



Bâtiment IRIS – Hall B
84, Rue Charles Michels
93200 SAINT-DENIS - France
Tél. 33 (0)1.42.43.16.66
Email : contact@fluidyn.com
<http://www.fluidyn.com>

**MODELISATION 3D DE LA DISPERSION
ATMOSPHERIQUE
ET
EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES LIES A UN
REJET DE FLUOR 18
-
Site CURIUM à Marseille**



RAPPORT D'ETUDE

Client	CURIUM
Représentant	Florian Lizé
Adresse	Biopôle Clermont-Limagne – 3 rue Marie Curie – 63360 Saint-Beauzire

Référence FLUIDYN	1120144
Nombre de pages	27

Version	Date	Pages modifiées	Rédaction
0	03/03/21	--	Malo LE GUELLEC

Sommaire

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS	4
II. SOLUTION PROPOSEE	4
II.1. Méthodologie	4
II.2. Approche numérique.....	5
II.3. Outil logiciel utilisé	5
III. INVENTAIRE DES EMISSIONS	6
IV. MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN	7
IV.1. Domaine de simulation.....	7
IV.2. Bâtiments en champ proche	8
IV.3. Description des enjeux	8
V. CONDITIONS METEOROLOGIQUES	9
V.1. Rose des vents	9
V.2. Profils verticaux en conditions limites.....	10
VI. MAILLAGE	11
VII. RESULTATS DE MODELISATION	12
VII.1. Ecoulements atmosphériques	12
VII.2. Cartographies des concentrations.....	13
VII.3. Cartographies des dépôts au sol	14
VIII. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE	16
VIII.1. Voies d'exposition	16
VIII.2. Evaluation des doses d'exposition et du risque sanitaire	16
VIII.2.1. Scénario d'exposition.....	16
VIII.2.2. Lois de calcul de dose.....	17
VIII.2.3. Résultats.....	18
IX. INCERTITUDES	19
IX.1. Incertitudes de la modélisation de la dispersion atmosphérique.....	19
IX.2. Incertitudes de l'évaluation des risques sanitaires	20
IX.3. Conclusions sur les incertitudes	20
X. CONCLUSION	21
XI. ANNEXE A : PRESENTATION DETAILLEE DU MODELE DE DISPERSION.....	22
XI.1. Principe général du logiciel <i>fluidyn</i> -PANACHE.....	22
XI.2. Intérêt de la modélisation 3D-CFD	23
XI.3. Principales équations du modèle de dispersion <i>fluidyn</i> -PANACHE.....	24

XI.4. Validation du logiciel <i>fluidyn</i> -PANACHE	24
XI.4.1. Passive dispersion validation	Erreur ! Signet non défini.
XI.4.2. Dense gas validation.....	Erreur ! Signet non défini.
XI.4.3. Wind flow validation	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Localisation du site Curium à Marseille	4
Figure 2: Localisation du rejet de Fluor18.....	6
Figure 3: Domaine de simulation	7
Figure 4: Maquette 3D de simulation	8
Figure 5 : Rose de vent retenue pour le site d'étude.....	9
Figure 6: Maillage 3D.....	11
Figure 7: Champ de vitesse au sol (Condition : Vitesse - 8.5 km/h, Direction - 225°N).....	12
Figure 8: Activité moyenne annuelle en F18 au niveau de sol	13
Figure 9: Activité moyenne annuelle en F18 à h=5m	13
Figure 10: Activité moyenne annuelle en F18 à h=8m	13
Figure 11: Dépôt instantané au sol de F18 (Bq/m ² .s).....	15

LISTE DES TABLES

Tableau 1 : Caractéristiques des rejets	7
---	---

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre de l'étude d'impact environnementale des rejets atmosphériques de radionucléides issus d'un cyclotron sur le site de Curium à Marseille des modélisations de la dispersion de Fluor 18 (F18) doivent être menées. Il s'agit de conduire une modélisation de la dispersion atmosphérique, du dépôt au sol en fonctionnement normal et de l'impact sanitaire associé aux teneurs en F18 sur les riverains du site pour trois types de population : Nourrissons / Enfants / Adultes.

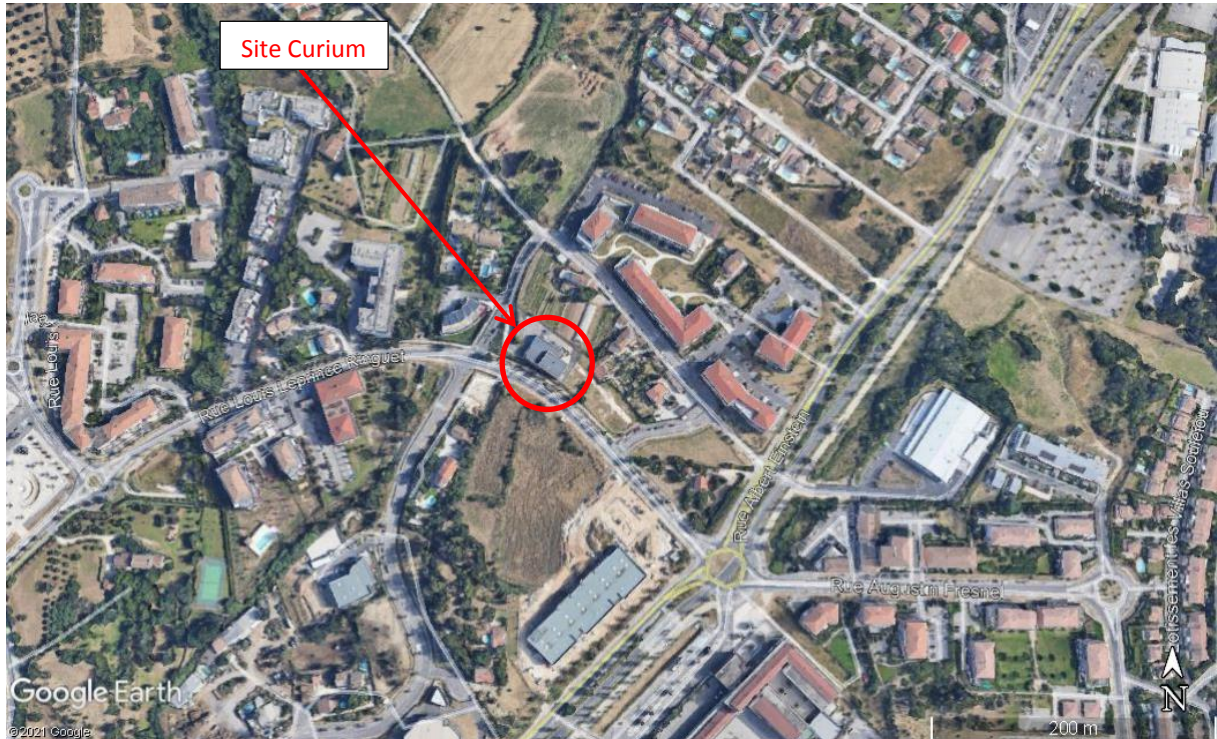


Figure 1: Localisation du site Curium à Marseille

II. SOLUTION PROPOSEE

II.1. METHODOLOGIE

Les étapes pour la réalisation de l'étude sont les suivantes :

1. Analyse des données de base du site : terrain, bâtiment, émission de l'installation, météorologie, sensibilité du milieu ;
2. Construction du modèle de simulation 3D comprenant les éléments suivants :
 - La maquette numérique : Il s'agit d'une représentation numérique de la réalité du site et de son environnement. La maquette comprend des éléments de terrain (topographie, obstacles, occupation des sols) et les sources d'émission de radionucléide;
 - Les conditions météorologiques en limite du domaine de calcul;
 - Le maillage numérique du domaine de calcul;
 - Les options de simulation.
3. Simulation des écoulements et de la dispersion 3D ;

4. Evaluation des enjeux et des voies d'exposition et Analyse de l'impact sanitaire: schéma conceptuel décrivant les relations entre les sources de polluants, les milieux et vecteurs de transfert, les usages et les populations exposées, estimation de la dose efficace totale et comparaison à la valeur limite d'exposition ;
5. Rapport d'étude: contexte, données, méthodologie et hypothèse, illustrations des résultats, conclusions chiffrées tabulées et cartographiées.

