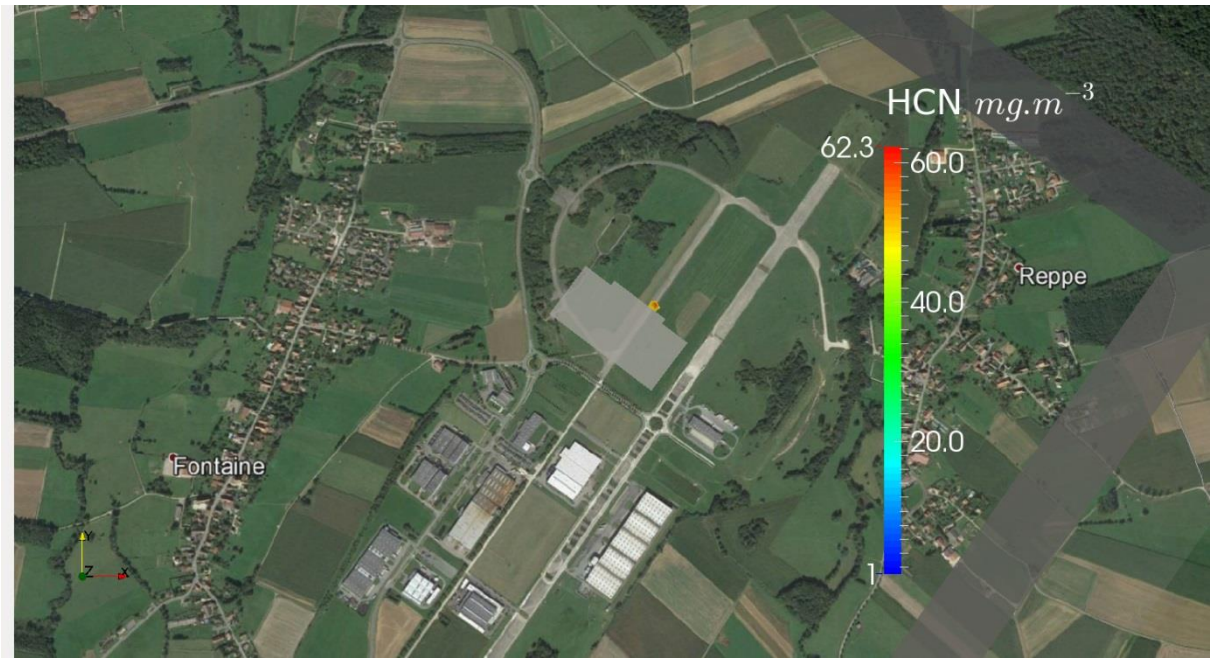
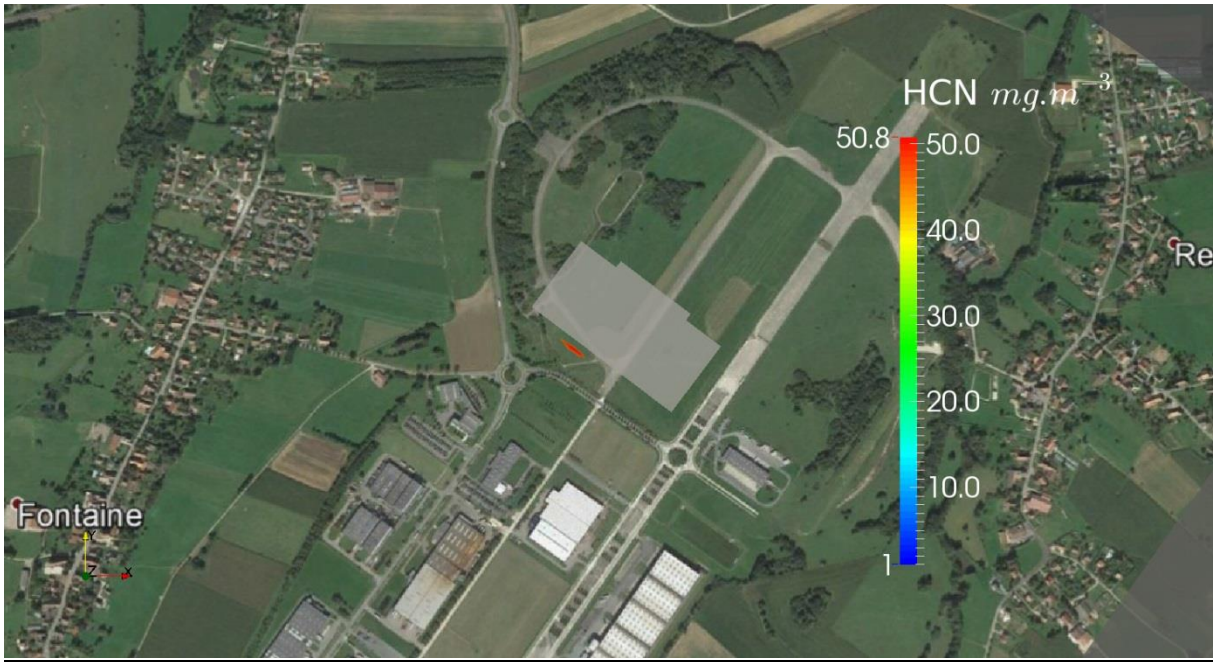


*Figure 34 : Carte de concentration de **HCN > 45 mg/m3** – Cas 6*



5.7 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN HCN SUR LE DOMAINE

Les concentrations maximales en **acide cyanhydrique** observées sur **l'ensemble du domaine 3D** sont reportées dans le Tableau 10.

Tableau 10 - Concentrations maximales en HCN sur l'ensemble du domaine

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*	3F	5D	10D
Concentration maximale de HCN		**43.2**	**23.9**	**12.0**	**289.0**	**270.4**	**206.8**
Valeurs toxicologiques (mg/m³)	SELS 60 min	69					
	SPEL 60 min	45					
	SEI 60 min	-					

Tous les cas du scenario 2 (Incendie généralisé, feu bien ventilé) font apparaître un dépassement du SELS. La visualisation du dépassement des seuils toxicologiques par des isosurfaces vont permettre de mesurer l'étendue tridimentionnelle des zones de dangers.

5.8 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN NO2 AU SOL

Les concentrations maximales en **dioxyde d'azote** observées sur l'ensemble du domaine sont reportées dans le Tableau 11.

*Tableau 11 - Concentrations maximales en **NO2** au sol (1m)*

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*	3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*
Concentration maximale de NO2 au sol		**11.2**	**17.6**	**10.4**	**89.5**	**50.4**	**106**
Valeurs toxicologiques (mg/m³)	SELS 60 min	137					
	SPEL 60 min	132					
	SEI 60 min	75					

(1) Situation 3F : atmosphère très stable

(2) Situation 5D : atmosphère neutre

(3) Situation 10D : atmosphère neutre

Les concentrations au sol calculées pour le **dioxyde d'azote** par le modèle sont représentées sur les Figure 10, Figure 14, Figure 18, Figure 22, Figure 26 et Figure 30.

Les seuls cas présentants un **dépassement du SEI** sont les **cas 4 et 6.** Dans le cas d'un incendie généralisé avec un vent fort rabattant le panache, le seuil est dépassé **au sol**. Dans le cas d'un incendie généralisé avec un vent faible, la stabilité atmosphérique ne favorise pas la dispersion et on peut constater une accumulation de gaz toxiques dans certaines zones. Toutefois ces deux dépassements du SEI sont observés en champ très proche comme le montre les Figure 35 et Figure 36.

