

Orano Med

Installation ATLab sur la commune d'Onnaing (59)



Etude d'impact des rejets atmosphériques sur la population

Références : Rapport ARIA/2022.060

Documents associés : -

Type de document : Rapport d'études

Avancement du document : Version 4

Accessibilité : Restreint

SUEZ Aria Technologies

Siège social - Parc de L'île - 15/27 Rue du Port – 92000 Nanterre Cedex – France - Courriel : air-climate-fr@suez.com – Site web
S.A.S. au capital de 4 779 981 euros - SIRET 379 180 474 00064 – RCS Nanterre B 379 180 474 - Code APE 6201Z – TVA FR27 379 180 474

SUEZ Aria Technologies		Titre : Orano Med - Installation ATLab sur la commune d'Onnaing (59) - Etude d'impact des rejets atmosphériques sur la population						
N° rapport		22.060						
N° action		22.236						
Nombre de pages		64	Nombre de figures	19	Nombre de tableaux	21	Nombre d'annexes	5
Auteur(s)		SUEZ Aria Technologies, Aude HERVOUIN Ingénieure Qualité de l'Air						
Sous-traitants		-						
Intérêt documentaire		Accessibilité		Confidentielle		Libre		
Oui		Non	SUEZ Aria Technologies		Restreinte			
Etat du document		Rédacteurs Nom/Date		Relecteur Nom/Date				
Version V1		Aude HERVOUIN Le 14/11/2022		Anne-Sophie SAFFRE Le 15/11/2022				
Version V2		Aude HERVOUIN Le 21/11/2022		Anne-Sophie SAFFRE Le 22/11/2022				
Version V3		Aude HERVOUIN Le 16/10/2024		Claire DUPUIS Le 18/10/2024				
Version V4		Aude HERVOUIN Le 10/03/2025		-				
Diffusion		Date		Destinataires			Nombre	
Diffusion informatique		10/03/2025		Orano Med			-	

SOMMAIRE

1. CADRE DE L'ETUDE.....	5
2. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE.....	6
3. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR.....	7
4. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE	9
4.1 Méthodologie et modèle utilise.....	9
4.2 Données d'entrée	11
4.2.1 Domaine d'étude	11
4.2.2 Topographie.....	12
4.2.3 Obstacles	13
4.2.4 Emissions	14
4.2.5 Météorologie	14
4.3 Détermination des concentrations dans l'air	21
4.3.1 Paramétrages du modèle	21
4.3.2 Présentation des résultats.....	22
4.3.3 Concentrations en moyenne annuelle	23
4.3.4 Dépôts au sol	25
5. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE.....	27
5.1 Identification des dangers	27
5.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations.....	27
5.1.2 Relation Dose-Réponse.....	28
5.2 Schéma conceptuel d'exposition	29
5.2.1 Voies d'exposition	29
5.2.2 Schéma conceptuel d'exposition.....	29
5.3 Estimation des doses d'exposition	29
5.3.1 Scénario d'exposition	30
5.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation).....	31
5.3.3 Exposition interne par inhalation	34
5.4 Evaluation des risques.....	35
5.4.1 Méthodologie	35
5.4.2 Evaluation des risques sanitaires.....	36
5.5 Incertitudes	39
5.5.1 Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique.....	39
5.5.2 Incertitudes relatives à l'évaluation des risques sanitaires.....	42
6. CONCLUSION.....	44
ANNEXES	46
Annexe 1 : Justification du terme source des rejets atmosphériques (fournie par le client).....	47
Annexe 2 : Impact chimique du Pb-212	49
Annexe 3 : Fiche climatologique de la station Météo-France de Valenciennes (59).....	50
Annexe 4 : Description du logiciel PMSS.....	52
Annexe 5 : Exposition interne par ingestion	62

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques des rejets.....	7
Tableau 2 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent toutes directions confondues	16
Tableau 3 : paramètres de calcul des dépôts.....	22
Tableau 4 : concentrations en moyenne annuelle (Bq/m^3)	23
Tableau 5 : dépôts au sol moyens annuels ($Bq/m^2/s$).....	25
Tableau 6 : scénarios d'exposition retenus.....	30
Tableau 7 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe par irradiation	32
Tableau 8 : dose d'exposition par irradiation (mSv/an).....	33
Tableau 9 : valeurs retenues (EAP, FC Rn).....	34
Tableau 10 : dose d'exposition par inhalation (mSv/an).....	35
Tableau 11 : doses efficaces totales.....	36
Tableau 12 : doses efficaces totales.....	38
Tableau 13 : résultats de la modélisation avec modification des caractéristiques de l'installation.....	41
Tableau 14 : doses efficaces totales avec modification des caractéristiques de l'installation	41
Tableau 15 : doses efficaces totales.....	45
Tableau 16 : Valeur Toxicologique de Référence pour les effets chroniques à seuil du plomb inorganique	49
Tableau 17 : calcul de la masse de Pb-212 rejetée	49
Tableau 18 : facteur de concentration au végétal pour le Pb-212.....	62
Tableau 19 : paramètres de consommation relatifs aux différentes catégories d'âge (données INERIS)	63
Tableau 20 : fraction d'aliments auto-produits (données INERIS).....	63
Tableau 21 : dose efficace par ingestion (mSv/an) pour chaque tranche d'âge.....	64