II.2. APPROCHE NUMERIQUE

Compte tenu du contexte précité, la modélisation vise à estimer les concentrations en phase aérienne et les dépôts au sol en F18 dans l'environnement attribuables à l'installation. Une des particularités de l'installation est qu'elle est située dans un environnement au bâti complexe qui impose le recours à la modélisation 3D-CFD de la dispersion atmosphérique. En effet, il peut être essentiel dans ce contexte, pour les quantifications demandées d'avoir recours à des simulations tridimensionnelles (dite Eulériennes) des écoulements, de la turbulence et de la dispersion.

En règle générale, ces modélisations fines sont les seules capables de simuler correctement les effets d'obstacle ou du relief et les niveaux de turbulence locaux ce que des codes de type gaussien par exemple sont incapable de reproduire. Ceci est particulièrement vrai en champ proche.

Pour ce type de configuration, FLUIDYN France utilise le logiciel Fluidyn-PANACHE outil dédié aux modélisations 3D de dispersion atmosphérique.

FLUIDYN France a développé depuis 1997 et utilise de façon intensive ses propres outils de simulations 3D de dispersion dans les contextes accidentels et chroniques. Son expertise dans le domaine de la modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants est forte. FLUIDYN fait à ce titre parti du groupe de travail national du ministère sur la dispersion atmosphérique 3D piloté par l'INERIS. FLUIDYN France est notamment un des rédacteurs principaux du guide de bonnes pratiques pour la dispersion atmosphérique 3D (Guide GT3D) paru en 2015 puis révisé en 2019.

II.3. OUTIL LOGICIEL UTILISE

Tous les éléments de quantification sont réalisés à partir des outils développés et mis en œuvre par FLUIDYN. Ainsi, la modélisation de la dispersion atmosphérique proposée est menée avec l'outil dédié **Fluidyn-PANACHE** version 5.2.4, pour permettre l'intégration de la complexité topographique et de bâti du site et des alentours.

Le logiciel **fluidyn-PANACHE** de mécanique des fluides est un logiciel dit de CFD (Computational Fluid Dynamics) qui est dédié à la modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants gazeux et particulaires. **fluidyn-PANACHE** simule la dispersion des polluants à l'aide de la résolution tridimensionnelle des équations de la mécanique des fluides (la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, la turbulence atmosphérique et le transport des espèces) avec une approche RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations). Il permet de simuler différentes durées de

fonctionnement d'une installation (de quelques minutes à plusieurs années) en utilisant les conditions météorologiques représentatives du site.

La résolution de l'aérodynamique et du transfert des polluants s'effectue sur un maillage non structuré dit 'curviligne' qui a la particularité d'épouser les dénivellations du relief et des bâtiments. Par ailleurs, la rugosité du terrain est modélisée en fonction des zones traversées (forêt, zone urbaine, terrain nu, etc.). Le logiciel peut intégrer tout type de source de pollution (ponctuelle, linéaire, surfacique, volumique,...). **fluidyn-PANACHE** est doté d'un modèle de turbulence atmosphérique élaboré qui permet de précisément déterminer les conditions de dispersion des polluants émis dans l'atmosphère. Il permet d'estimer au mieux les conditions de mélanges turbulents et de dilution des produits dispersés en 3D (dans chaque maille de calcul). A la différence des modélisations simplifiées de type gaussiennes, les coefficients de diffusion sont donc le résultat d'un calcul local et non pas imposés.

III. INVENTAIRE DES EMISSIONS

L'établissement rejette une certaine quantité de Fluor18 dans l'atmosphère au travers d'une cheminée située en toiture du bâtiment.



Figure 2: Localisation du rejet de Fluor18

Les caractéristiques du rejet transmises par Curium sont les suivantes.

Tableau 1 : Caractéristiques des rejets

Paramètres	Valeurs
Hauteur	7.90 m
Débit total	10 000 m ³ /h
Activité de F18	66 GBq de rejet annuel soit 750 Bq/m ³
Activité de F18 maximale prise en compte dans l'étude	120 GBq de rejet annuel soit 1370 Bq/m ³
Section de la cheminée	0.65 m ²
Vitesse de rejet	4.3 m/s
Orientation du rejet	Verticale (pas d'orientation de la bouche de sortie)
Température	Ambiante

IV. MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

IV.1. DOMAINE DE SIMULATION

Le site se trouve Rue Louis Leprince Ringuet dans la partie Nord de Marseille sur la parcelle cadastrale 0158 dans une zone périurbaine.

La zone d'intérêt de l'étude est le voisinage direct du site, soit quelques centaines de mètres depuis la cheminée de rejet de Fluor18.

Le domaine de simulation pris en compte doit être suffisamment grand pour considérer les éventuels physiques environnants susceptibles d'influencer la dispersion atmosphérique au niveau de la zone d'émission.

Les dimensions du domaine d'étude sont de 1000 m x 1000m x 200m centré sur le rejet de F18.

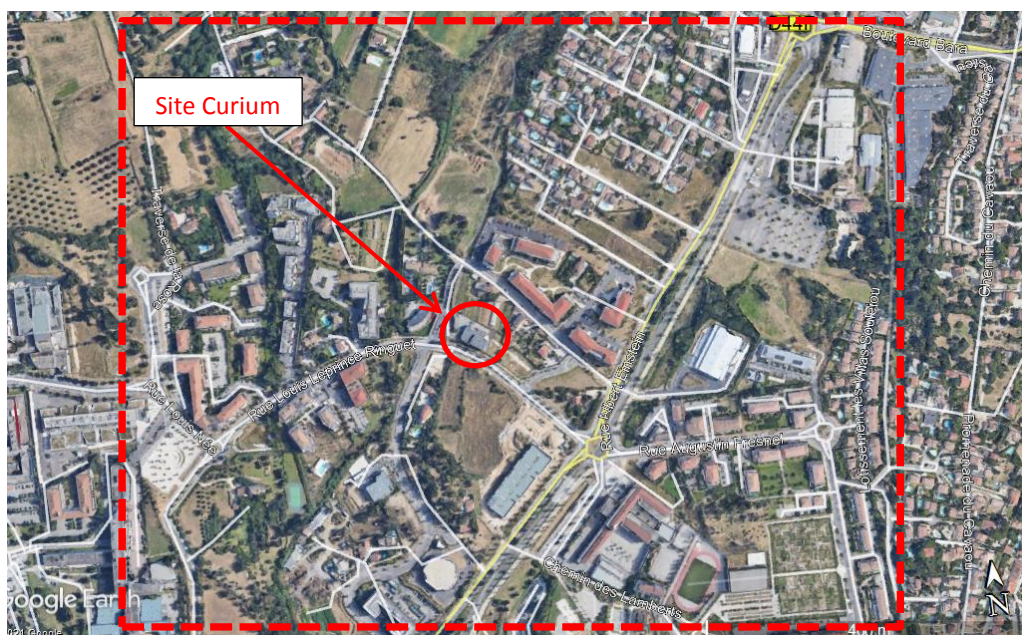


Figure 3: Domaine de simulation

Compte tenu du faible relief autour du site, le terrain est considéré comme plat dans le domaine d'étude.

Une rugosité moyenne de 0.1 m est appliquée dans l'ensemble du domaine. Elle représente l'influence moyenne des différents obstacles présents dans le domaine d'étude (habitations, jardins, champs,...).

IV.2. BATIMENTS EN CHAMP PROCHE

La géométrie 3D des bâtiments est utilisée pour représenter plus précisément les perturbations et les éventuelles zones de recirculation d'air en champ proche, où les concentrations du rejet peuvent être importantes.