*Figure 35 : Carte de concentration de **NO2 > 75 mg/m3** – Cas 4*

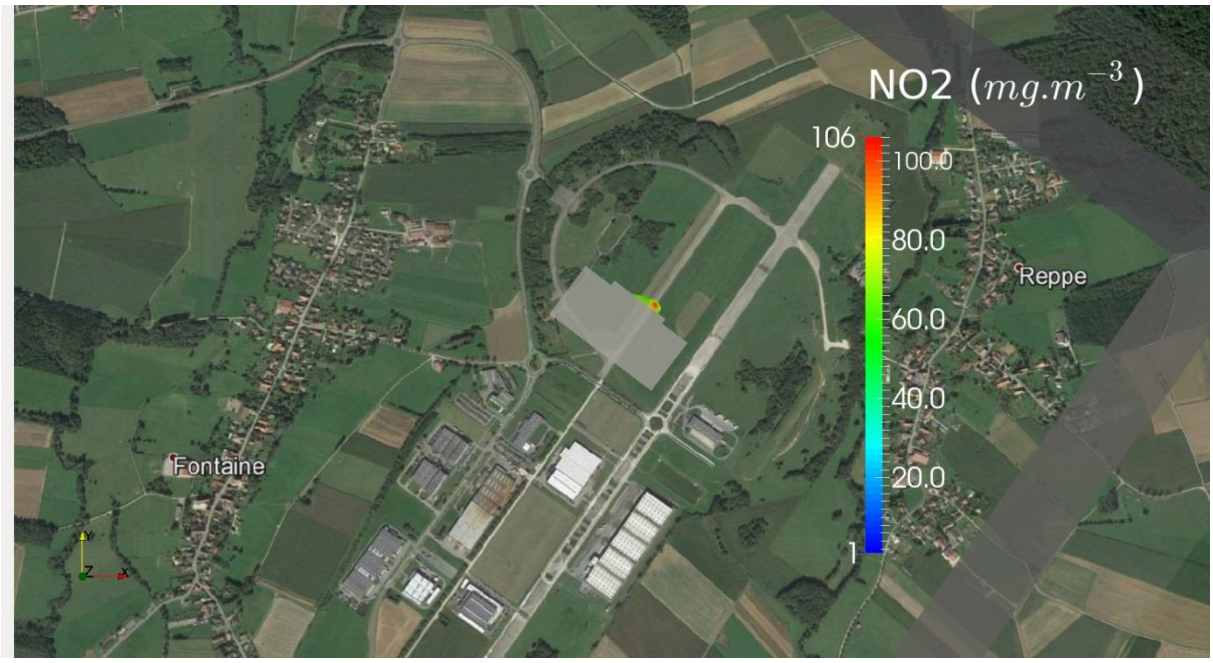
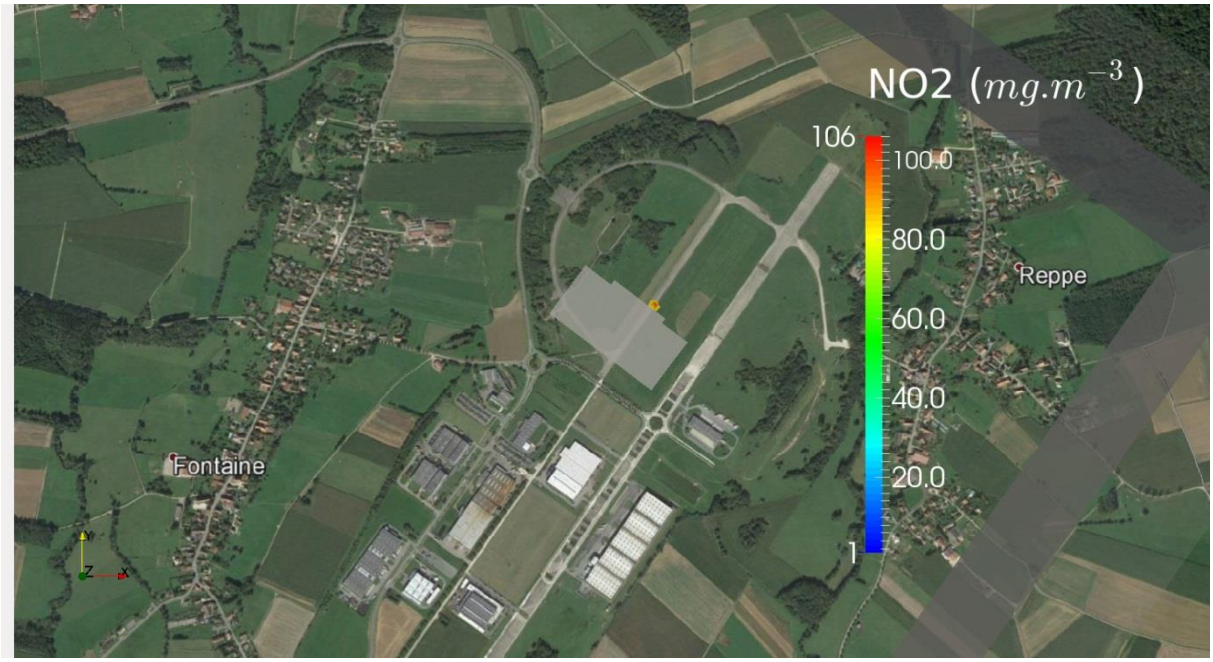


*Figure 36 : Carte de concentration de **NO2 > 75 mg/m3** – Cas 6*



5.9 MAXIMUM DE CONCENTRATION EN NO2 SUR LE DOMAINE

Les concentrations maximales en **dioxyde d'azote** observées sur **l'ensemble du domaine 3D** sont reportées dans le Tableau 12.

Tableau 12 - Concentrations maximales en NO2 sur l'ensemble du domaine

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Unité		mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3
Situation météorologique		3F *(1)*	5D *(2)*	10D *(3)*	3F	5D	10D
Concentration maximale de NO2		**73.3**	**40.7**	**20.5**	**492.4**	**460.6**	**352.3**
Valeurs toxicologiques (mg/m^3)	SELS 60 min	137					
	SPEL 60 min	132					
	SEI 60 min	75					

Tous les cas du scenario 2 (Incendie généralisé, feu bien ventilé) font apparaître un dépassement du SELS. La visualisation du dépassement des seuils toxicologiques par des isosurfaces vont permettre de mesurer l'étendue tridimentionnelle des zones de dangers.

5.10 VISUALISATION DES SEUILS TOXICOLOGIQUES

Les figures suivantes présentent, pour chacun des 6 cas étudiés, une visualisation du panache sous forme d'isosurfaces 3D de concentration pour les SEL et SEI. Trois codes couleur apparaissent :

* en **vert** : **dépassement** de la valeur toxicologique pour **le SEI**;
* en **jaune** : **dépassement** de la valeur toxicologique pour **le SPEL** ;
* en **rouge** : **dépassement** de la valeur toxicologique pour **le SELS**.

Les seuils toxicologiques calculés par le modèle pour le **monoxyde de carbone** sur les 6 cas sont présentés par les Figure 37, Figure 41, Figure 45, Figure 49, Figure 53, Figure 57.
Les seuils toxicologiques calculés par le modèle pour l'**acide chlorhydrique** sur les 6 cas sont présentés par les Figure 38, Figure 42, Figure 46, Figure 50, Figure 54, Figure 58.

5.10.1 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 1

*Figure 37 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*

*Figure 38 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*

*Figure 39 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*

*Figure 40 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 3F*

5.10.2 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 2

*Figure 41 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*

*Figure 42 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*

*Figure 43 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*

*Figure 44 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 5D*

5.10.3 Scénario 1 : Incendie mal ventilé – CAS 3

*Figure 45 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*

*Figure 46 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*

*Figure 47 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*

*Figure 48 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie débutant mal ventilé** – Météo 10D*

5.10.4 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 4

*Figure 49 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*

*Figure 50 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert)) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*

*Figure 51 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*

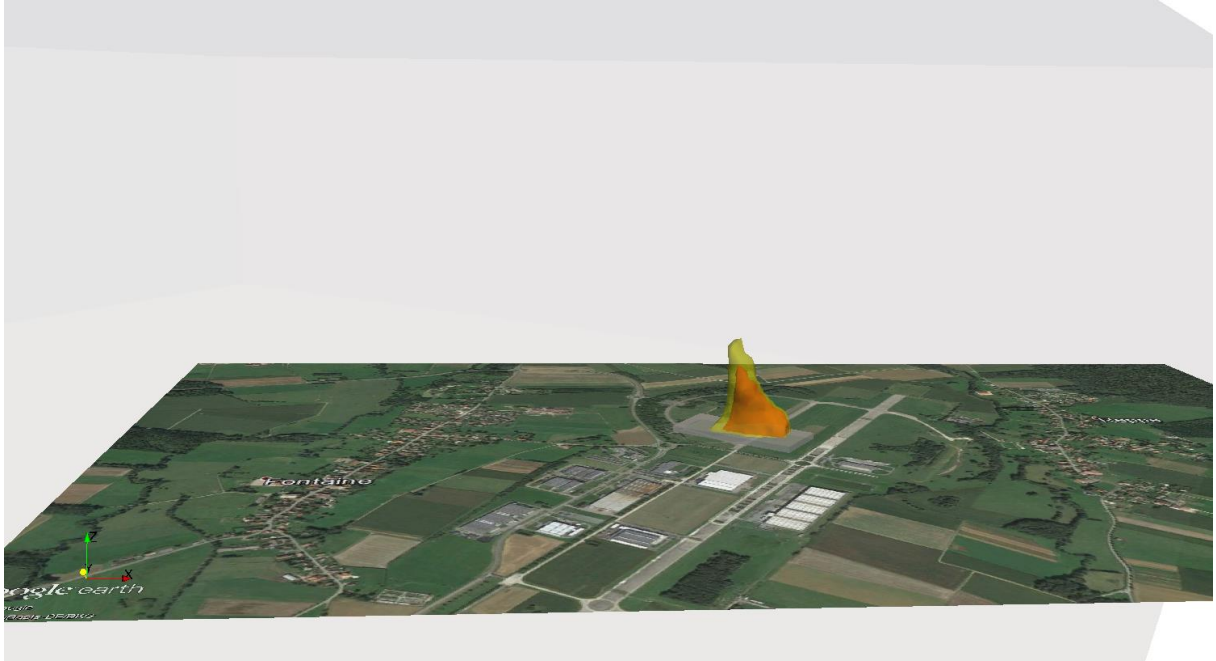
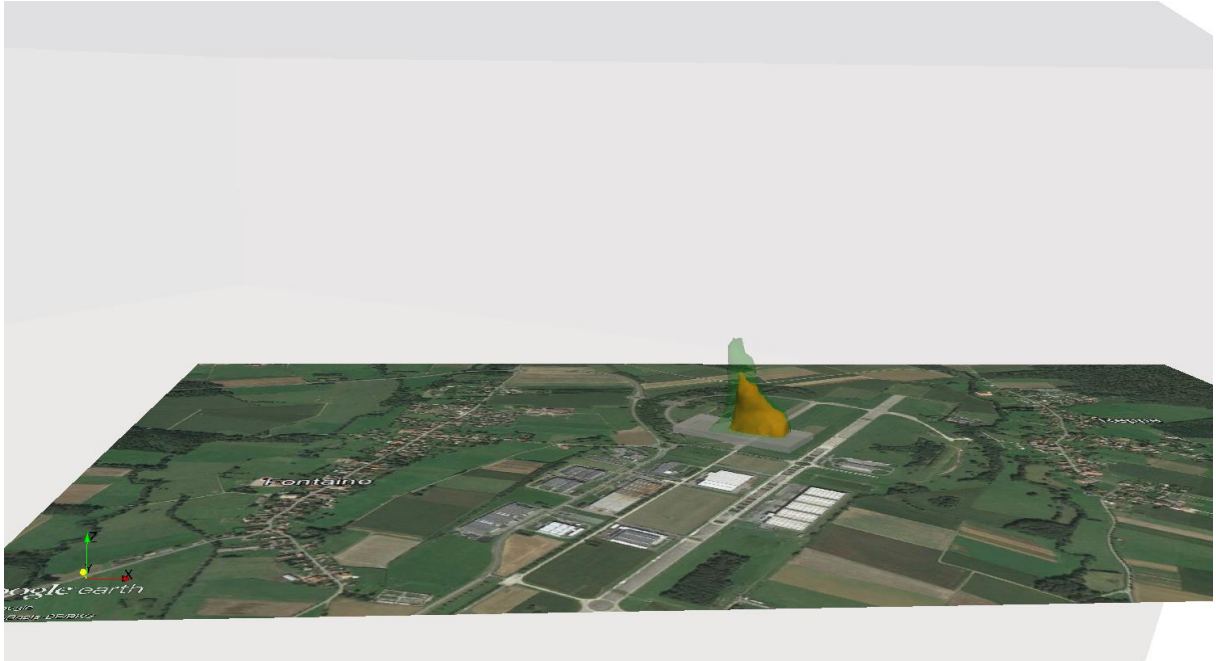


*Figure 52 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert)) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F*



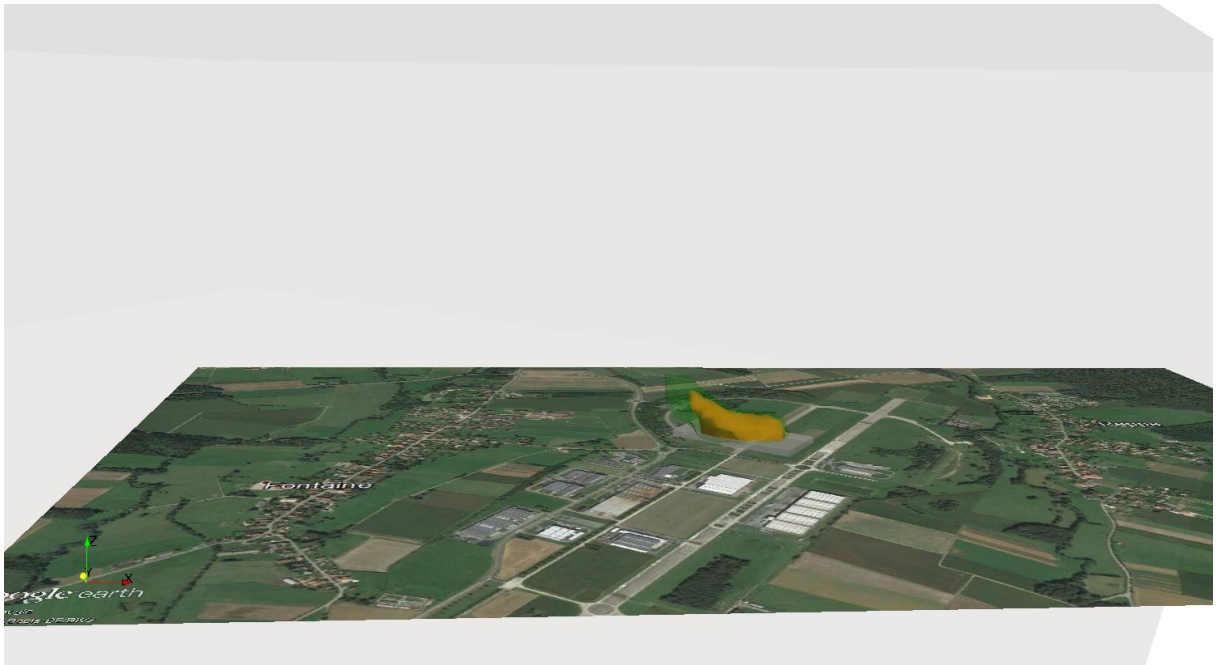
5.10.5 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 5