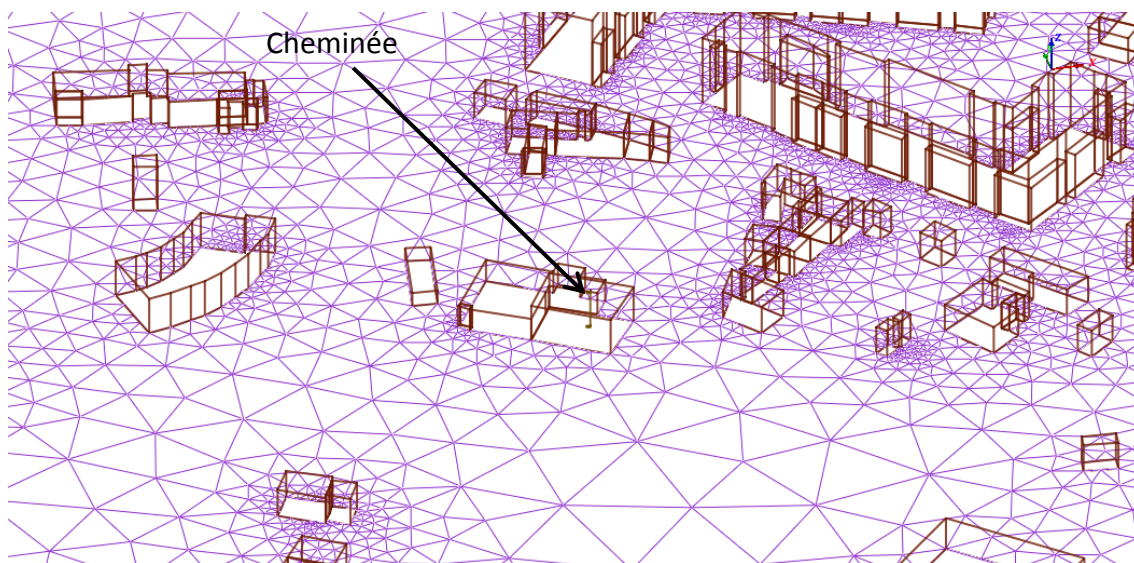


Figure 4: Maquette 3D de simulation

Compte tenu de la topographie peu marquée dans la zone d'étude (dénivelé maximal d'une dizaine de mètres), le terrain est considéré comme plat dans tout le domaine de simulation.

IV.3. DESCRIPTION DES ENJEUX

Dans un périmètre de 500 m autour du site, l'habitat consiste à un mélange d'immeuble de de maisons avec jardins. Les principaux enjeux sensibles autour du site de Curium sont les suivants :

- L'habitation la plus proche est située à 27 m du rejet de Fluor18;
- Une maison à proximité directe au Nord du site dispose d'une surface significative de cultures ;
- Un seul établissement recevant du public est recensé, le collège André Malraux situé à environ 300 m du rejet.



V. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

V.1. ROSE DES VENTS

La rose des vents, en un lieu donné, est la représentation graphique des fréquences des vents classées par direction et vitesse.

La rose des vents représentative des conditions météorologiques dans la zone d'étude est présentée ci-après.

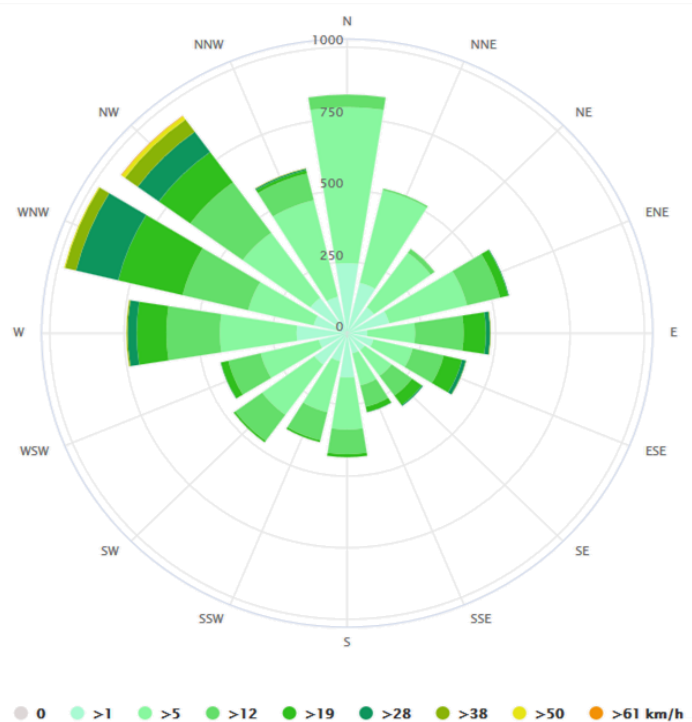


Figure 5 : Rose de vent retenue pour le site d'étude

Dans le cadre d'une étude d'impact sanitaire sur le plan de la qualité de l'air, il est important d'utiliser un nombre suffisant de conditions météorologiques locales afin d'être représentatif d'une situation d'exposition en moyenne annuelle. C'est pourquoi la méthodologie utilisée repose sur la construction des expositions en moyenne annuelle par sommation pondérée des résultats obtenus pour un nombre important de conditions météorologiques modélisées.

Le tableau suivant présente les caractéristiques des 61 scénarios météorologiques choisis pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants et de l'évaluation de l'impact moyen annuel. Les conditions dont la fréquence est inférieure à 0.1% sont jugées non significatives pour l'étude d'impact.

Direction du Vent (°N)	Vitesse du vent					
	0-5 km/h	5 - 12 km/h	12 - 19 km/h	19 - 38 km/h	38 - 50 km/h	> 50 km/h
0	2.80%	6.22%	0.50%	-	-	-
22.5	2.07%	3.80%	-	-	-	-
45	1.28%	2.68%	0.18%	-	-	-
67.5	1.67%	3.07%	1.30%	0.35%	-	-
90	0.78%	1.84%	1.86%	1.02%	-	-
112.5	1.04%	1.55%	1.22%	0.88%	-	-
135	0.84%	1.27%	0.97%	0.51%	-	-
157.5	0.83%	1.31%	0.88%	0.23%	-	-
180	1.77%	2.08%	0.98%	0.13%	-	-
202.5	1.15%	2.09%	1.15%	-	-	-
225	1.55%	2.48%	1.28%	-	-	-
247.5	1.12%	2.29%	1.28%	0.31%	-	-
270	1.94%	2.95%	2.05%	1.48%	-	-
292.5	1.32%	2.58%	2.59%	4.21%	0.43%	-
315	1.75%	3.21%	2.49%	2.50%	0.61%	-
337.5	1.50%	3.96%	1.10%	0.19%	-	-

Les principaux résultats de l'analyse de la rose des vents montrent que :

- les vents sont majoritairement au secteur Nord-Ouest (28% des vents sont entre 292.5 et 337.5°N);
- les vents les plus fréquents (43.4 %) ont une vitesse comprise entre 5 et 12 km/h ;
- les vents faibles (<5km/h) ont une fréquence de 23.4 %;
- les vents modérés à forts (>19 km/h) ont une fréquence de 13.1% et proviennent très majoritairement du secteur Nord-Ouest.

La pluviométrie locale retenue pour l'étude correspond à la moyenne des 3 dernières années (2018-2020) et s'élève à environ 650 mm annuel.

V.2.PROFILS VERTICAUX EN CONDITIONS LIMITES

La représentation détaillée de la CLA (Couche Limite Atmosphérique) est extrêmement complexe. Aussi, il est important de recentrer cette représentation sur les objectifs de modélisation d'une dispersion proche sol jusqu'à 200 ou 300 m d'altitude.

Dans les cas étudiés, le profil de vitesse et température de vent classiquement représenté sous la logarithmique avec correction selon la stabilité, fondé par la théorie de la similarité Monin-Obukhov. Le profil vertical turbulent a été défini selon les lois de Han-Arya.