*Figure 53 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*

*Figure 54 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*

*Figure 55 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*

*Figure 56 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D*



5.10.6 Scénario 2 : Incendie bien ventilé – CAS 6

*Figure 57 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*

*Figure 58 : Isosurface de HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*

*Figure 59 : Isosurface de HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*

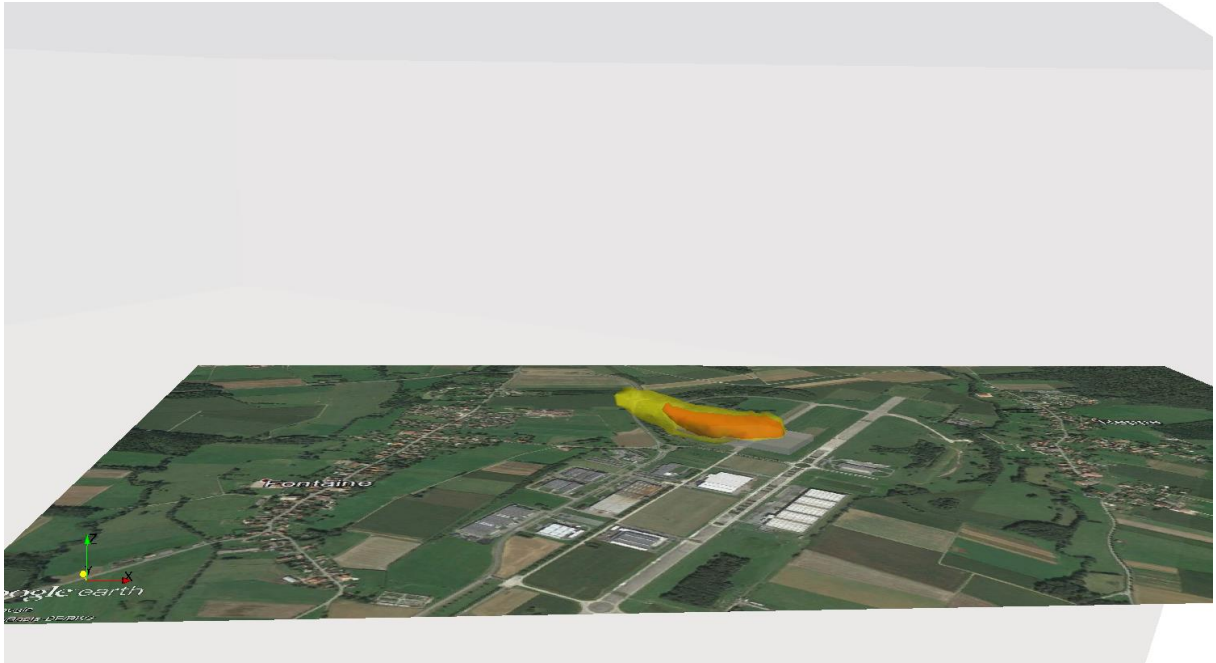


*Figure 60 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D*

5.11 DETERMINATION DE LA DISTANCE DE DANGER

Le Tableau 13, Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16 présentent respectivement les distances de **danger au sol** (1m) calculées pour le **monoxyde de carbone**, l'**acide chlordhydrique, l'acide cyanhydrique** et **le dioxyde d'azote**.

*Tableau 13 : Distances de danger **au sol** – Monoxyde de carbone*

CO	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
SELS 60 min -	-	-	-	-	-	-
SPEL 60 min (3680 mg/m3)	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m
SEI 60 min (920 mg/m3)	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m

*Tableau 14 : Distances de danger **au sol** – Acide chlorhydrique*

HCL	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
SELS 60 min (565 mg/m^3)	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m
SPEL 60 min (358 mg/m^3)	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m
SEI 60 min (60 mg/m^3)	0m	0m	0m	**154 m**	0 m	**216 m**

*Tableau 15 : Distances de danger **au sol** – Acide cyanhydrique*

HCN	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
SELS 60 min (69 mg/m^3)	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m
SPEL 60 min (45 mg/m3)	0 m	0 m	0 m	**170 m**	0 m	**178 m**
SEI 60 min -	-	-	-	-	-	-

*Tableau 16 : Distances de danger **au sol** – Dioxyde d'azote*

NO2	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
SELS 60 min (137 mg/m^3)	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m
SPEL 60 min (132 mg/m^3)	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m
SEI 60 min (75 mg/m^3)	0 m	0 m	0 m	**125 m**	0 m	**130 m**

Tous les dépassements observés **au sol** sont situés **à l'intérieur du site** du projet.

Pour **tous les dépassements dans le domaine**, voici des **zooms sur les isosurfaces** représentant les zones de dépassement des seuils. Ces images montrent que les dépassements se retrouvent en altitude, dans la zone du foyer de l'incendie. **Aucune habitation n'est affectée par les panaches dépassant les seuils**.