La turbulence générée par les obstacles est prédite localement par le modèle de turbulence (en général un modèle de type k-eps). La turbulence atmosphérique est fixée par la classe de stabilité au travers des profils entrants de turbulence (énergie cinétique de turbulence et dissipation turbulente). Les obstacles pilotent très certainement le mélange dans leur proximité immédiate (ce qui est le cas dans la présente étude en milieu périurbain en raison des nombreux bâtiments en champ proche de la zone d'émission), la turbulence atmosphérique reste en revanche le vecteur de mélange principal en dehors de la zone d'influence des obstacles. En raison du caractère champ proche de l'étude et de la présence des bâtiments, un profil vertical de type neutre sera retenu pour l'étude (une stabilité de type neutre est l'état moyen le plus couramment rencontré en basse couche dans l'atmosphère).

VI. MAILLAGE

Le maillage est la discrétisation spatiale du domaine de calcul. Il doit être suffisamment fin pour permettre la bonne représentation des phénomènes physiques significatifs pour le processus de la dispersion atmosphérique que l'on souhaite modéliser ici.

La figure suivante donne une représentation du maillage 3D. Il est constitué de 492 102 cellules réparties en 18 927 mailles par plan horizontal sur 26 couches verticales. Les mailles les plus petites mesurent 0.3 m² au niveau de la section de l'exutoire.

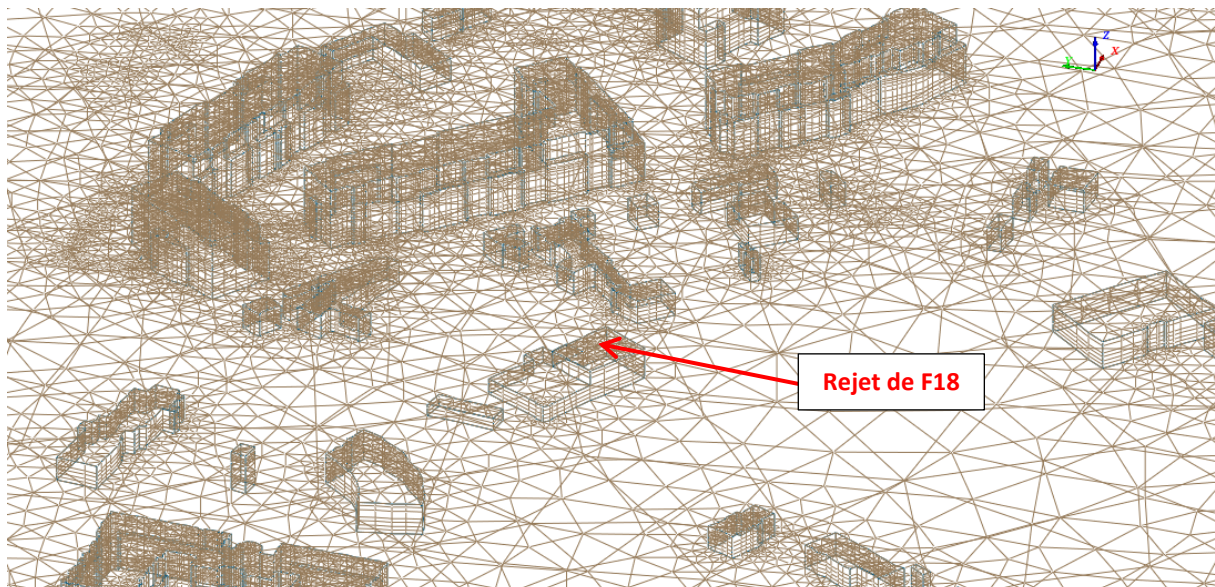


Figure 6: Maillage 3D

VII. RESULTATS DE MODELISATION

Les résultats de modélisation sont exprimés sous forme de :

- Activité de Fluor18 en moyenne annuelle exprimée en Bq/m^3 ;
- Dépôt au sol de Fluor 18 exprimé en $Bq/m^2.s$.

Les résultats sont présentés sous forme de cartographies et de tableaux.

VII.1. ECOULEMENTS ATMOSPHERIQUES

Pour l'ensemble des conditions météorologiques retenues pour la modélisation de l'impact du rejet, les champs 3D d'écoulements atmosphériques sont calculés dans le domaine d'étude. Le solveur CFD utilisé permet ainsi de simuler les perturbations locales de l'écoulement induites par les différents obstacles.

L'image suivante illustre un résultat de champ de vent pour une des conditions météorologiques simulées.

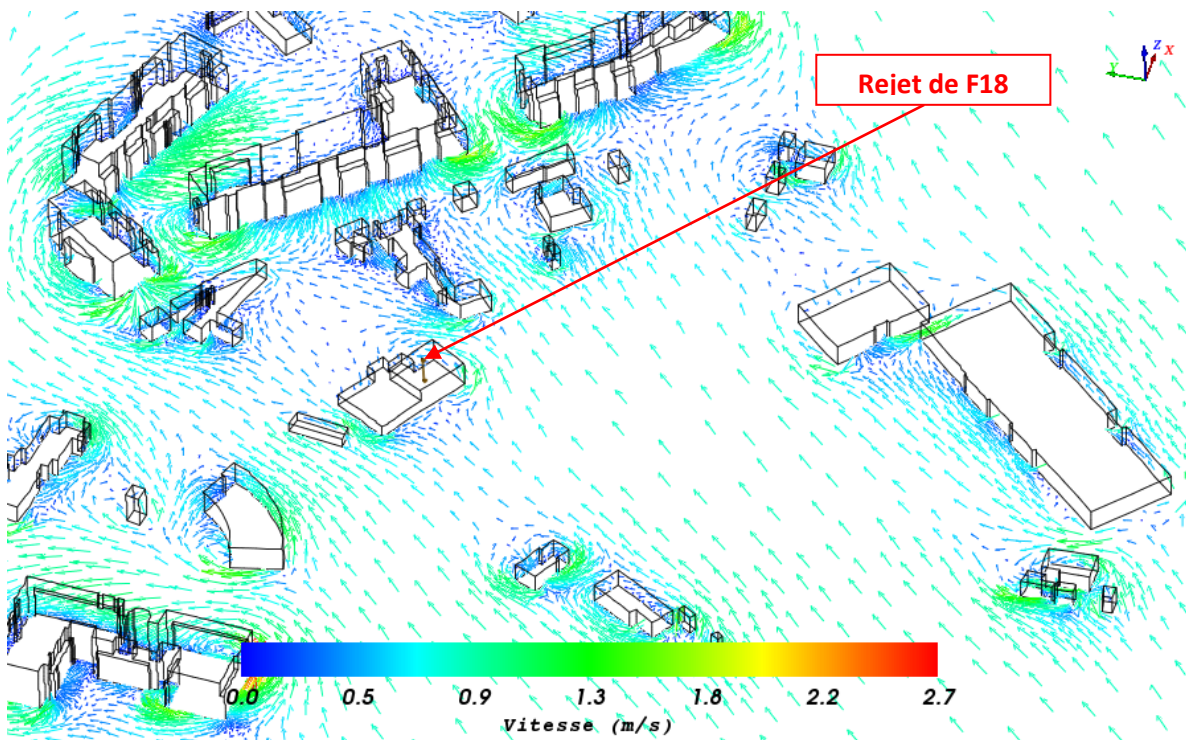


Figure 7: Champ de vitesse au sol (Condition : Vitesse - 8.5 km/h, Direction - 225°N)

Sur ces écoulements atmosphériques, le rejet de F18 a été dispersé afin d'évaluer les teneurs dans l'air ambiant autour de l'installation.

VII.2. CARTOGRAPHIES DES CONCENTRATIONS

Les résultats de modélisation permettent d'identifier les activités volumiques (Bq/m^3) moyennes dans l'air au niveau de sol et en hauteur associées à la dispersion de Fluor 18.