*Figure 61 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F – Zoom*

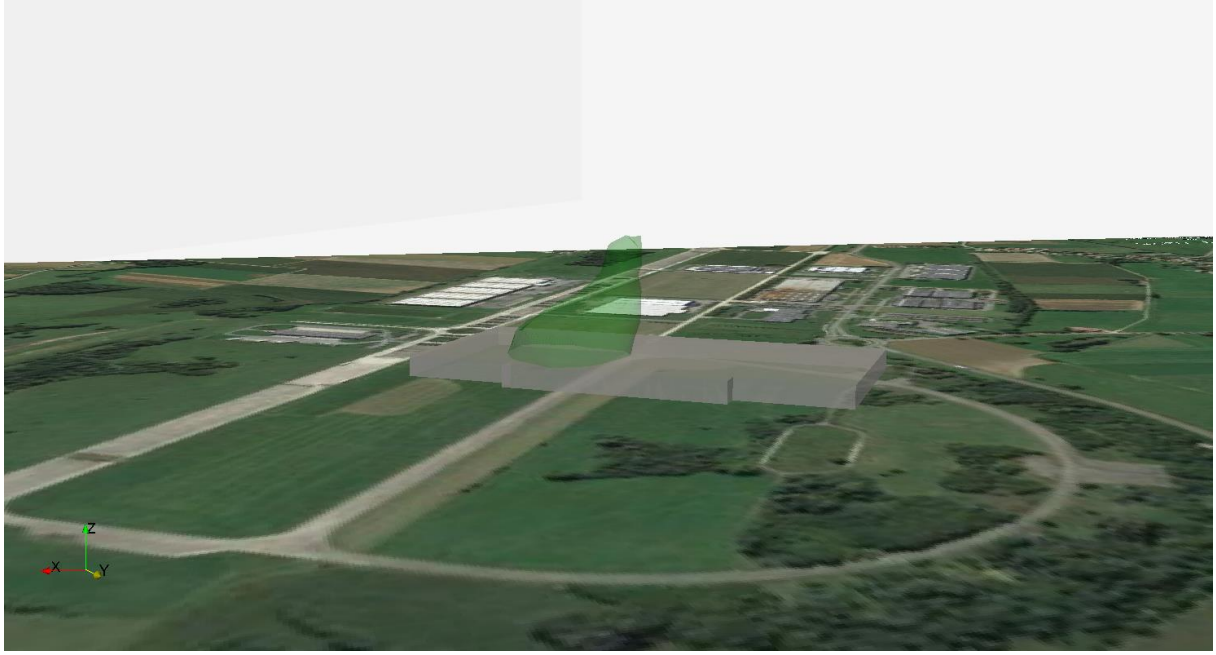


*Figure 62 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D – Zoom*

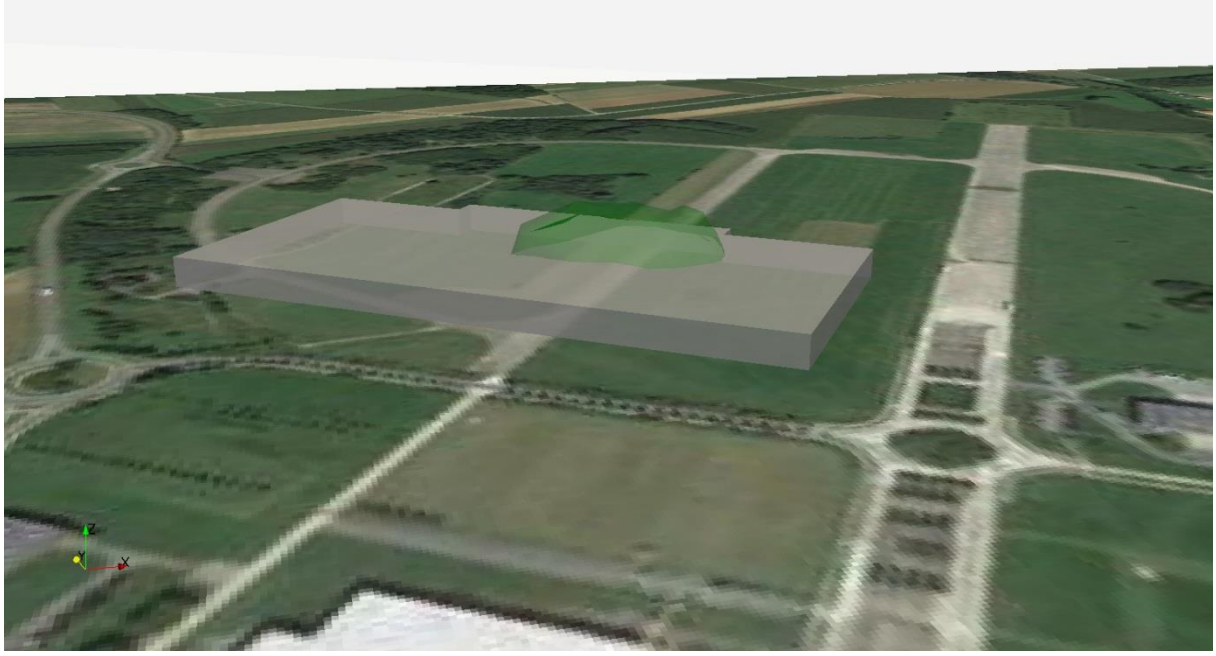


*Figure 63 : Isosurface de CO (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D – Zoom*

*Figure 64 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé mal ventilé** – Météo 3F – Zoom*

Figure 65 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – ***Incendie généralisé bien ventilé*** *– Météo 3F – Zoom*

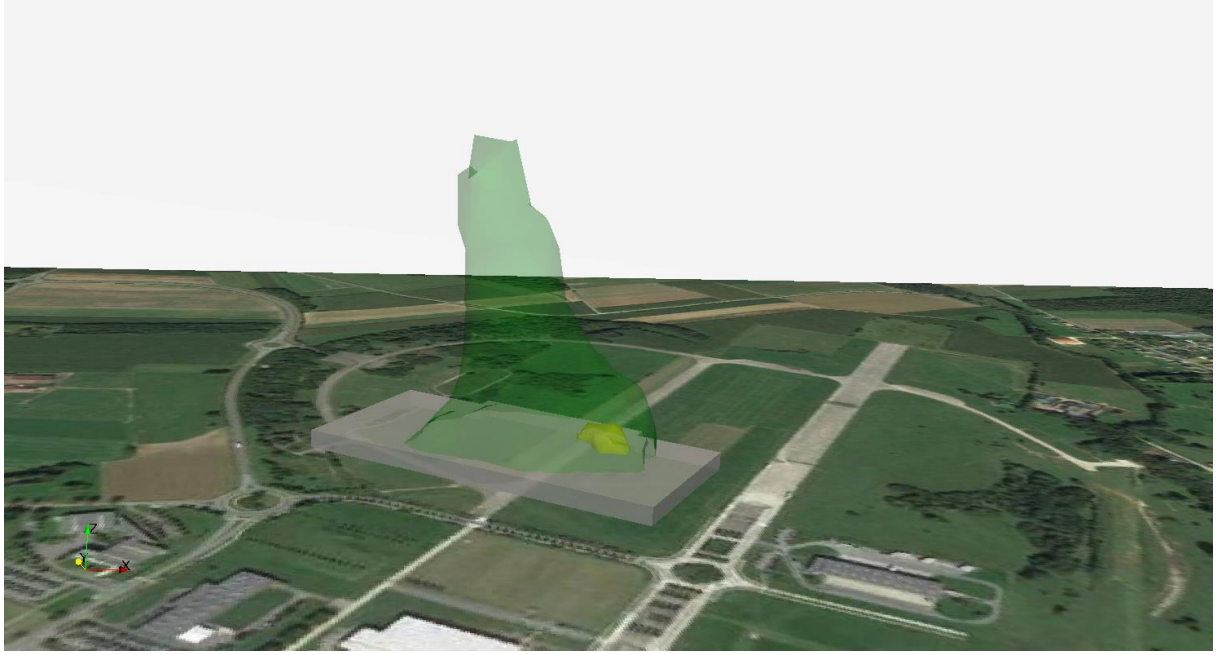


Figure 66 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – ***Incendie généralisé bien ventilé*** *– Météo 5D – Zoom*

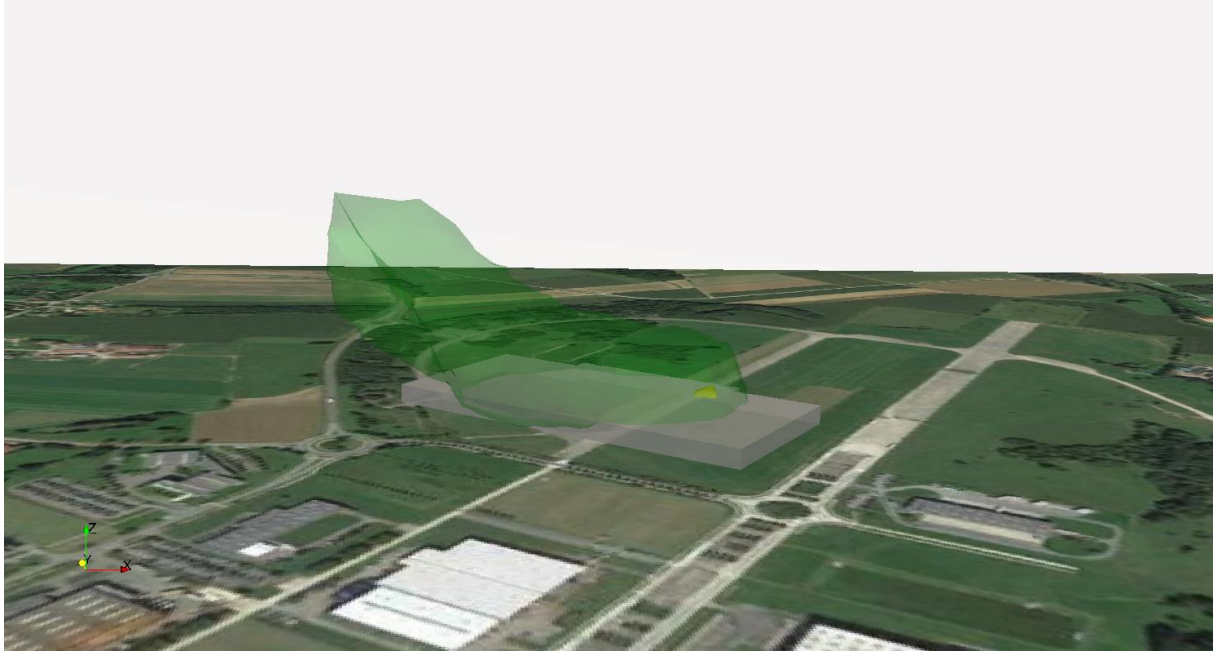


*Figure 67 : Isosurface d'HCL (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D – Zoom*

*Figure 68 : Isosurface d'HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F – Zoom*

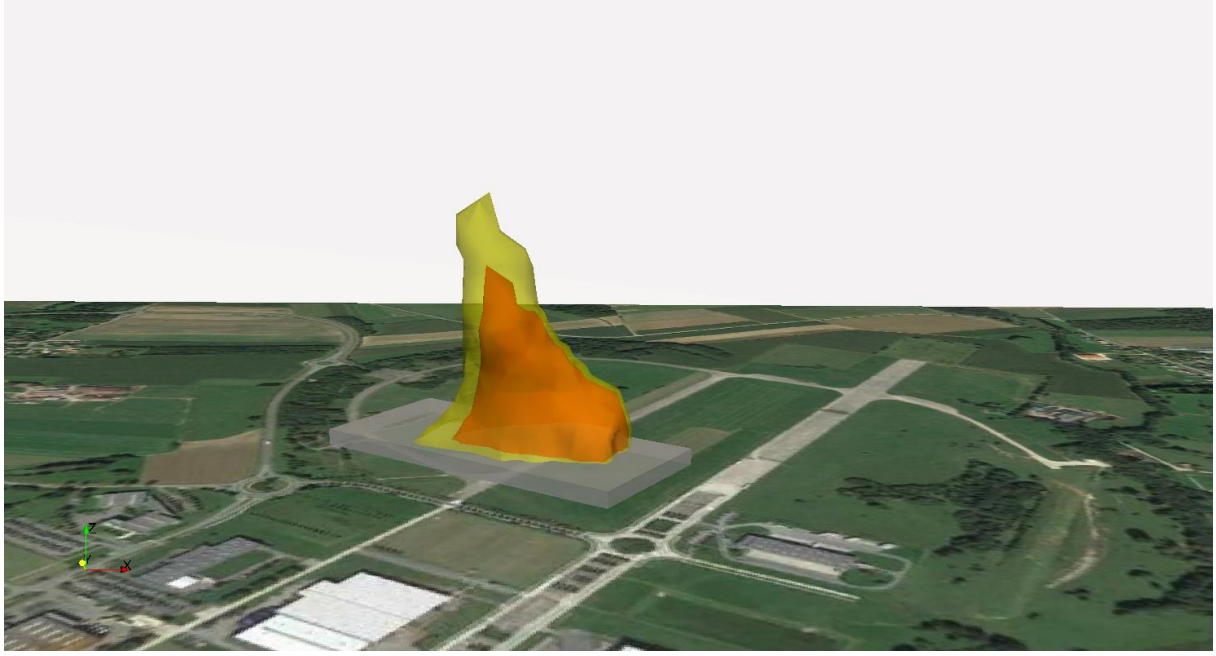


Figure 69 : Isosurface d'HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – ***Incendie généralisé bien ventilé*** *– Météo 5D – Zoom*

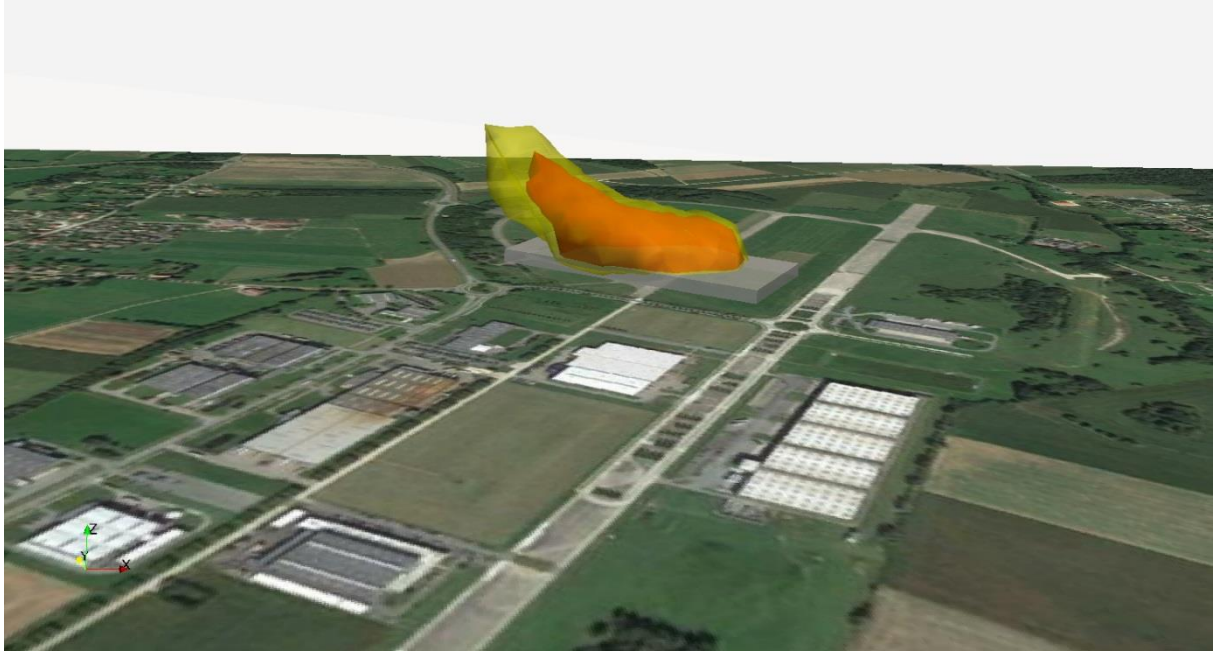


Figure 70 : Isosurface d'HCN (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – ***Incendie généralisé bien ventilé*** *– Météo 10D – Zoom*