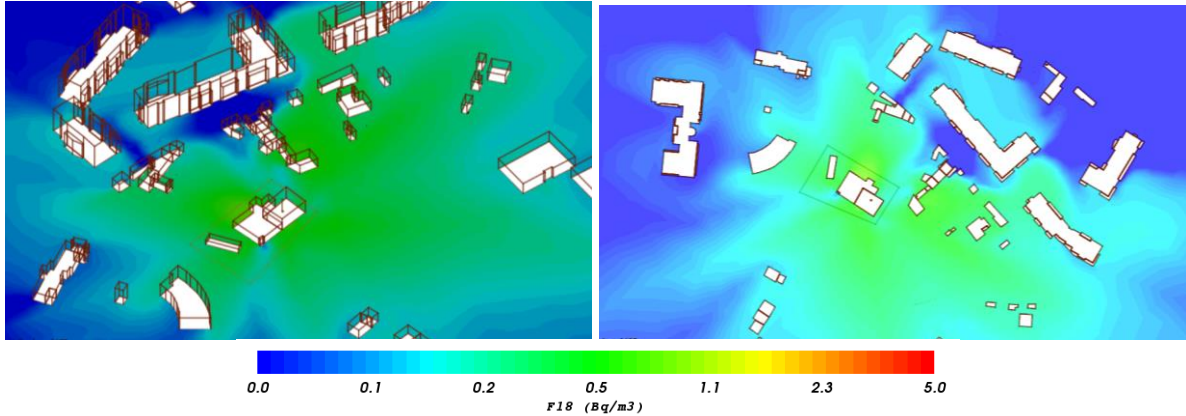


Figure 8: Activité moyenne annuelle en F18 au niveau de sol

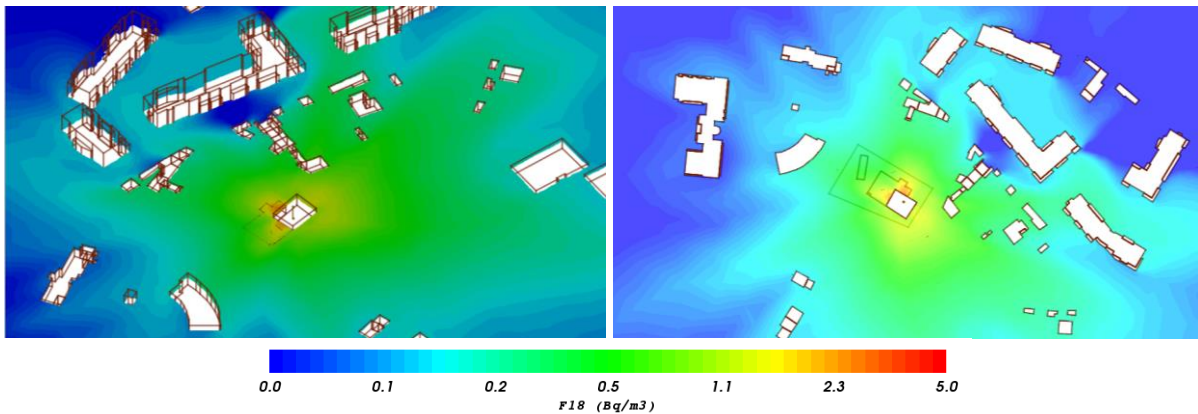


Figure 9: Activité moyenne annuelle en F18 à $h=5\text{m}$

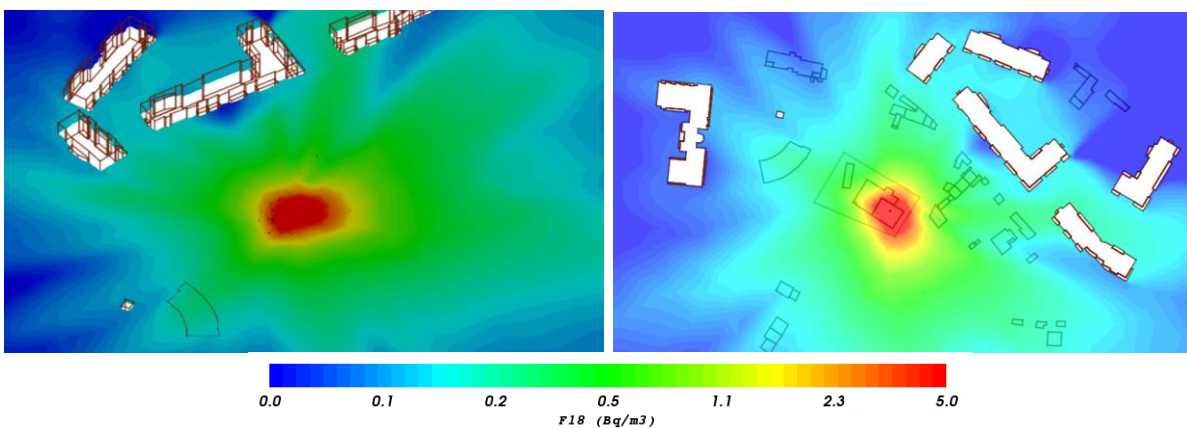


Figure 10: Activité moyenne annuelle en F18 à $h=8\text{m}$

Le tableau suivant présente les activités en moyenne annuelle de Fluor 18 au niveau de la zone la plus exposée et au niveau du bâtiment le plus exposé en dehors de la limite de site pour différentes hauteurs.

Hauteur (m)	Activité en moyenne annuelle du Fluor 18 (Bq/m ³)	
	Sur la zone la plus exposée	Sur le bâtiment le plus exposé
0	0.73	0.55
5	1.45	0.95
8	6.10	1.50

VII.3. CARTOGRAPHIES DES DEPOTS AU SOL

Concernant le Fluor 18, les calculs permettent l'évaluation des dépôts sec et humide sur sol.

- Dépôts secs: les particules très fines et les gaz se déposent sur les surfaces par divers processus biologiques, chimiques et physiques. Le paramètre qui influence les dépôts secs est la vitesse de dépôt, exprimée en m/s. Cette vitesse permet de tenir compte de la capacité du sol à retenir le polluant qui se dépose.
La vitesse de dépôt sec utilisé est de 0.5 cm/s.
- Dépôt humides : es dépôts humides correspondent aux dépôts de polluant au sol entraînés par la pluie. Les calculs de dispersion qui intègrent le lessivage par la pluie prennent en compte un coefficient de lessivage exprimé en s⁻¹, correspondant à la proportion du polluant qui est entraîné par la pluie pendant 1 seconde en fonction de la pluviométrie locale. La constante de proportionnalité de lavage utilisé pour l'étude est de $2 \cdot 10^{-4}$ (h/mm). s⁻¹.

Les résultats sont présentés en dépôt total instantané (Bq/m².s) et en dépôt total cumulé (Bq/m²) au bout de un an de rejet. En raison de la demi-courte du Fluor18, l'accumulation au bout de une année est faible.

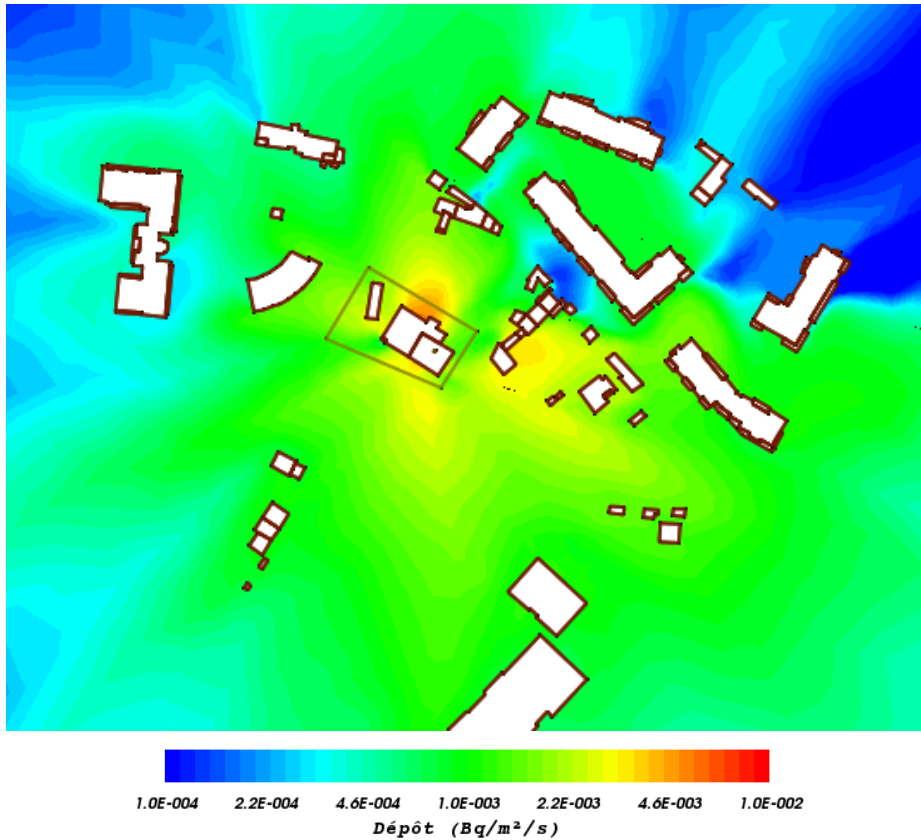


Figure 11: Dépôt instantané au sol de F18 (Bq/m².s)

Le tableau suivant présente les activités déposées de Fluor 18 au niveau de la zone la plus exposée et au niveau du bâtiment le plus exposé.