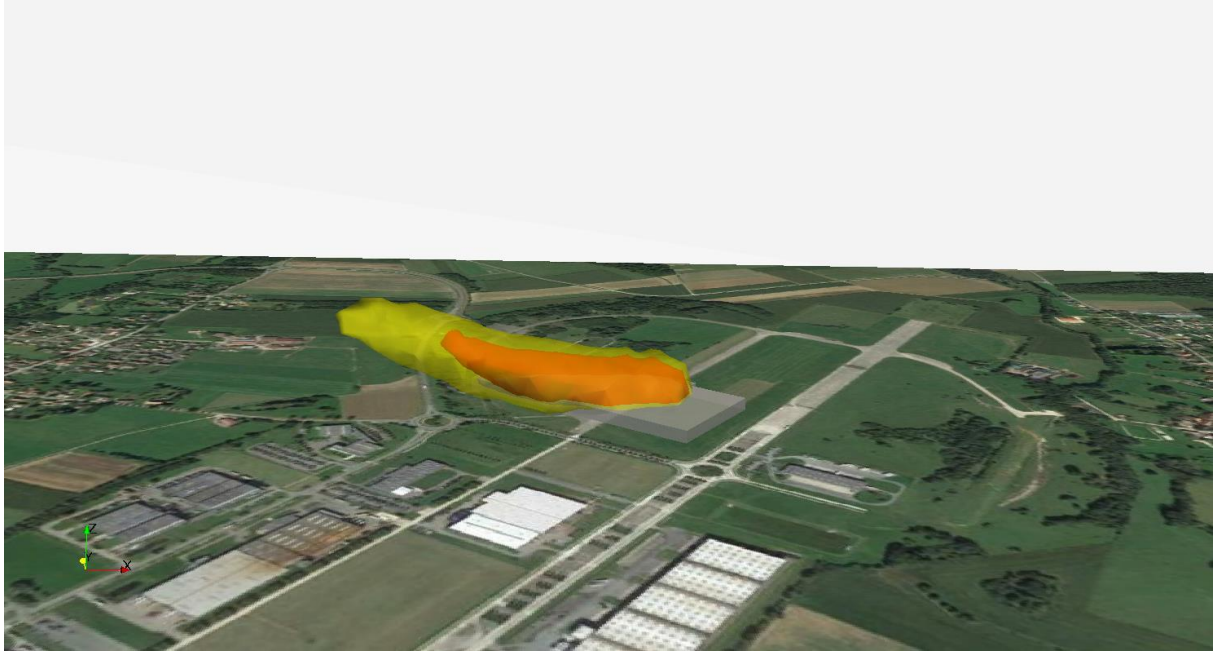


*Figure 71 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 3F – Zoom*

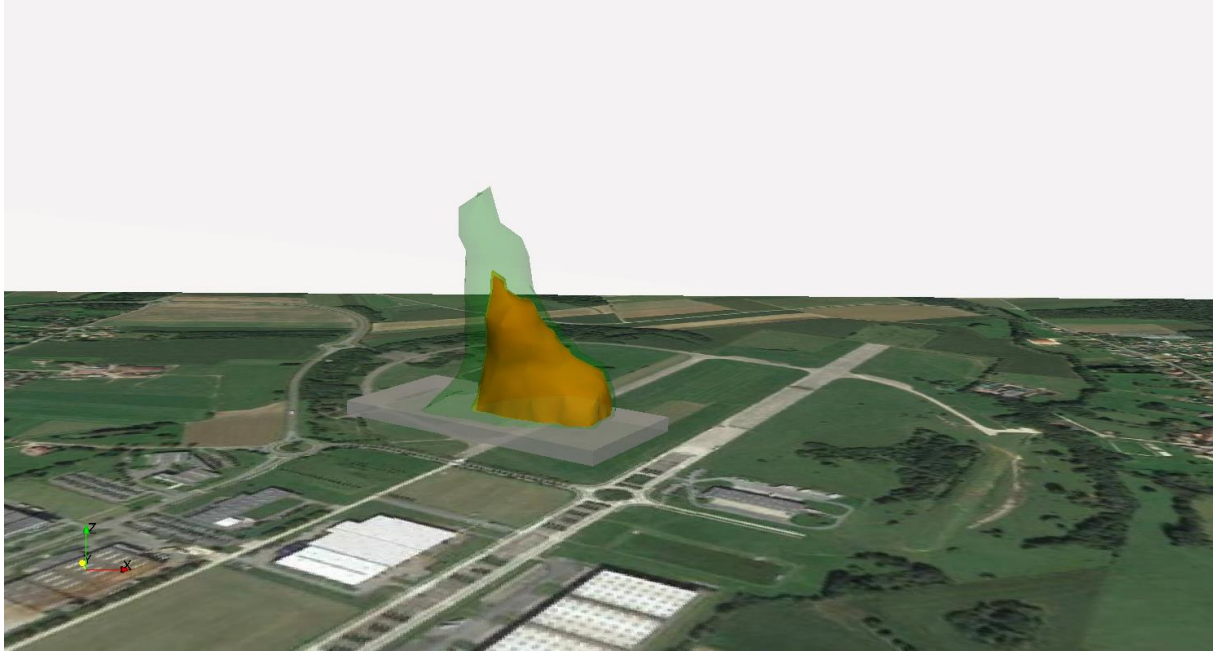
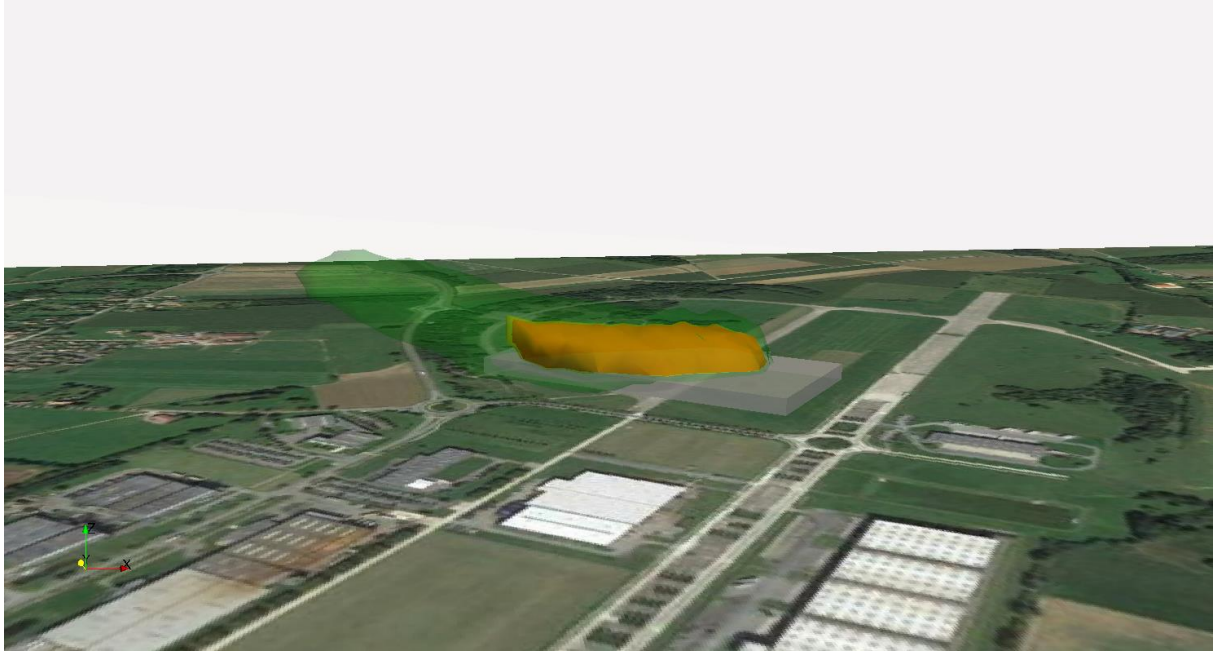


*Figure 72 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 5D – Zoom*

*Figure 73 : Isosurface de NO2 (SELS en rouge, SPEL en jaune, SEI en vert) – **Incendie généralisé bien ventilé** – Météo 10D – Zoom*



6 SYNTHESE DE L'ETUDE

Cette étude a permis de déterminer l'impact de plusieurs scénarios d'incendie sur le site de VAILOG à Fontaine (90).

Deux scénarii ont été étudiés :

- Incendie débutant associé à un foyer mal ventilé ;
- Incendie généralisé associé à un foyer bien ventilé.

Pour chaque scénario, trois situations météorologiques (deux pénalisantes et une situation courante) ont été simulées :

- un cas d'atmosphère très stable avec un vent faible (3F) ;
- une situation d'atmosphère neutre avec un vent moyen (5D) ;
- une situation d'atmosphère neutre avec un vent fort (10D) ;

Les gaz toxiques émis sont le monoxyde de carbone (CO), l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide cyanhydrique (HCN) et le dioxyde d'azote (NO2). Le calcul des termes sources a été réalisé

Il n'y a **pas de dépassement** de seuil pour le **monoxyde de carbone** au sol et dans tout le domaine.

Pour **l'acide chlrohydrique** on observe un dépassement du **SEI** au sol pour le cas 4 et 6 **(incendie généralisé et vent fort)** pour une **distance de danger** de **154 m** et **216 m** autour du foyer.

Pour l'**acide cyanhydrique** on observe un dépassement du **SEI** au sol pour le cas 4 et 6 **(incendie généralisé et vent fort)** pour une **distance de danger** de **170 m** et **178 m** autour du foyer.

Pour l'**dioxyde d'azote** on observe un dépassement du **SEI** au sol pour le cas 4 et 6 **(incendie généralisé et vent fort)** pour une **distance de danger** de **125 m** et **130 m** autour du foyer.

Les panaches de fumées dépassent le **SEI** pour **le CO** pour les **cas du scenario 2** (incendie généralisé, cas 4, 5 et 6).