	Dépôt de F18 (Bq/m ² .s)	Dépôt de F18 cumulé sur un an (Bq/m ²)
Sur la zone la plus exposée	$4.9 \cdot 10^{-3}$	46.5
Sur le bâtiment le plus exposé	$3.7 \cdot 10^{-3}$	35.1

VIII. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE

Les effets d'un rayonnement ionisant dépendent de sa nature, de la dose absorbée, de l'organe touché. Des doses importantes qui peuvent être bénéfiques quand elles sont brèves et localisées comme en radiothérapie provoquent des effets bien identifiés. Suivant la dose reçue et le type de rayonnements, les effets peuvent être plus ou moins néfastes pour la santé.

VIII.1. VOIES D'EXPOSITION

De façon générale, l'exposition des personnes vivant au voisinage d'une installation émettrice de substances radioactives dans l'atmosphère peut se produire :

- lors du passage du panache;
 - exposition interne par inhalation
 - exposition externe par irradiation
- par les dépôts sur le sol;
 - exposition externe par irradiation
- par la consommation des végétaux exposés aux dépôts d'aérosols lors du passage du panache et de la pluie, ainsi que les transferts racinaires depuis les dépôts sur le sol;
 - exposition interne par ingestion
- par la consommation de produits d'origine animale provenant d'élevages qui ont consommé des produits issus des zones de dépôt.
 - exposition interne par ingestion

Dans le cas du site de Curium à Marseille, le fluor 18 rejeté présente une période radioactive courte (période radioactive de 110 minutes). Par conséquent, les phénomènes d'accumulation dans l'environnement et de transfert dans la chaîne alimentaire peuvent donc être considérés comme non significatifs. L'exposition par consommation des végétaux et des produits animaux (exposition interne par ingestion) ne sera donc pas retenue.

Dans le cadre de l'étude de l'impact sanitaire du rejet de F18 depuis le site de curium à Marseille, les voies d'exposition retenues sont donc :

- **L'exposition interne par inhalation ;**
- **L'exposition externe par irradiation (exposition externe par irradiation du panache et des dépôts).**

VIII.2. EVALUATION DES DOSES D'EXPOSITION ET DU RISQUE SANITAIRE

VIII.2.1. Scénario d'exposition

L'impact sanitaire radiologique du rejet de fluor18 sur les riverains du site est calculé pour trois types de population :

- Nourrissons (1 à 2 ans)
- Enfants (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)
- Adultes (17 ans et plus).

Le calcul d'exposition est mené pour les zones suivantes :

- la zone en dehors des limites de site la plus exposée ;
- la zone habitée la plus exposée.

En l'absence de données sur le temps passé par les populations dans et en dehors du domaine d'étude, il est considéré dans une approche majorante que les populations séjournent 24h/24, 7j/7 et 365 j/an sur les zones étudiées.

En outre, pour chacune des zones étudiées, l'activité maximale en F18 modélisée toute altitude confondue au droit de la zone a été retenue pour le calcul des doses par irradiation du panache et par inhalation. Il n'est également pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis à vis de l'exposition.

Pour l'exposition annuelle externe par les dépôts, l'accumulation des dépôts est intégrée sur un an.

VIII.2.2. Lois de calcul de dose

Le tableau suivant présente les formules de calcul de doses efficaces et les différents paramètres retenus pour chaque voie d'exposition des cibles au Fluor18.

	Exposition externe par irradiation du panache	Exposition externe par irradiation du dépôt	Exposition interne par inhalation
Dose efficace annuelle	$D_{pan} = A_{air} \times CD_{pan} \times F_{tp} \times t$	$D_{dep} = A_{dep} \times [(1 - \exp(-\lambda \times t)) / \lambda] \times CD_{dep} \times F_{tp} \times t$	$D_{inh} = A_{air} \times M_{resp} \times CD_{inh} \times F_{tp} \times t$
Liste des paramètres	<p>D_{pan} : Dose efficace annuelle par irradiation du panache (Sv/an)</p> <p>A_{air} : Activité dans l'air ambiant (Bq/m³)</p> <p>CD_{pan} : Coefficient de dose efficace externe par irradiation du panache ((Sv/s)/(Bq/m³))</p> <p>F_{tp} : Fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache (-)</p> <p>t : Durée d'exposition (s)</p>	<p>D_{dep} : Dose efficace annuelle par irradiation du dépôt (Sv/an)</p> <p>A_{dep} : Activité déposée sur le sol (Bq/m².s),</p> <p>CD_{dep} : Coefficient de dose efficace externe par irradiation du dépôt ((Sv/s)/(Bq/m²))</p> <p>F_{tp} : Fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition externe au dépôt (-)</p> <p>t : Durée d'exposition (s)</p> <p>λ : Constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s⁻¹)</p>	<p>D_{inh} : Dose efficace annuelle par inhalation (Sv/an)</p> <p>A_{air} : Activité dans l'air ambiant (Bq/m³)</p> <p>M_{resp} : Débit respiratoire de l'individu (m³/h),</p> <p>CD_{inh} : Coefficient de dose efficace par inhalation (Sv/Bq),</p> <p>F_{tp} : Fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition interne par inhalation (-).</p> <p>t : Durée d'exposition (h)</p>
Valeurs des paramètres pour le Fluor 18¹	<p>$CD_{pan} = 4.90 \times 10^{-14}$ (Sv/s-)/(Bq/m³)</p> <p>$t = 31536000$ s (1 an)</p> <p>$F_{tp} = 1$</p>	<p>$\lambda = 1.05 \times 10^{-4}$</p> <p>$CD_{dep} = 1.01 \times 10^{-15}$ (Sv/s)/(Bq/m²)</p> <p>$t = 31536000$ s (1 an)</p> <p>$F_{tp} = 1$</p>	<p>M_{resp} (1-2 ans) = 0.22 m³/h</p> <p>M_{resp} (7-12 ans) = 0.64 m³/h</p> <p>M_{resp} (Adulte) = 0.96 m³/h</p> <p>CD_{inh} (1-2 ans) = 3.10×10^{-10} (Sv/Bq)</p> <p>CD_{inh} (7-12 ans) = 1.00×10^{-10} (Sv/Bq)</p> <p>CD_{inh} (Adulte) = 5.90×10^{-11} (Sv/Bq)</p> <p>$F_{tp} = 1$</p> <p>$t = 8760$ h</p>

¹ L'ensemble des paramètres relatifs au fluor 18 sont issus de la plateforme ECRIN (<https://ecrin.irsn.fr/>).

VIII.2.3. Résultats

Le tableau suivant présente les résultats des calculs de doses efficaces annuelles au niveau de la zone la plus exposée et du bâtiment le plus exposé.

	Unité	Zone la plus exposée			Bâtiment le plus exposé		
		Nourrisson (1 à 2 ans)	Enfant (7 à 12 ans)	Adulte	Nourrisson (1 à 2 ans)	Enfant (7 à 12 ans)	Adulte
Dose externe (irradiation panache et dépôts au sol)	mS/an	1.09E-02	1.09E-02	1.09E-02	3.44E-03	3.44E-03	3.44E-03
Dose interne par inhalation	mS/an	3.64E-03	3.42E-03	3.03E-03	8.96E-04	8.41E-04	7.44E-04
Dose efficace totale	mS/an	1.46E-02	1.43E-02	1.39E-02	4.33E-03	4.28E-03	4.18E-03

Les résultats indiquent que l'impact sanitaire est essentiellement dû à l'exposition externe par irradiation.

La dose efficace annuelle maximale reçue par les populations associée au rejet de Fluor18 par le site de Curium Marseille est largement inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique (1.46% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

IX. INCERTITUDES

L'évaluation du Risque Sanitaire (ERS) radiologique a été conduite dans les règles de l'art, en l'état des connaissances disponibles, en utilisant les méthodes et les données recommandées par les organismes experts.

La démarche menée s'accompagne nécessairement d'une part d'incertitudes qui proviennent de lacunes des données et de l'obligation de fixer des hypothèses. Dans une approche majorante et sécuritaire, les hypothèses ont été fixées autant que possible dans le but de privilégier une surestimation des risques radiologiques.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales incertitudes parmi lesquelles :

- Les incertitudes liées à la modélisation de la dispersion atmosphérique,
- Les incertitudes liées à l'évaluation des risques sanitaires.

IX.1. INCERTITUDES DE LA MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Ces incertitudes proviennent :

- des hypothèses concernant les données d'entrée du modèle ;
- du modèle lui-même, qui bien que résolvant les équations de la mécanique des fluides et une grande partie des phénomènes physiques en jeu dans le transport et la dispersion des polluants, comportent un certain paramétrage et des coefficients.

Les hypothèses sur les données du modèle sont notamment :

- Les caractéristiques du rejet (Débit constant, concentration, température...);
- le choix de données météorologiques représentatives, mais pas issues d'une station de mesures implantée exactement sur le site;
- les discontinuités des directions de vent de la rose des vents ;
- le choix d'un coefficient de rugosité pour l'ensemble du domaine (zones d'habitat, jardins, immeubles...);
- le détail des caractéristiques géométriques des obstacles.

Les principales incertitudes du modèle sont :

- la représentativité des conditions aux limites ;
- la représentativité de la maquette numérique ;
- les valeurs des coefficients du modèle de turbulence, de la vitesse de dépôt,...

Il faut cependant souligner que :

- A l'inverse des approches gaussiennes, le modèle CFD n'a pas de limite sur le champ proche et permet de prendre en compte les obstacles,
- Les paramètres du modèle sont issus de l'état de l'art actuel des connaissances.
- Le modèle a fait l'objet de nombreuses validations par comparaison à des données expérimentales (cf Annexe A : Présentation détaillée du modèle)

IX.2. INCERTITUDES DE L'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES

De façon générale, la méthodologie pour évaluer les risques sanitaires est par nature conservatrice et sécuritaire.

Les principales incertitudes de l'ERS sont :

- La non prise en compte des déplacements au sein et en dehors du domaine d'étude
- Une exposition 24h/24, 7j/7 et 365 j/an ;
- La non prise en compte de la protection assurée par les bâtiment (taux de pénétration dans les habitats de 100 %)
- Les nombreux facteurs relatifs à la diversité génétique (métabolisme, sensibilité au polluant, ...), au mode de vie (régime alimentaire, sédentarité,...), à l'état de santé (immunodéficience, ...) qui peuvent faire varier le risque sanitaire pour les populations exposées.

IX.3. CONCLUSIONS SUR LES INCERTITUDES

La dose efficace maximale évaluée dans l'étude est un indicateur de l'impact radiologique modélisé en l'état des connaissances techniques actuelles.

L'ensemble des choix méthodologiques faits à chaque étape de l'étude ainsi que les différentes hypothèses de calculs prises ou encore le choix des valeurs des paramètres rendent peu probable une sous-estimation du risque sanitaire pour les populations.

X. CONCLUSION

Dans le cadre de l'étude d'impact environnementale des rejets atmosphériques de radionucléides issus d'un cyclotron sur le site de Curium à Marseille, une modélisation de la dispersion de Fluor 18 (F18) et une évaluation des risques sanitaires associés pour les riverains du site ont été réalisées.

Compte tenu des propriétés du Fluor 18, les voies d'exposition retenues dans l'étude sont :

- L'exposition externe par irradiation (panache et dépôts) ;
- L'exposition interne par inhalation.

Les calculs de doses efficaces totales ont été menés au niveau de la zone la plus exposée et du bâtiment le plus exposé en dehors des limites de site.

Quels que soient la zone étudiée et le profil de population (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 7 à 12 ans ou adulte), la dose efficace annuelle totale due au rejet de Fluor 18 est largement inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique (1.46% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

XI. ANNEXE A : PRESENTATION DETAILLEE DU MODELE DE DISPERSION

XI.1. PRINCIPE GENERAL DU LOGICIEL *FLUIDYN-PANACHE*

fluidyn-PANACHE est un logiciel dit de CFD (Computational Fluid Dynamics) qui est dédié à la modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants gazeux et particulaires.

fluidyn-PANACHE un logiciel de modélisation de la pollution atmosphérique qui permet de répondre à l'ensemble des éléments demandés par la législation française sur la qualité de l'air et européenne, et de fournir les éléments indispensables à :

- l'évaluation des risques sanitaires d'une installation industrielle (concentration, dépôts),
- l'évaluation de l'impact d'une installation nucléaire,
- l'évaluation de l'impact olfactif d'un site (concentration d'odeurs, fréquences de dépassement de seuil),
- l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air d'un projet d'infrastructure de transport (route, port, tramway...).

fluidyn-PANACHE permet de simuler l'impact de différentes durées de fonctionnement d'une installation (de quelques minutes à plusieurs années) à différentes échelles (du champ très proche jusqu'à plusieurs kilomètres). *fluidyn-PANACHE* peut intégrer pour cela les sources multiples relatives aux inventaires d'émissions (sources ponctuelles industrielles, linéiques (réseau routier), surfaciques (urbain, biogénique...) et multi-espèces, gaz, poussières et produits radioactifs.

Pour la météorologie, *fluidyn-PANACHE* peut modéliser la dispersion des polluants atmosphériques pour une situation météorologique fixée par l'utilisateur (modélisation pour une vitesse de vent et une direction de vent données) ou réaliser une modélisation statistique depuis une rose des vents, un échantillon mensuel, des variations diurnes ou saisonnières. Il s'agit dans ce cas de modéliser la dispersion des polluants en prenant en compte les fréquences d'occurrence d'une rose des vents ou une séquence météorologique. Il est alors possible de calculer des moyennes annuelles/mensuelles, des maxima ou des fréquences de dépassement de seuil.

L'outil *fluidyn-PANACHE* fournit ces modélisations à fine échelle sur des domaines précis et des maillages non structurés, non uniforme, curvilignes pour capturer dans le détail les reliefs et les bâtiments/obstacles de la zone d'étude, comme les sources quel que soit leur géométrie. La dispersion opère en approche Eulérienne, en stationnaire (par exemple sur rose des vents) ou en transitoire pour la modélisation d'épisodes (transitoires de sources et de météo).