Les panaches de fumées dépassent le **SPEL** pour **le HCL** pour les **cas du scenario 2** (incendie généralisé, cas 4 et 5).

Les panaches de fumées dépassent le **SELS** pour **le HCN et le NO2** pour les **cas du scenario 2** (incendie généralisé, cas 4, 5 et 6).

Toutefois **la surhauteur d'origine thermique** disperse **verticalement le panache** et les retombées au sol sont donc trop faibles pour atteindre le SEI, et donc le SELS, au niveau du sol et des habitations.

7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] C. Chivas, « Toxicité et dispersion des fumées d'incendie », Rapport Ω-16, Réf. : INERIS – DRA – N° 46055-CL57149.

[2] G. HESKESTAD – « Engineering Relations for Fire Plumes » – Factory Mutual Research Corporation – Fire safety Journal, 7, 1984, pp 25-32.

[3] SFPE – Handbook of fire protection engineering – 3rd edition

[4] C. Dubien, E. Thollin,, « Modélisation de la dispersion des fumées en cas d'incendie ;STEF site de Vaulx Milieu (38) », REF : BV

[5] Guide d'application de l'arrêté ministériel du 11 Avril 2017.

[6] A. Carrau, « Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôt », Réf : INERIS – DRA-03 : « Spécificités des entrepôts au regard de l'incendie

Annexe 1 : Description du Code_Saturne

Description du Code_Saturne

1. DESCRIPTION DU CODE_SATURNE

Code_Saturne est le logiciel généraliste de mécanique des fluides numérique développé par EDF depuis 1997 (Archambeau, F., & al., 2003). Logiciel libre, il est basé sur une approche en volumes finis co-localisés, acceptant différents types de maillages (structuré ou non, conforme ou non, etc.) composés de divers éléments (tétraèdre, hexaèdre, pyramide, etc.). La version utilisée pour la présente étude, est la version la plus récente du logiciel, Code_Saturne 2.0.0-rc1.

Afin de donner au lecteur un bref aperçu théorique du logiciel, ce document en présente ici les grandes lignes, en renvoyant pour plus de détail au manuel théorique et au guide pratique de Code_Saturne.

1.1. Domaines d'application

Modélisant les écoulements incompressibles ou dilatables, avec ou sans turbulence ou transfert de chaleur, Code_Saturne dispose de nombreux modules spécifiques lui permettant d'être utilisé au sein d'EDF par différents cœurs de métiers, de la combustion aux écoulements polyphasiques. Son module atmosphérique est notamment dédié aux 'spécificités' atmosphériques. Par la résolution des équations de Navier-Stokes et de l'équation d'advection-diffusion en moyenne de Reynolds, Code_Saturne permet ainsi l'accès aux caractéristiques de l'écoulement (vitesse et champs turbulents) et au champ moyen de concentration en polluants atmosphériques.

1.2. L'atmosphère

La couche limite atmosphérique (CLA), où se situe l'essentiel de l'activité humaine, est la partie de la troposphère dont les paramètres sont directement influencés par la surface terrestre. Les principaux phénomènes la caractérisant sont :

- ✓ L'effet de la gravité
- ✓ L'influence de la pression sur la masse volumique
- ✓ L'accélération de Coriolis, due au mouvement relatif dans le repère en rotation de la Terre
- ✓ La présence du cycle diurne. Celui-ci entraîne des variations de température et de rayonnement au cours du temps.
- ✓ La turbulence atmosphérique, qui a une expression propre à la CLA
- ✓ L'existence de la couche limite de surface (CLS), zone de contact avec le sol.

1.3. Phénomènes physiques pris en compte

Approximation anélastique

Le fluide est considéré anélastique : sa masse volumique dépend de la pression, et il se refroidit par détente adiabatique. Cette hypothèse, dite aussi de convection profonde, revient à négliger le terme instationnaire dans l'équation de continuité. Cette approximation est intermédiaire entre celle de Boussinesq incompressible et celle de l'écoulement compressible, et ne permet pas en particulier la présence d'ondes acoustiques ou de chocs.

Turbulence atmosphérique

Plusieurs fermetures turbulentes sont implantées dans le code :

- ✓ La fermeture à zéro équation ou longueur de mélange
- ✓ La fermeture à une équation
- ✓ La fermeture à deux équations ou k-ε
- ✓ Les fermetures standards ont été adaptées pour s'appliquer à l'atmosphère
- ✓ Pour le modèle de longueur de mélange, un nombre de Richardson de couche est introduit. Il intervient dans l'expression de la viscosité turbulente.

Relief

Outre la présence d'obstacles ou de bâtiments, le Code_Saturne permet la présence de topographies complexes (falaises, vallées …). Code_Saturne permet l'utilisation de maillage non-structuré.
Par un passage en coordonnées curvilignes non-orthogonales, on se ramène à un maillage où le sol correspond à une surface de coordonnées, ce qui simplifie les conditions aux limites dans le cas du module atmosphérique. De plus, les lignes verticales sont conservées. La paramétrisation du rayonnement est donc facilitée, et la direction de la gravité reste privilégiée.

Conditions limites au sol et sur les parois

L'interface sol-atmosphère constitue une zone particulière où ont lieu des phénomènes spécifiques : échanges thermiques, échanges d'humidité … Afin de prendre en compte ces propriétés, une paramétrisation adaptée à la couche limite de surface (CLS) a été introduite.

Le frottement sur les parois peut être modélisé par une loi logarithmique rugueuse ou lisse de type atmosphérique, couplant la dynamique et la thermique.

Conditions météorologiques

Dans Code_Saturne, il est possible de définir les profils de turbulence et de vent conditionnant l'écoulement. Ce profil météorologique initialise le calcul et fixe les conditions aux limites.

Les précipitations ne sont pas prises en compte. Dans la version 2.0.0, la microphysique (cycle de l'eau) n'est pas prise en compte.

Dispersion de polluants

Dans ce code sont transportés des fractions massiques.

Code_Saturne permet donc de simuler la dispersion d'effluents non réactifs, grâce à l'utilisation de termes source adaptés. Ces injections de polluants peuvent avoir lieu sous forme d'un nuage instantané, d'un jet continu (conditions de Dirichlet) ou d'un rejet volumique (introduction d'un terme source dans les équations). Le rejet peut être dépendant du temps et orienté dans n'importe quelle direction.

Les fluides intervenant (milieu atmosphérique et rejet) doivent être non réactifs et de même phase thermodynamique. Code_Saturne permet d'étudier des liquides et des gaz, mais dans le module atmosphérique, seule la possibilité de phase gazeuse est offerte (air ou gaz parfait), avec toutefois la possibilité d'inclure des aérosols sous certaines conditions.

Equations traitées

Les équations considérées dans Code_Saturne sont les équations classiques de la mécanique des milieux continus fluides, pour des écoulements turbulents, exprimées à l'aide de la moyenne de Reynolds :

- ✓ L'équation de continuité
- ✓ L'équation de conservation de la quantité de mouvement
- ✓ L'équation de conservation de l'énergie
- ✓ L'équation de conservation d'un scalaire passif
- ✓ Ce système d'équations est fermé par un modèle de turbulence à zéro, une ou deux équations.

Il faut donc ajouter pour le modèle k-ε :

- ✓ L'équation de conservation de l'énergie cinétique de la turbulence
- ✓ L'équation de conservation de la dissipation de l'énergie cinétique de la turbulence

Et pour le modèle de longueur de mélange :

- ✓ L'expression de la viscosité dynamique turbulente
- ✓ Ces équations sont résolues par la méthode des pas fractionnaires, qui consiste à séparer la résolution numérique en différentes étapes (advection, diffusion et pression-continuité), et traitées par l'une des méthodes présentées dans l'étude des méthodes numériques du Code_Saturne.

Le transport des scalaires passifs peut également être calculé par une discrétisation en volumes finis.