Les résultats obtenus avec *fluidyn-PANACHE* peuvent être présentés sous forme cartographique mais aussi en des exports numériques compatibles avec la plupart des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

XI.2. INTERET DE LA MODELISATION 3D-CFD

Principe de base de la dispersion

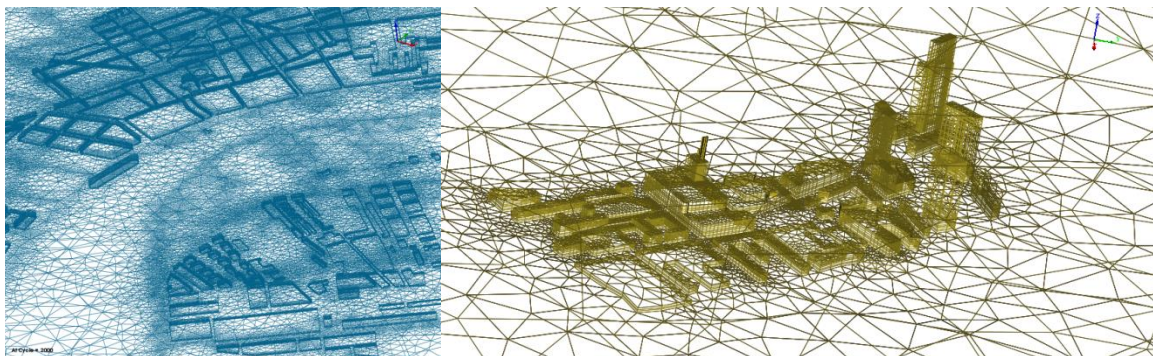
La dispersion et le transport de matières dans l'atmosphère est régie par deux agents (vecteurs) le vent et la turbulence. Les concentrations dans les panaches produits sont quantifiées par la résolution d'une équation de transport de matières où la variation locale de concentration dans le temps et en chaque point de l'espace ou parcelle d'air est fonction des flux entrants et sortants dus au vent (convection) et à la turbulence (diffusion et brassage turbulent). Il est donc théoriquement nécessaire de connaître au préalable et en tout point du domaine le champ de vent 3D et les champs de turbulence.

Approche numérique

Dans le cas d'une modélisation de type CFD, les champs de vents et de turbulence simulés et exploités pour la dispersion sont produits par la résolution explicite des équations complètes de la mécanique des fluides (CFD Navier-Stokes). Un modèle CFD est une représentation numérique des lois physiques d'écoulement et d'interaction avec l'environnement car il n'y a pas d'approximation empirique prédéterminée (comme dans une approche gaussienne). Les équations utilisées sont les mêmes que pour un calcul d'écoulement aéronautique ou nucléaire et ne peuvent être plus précises.

Maillage

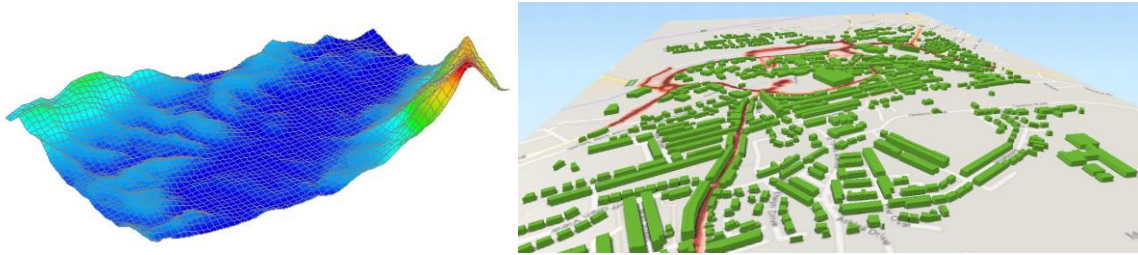
Ces équations sont résolues dans un domaine de calcul discrétisé. Cela signifie que le domaine d'intérêt est reproduit numériquement et décomposé en un certain nombre d'éléments volumiques unitaires, les mailles. L'ensemble de ces mailles constitue le maillage.



Exemple de maillage non-structuré

Topographie et obstacles

Les modèles CFD ont un net avantage par rapport à d'autres approches calculatoires simplifiées de la dispersion atmosphérique pour étudier les terrains accidentés. Le relief est intégré explicitement et son influence est directement traduite sur les champs de vitesse du vent. De plus, dans une zone urbaine ou industrielle, la topographie peut être prise en compte car il n'y a pas de limite au nombre d'obstacles ou à leurs caractéristiques. Leurs influences mutuelles sur l'écoulement sont calculées correctement.



Exemples de topographie et de bâtiments modélisés en 3D

Aérodynamique, champs de vents et turbulence

Le vent et la turbulence 3D développée à échelle locale sont intrinsèquement dépendant des environnements complexes rencontrés à l'échelle locale : les bâtis, les reliefs marqués, les flux de chaleur, la friction avec canopée variable sur les couverts végétaux. Ils ne peuvent être modélisés avec précision que via une résolution complète des équations de la mécanique des fluides. Ce sont les principaux/unicques moteurs du transport et de diffusion/mélange des différents polluants émis et qui expliquent les distributions spatio-temporelles de leurs concentrations. La précision apportée aux calculs de ces écoulements est donc fondamentale pour la modélisation de la dispersion elle-même.

Par le calcul exact du champ de vent et des champs de turbulence, les modèles CFD n'ont pas de limite sur la vitesse des vents pris en compte et permettent la prise en compte des vents faibles.

XI.3. PRINCIPALES EQUATIONS DU MODELE DE DISPERSION **FLUIDYN-PANACHE**

Le logiciel fluidyn-PANACHE résout numériquement le système des équations aux dérivées partielles (EDP) dits de Navier Stokes qui décrit le mouvement d'un fluide.

Le système d'équations de la mécanique des fluides comporte les équations fondamentales :

- de conservation de la masse (ou équation de continuité),
- de conservation de la quantité de mouvement,
- de conservation de l'énergie.

Ce système est complété par un modèle de turbulence à 2 équations de type k-epsilon.

Associées à une loi d'état, c'est-à-dire une équation reliant entre elles pression, température et masse volumique dans le fluide, leur résolution permet de déterminer la densité, la vitesse, la température et la pression en tous points du domaine de calcul ou, plus exactement, au niveau de chaque maille.

Afin de déterminer l'évolution de la concentration d'un polluant, une équation aux dérivées partielles de conservation des espèces est ajoutée au système pour chacune des substances émises dans l'atmosphère.

XI.4. VALIDATION DU LOGICIEL **FLUIDYN-PANACHE**

Les cas de validations réalisés par le logiciel fluidyn-PANACHE listés ci-après sont principalement issus de la littérature ou pour certains de partenariats avec des industriels.

Le cahier de validation avec l'ensemble des résultats peut être fourni sur demande.

XI.4.1. Validation pour des rejets de gaz passif

Le logiciel fluidyn-PANACHE a fait l'objet de validation pour les cas expérimentaux suivant :

- Projet EMU : Evaluation of Modeling Uncertainties – Les cas réalisés en soufflerie couvrent des configurations allant d'un bâtiment simple en terrain plat jusqu'au site industriel avec relief;
- Expérience MUST (Mock Urban Setting Test) réalisé par le WDTC (West Desert Center) en 2001- Les cas réalisés sur le terrain couvrent des rejets dans une zone de blocs alignés sous différentes conditions météorologiques ;

XI.4.2. Validation pour des rejets de gaz dense

Le logiciel fluidyn-PANACHE a également fait l'objet de nombreuses validations pour la dispersion atmosphérique des gaz denses (cf tableau suivant)

Campagne	Gaz	Soufflerie / Terrain	Topographie / Obstacles
Desert Tortoise	NH3	Terrain	No
Goldfish	HF	Terrain	No
Burro	LNG	Terrain	Yes
Porton Down	CCI2F2	Terrain	No
CO2PIPETRANS	CO2	Terrain	No
LACQ	SF6	Terrain	Yes
Maplin Sands	LNG	Terrain	No
Coyote	LNG	Terrain	No
Falcon	LNG	Terrain	No
Thorney Island	Freon 12 & Nitrogen	Terrain	No
CHRC	CO	Soufflerie	Yes
BA-Hamburg	SF6	Soufflerie	No
BA-TNO	SF6	Soufflerie	Yes

XI.4.3. Validation d'écoulements atmosphériques

Le logiciel fluidyn-PANACHE a fait l'objet de validations sur des résultats de campagnes de mesures d'écoulements atmosphériques :

- The Bolund experiment- Il s'agit d'une campagne réalisée en 2007/2008 ayant pour objectif la compréhension des écoulements dans la couche limite atmosphérique sur des reliefs complexes;
- The AIJ experiment- Il s'agit d'une campagne en soufflerie et sur le terrain dans une configuration de type milieu urbain avec bâtiments complexes de grande hauteur