FIGURES

Figure 1 : localisation du point de rejet.....	8
Figure 2 : méthodologie mise en œuvre	10
Figure 3 : carte du domaine d'étude	11
Figure 4 : topographie du domaine d'étude	12
Figure 5 : bâtiments sur la zone d'étude.....	13
Figure 6 : visualisations 3D des obstacles	14
Figure 7 : rose des vents générale – Station de Valenciennes – 2021	15
Figure 8 : normales de rose de vent – Station de Valenciennes – 2001-2020	16
Figure 9 : répartition des cas météorologiques en fonction de la stabilité atmosphérique.....	18
Figure 10 : variation moyenne mensuelle de la pluviométrie (période du 01/01/2021 au 31/12/2021)	18
Figure 11 : variation moyenne mensuelle de la température (période du 01/01/2021 au 31/12/2021)	19
Figure 12 : lignes de courant et vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol	20
Figure 13 : boîte de calcul	21
Figure 14 : localisation des points d'intérêt	22
Figure 15 : carte des concentrations au sol en moyenne annuelle en thoron (Rn-220).....	24
Figure 16 : vue 3D des concentrations en moyenne annuelle en thoron (Rn-220)	24
Figure 17 : carte des dépôts moyens annuels au sol en thoron (Rn-220).....	26
Figure 18 : synthèse des doses efficace	37
Figure 19 : lignes de courant et concentration en SF6 à 4h10, 4h20 et 4h30.....	40

1. CADRE DE L'ETUDE

Dans le cadre de sa demande d'autorisation prévue au titre du code de la santé publique pour détenir, utiliser et fabriquer des sources radioactives non scellées, Orano Med a sollicité SUEZ Aria Technologies pour réaliser une étude d'impact radiologique liée aux rejets atmosphériques de la future installation ATLab située à Onnaing (59).

Le présent rapport présente l'évaluation des risques sanitaires liés aux rejets atmosphériques. Il a été établi sur la base des informations transmises à SUEZ Aria Technologies, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives de la réglementation, en vigueur au moment de la réalisation du dossier.

La responsabilité de SUEZ Aria Technologies ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été fournies sont incomplètes ou erronées.

2. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

Cette étude concerne l'étude de l'impact sur la santé des tiers situés dans l'environnement des rejets de l'installation. Le fonctionnement accidentel n'est pas traité dans le présent rapport.

L'évaluation de l'impact sur la santé des rejets atmosphériques du site a été réalisée :

- En adaptant la méthodologie INERIS « Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires – Démarche intégrée pour la gestion des émissions des substances chimiques par les installations classées » (août 2013 mis à jour en septembre 2021) en application de la circulaire DGPR & DGS du 9 août 2013 ;
- Sur la base des données disponibles dans l'arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultants de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants ;
- En suivant les préconisations du guide IRSN pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation Cyclotron (Rapport IRSN N° 2022-00193).

Les étapes constituant la démarche sont les suivantes :

- Evaluation des émissions de l'installation : caractérisation des émissions du site ;
- Evaluation des enjeux et des voies d'exposition : schéma conceptuel décrivant les relations entre les sources de polluants, les milieux et vecteurs de transfert, les usages et les populations exposées ;
- Evaluation prospective des risques sanitaires :
 - a. estimation de la dose efficace totale annuelle générée par les émissions du site ;
 - b. comparaison de la dose efficace annuelle à la valeur limite d'exposition définie par la réglementation et au niveau ambiant mesuré dans l'environnement du site ;
 - c. analyse des incertitudes.

3. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR

L'installation ATLab est une installation de production de radiopharmaceutiques dans le domaine de l'oncologie. L'installation ATLab est dimensionnée pour permettre la production jusqu'à 200 doses quotidiennes de radiopharmaceutiques au Pb-212.

Les rejets gazeux radioactifs du site ATLab d'Onnaing pris en référence sont composés uniquement de thoron (Rn-220). Au niveau de l'émissaire de rejet, le thoron est considéré sans ses descendants solides car l'émission a lieu peu après le passage sur le DNF (Dernier Niveau de Filtration). La justification du terme source est présentée en Annexe 1.

A noter que le Pb-212 est le descendant du Rn-220 ayant la demi-vie la plus longue (10,6 h). Toutefois, ses rejets sont négligeables vis-à-vis de ceux en Rn-220. En effet, ils représentent 11,7 GBq/an, soit l'activité en Rn-220 multipliée par un facteur 0,00144¹. Par ailleurs, son impact chimique est négligeable (cf.

¹ Facteur calculé avec la formule de Bateman.

Annexe 2). Ceci justifie que le plomb 212 n'est pas retenu dans la suite de l'étude.

Les informations relatives aux rejets ont été transmises par le Client. La justification du terme source est présentée en Annexe 1.

Les émissions à l'atmosphère se font par un seul point de rejet en toiture (cf. Figure 1).

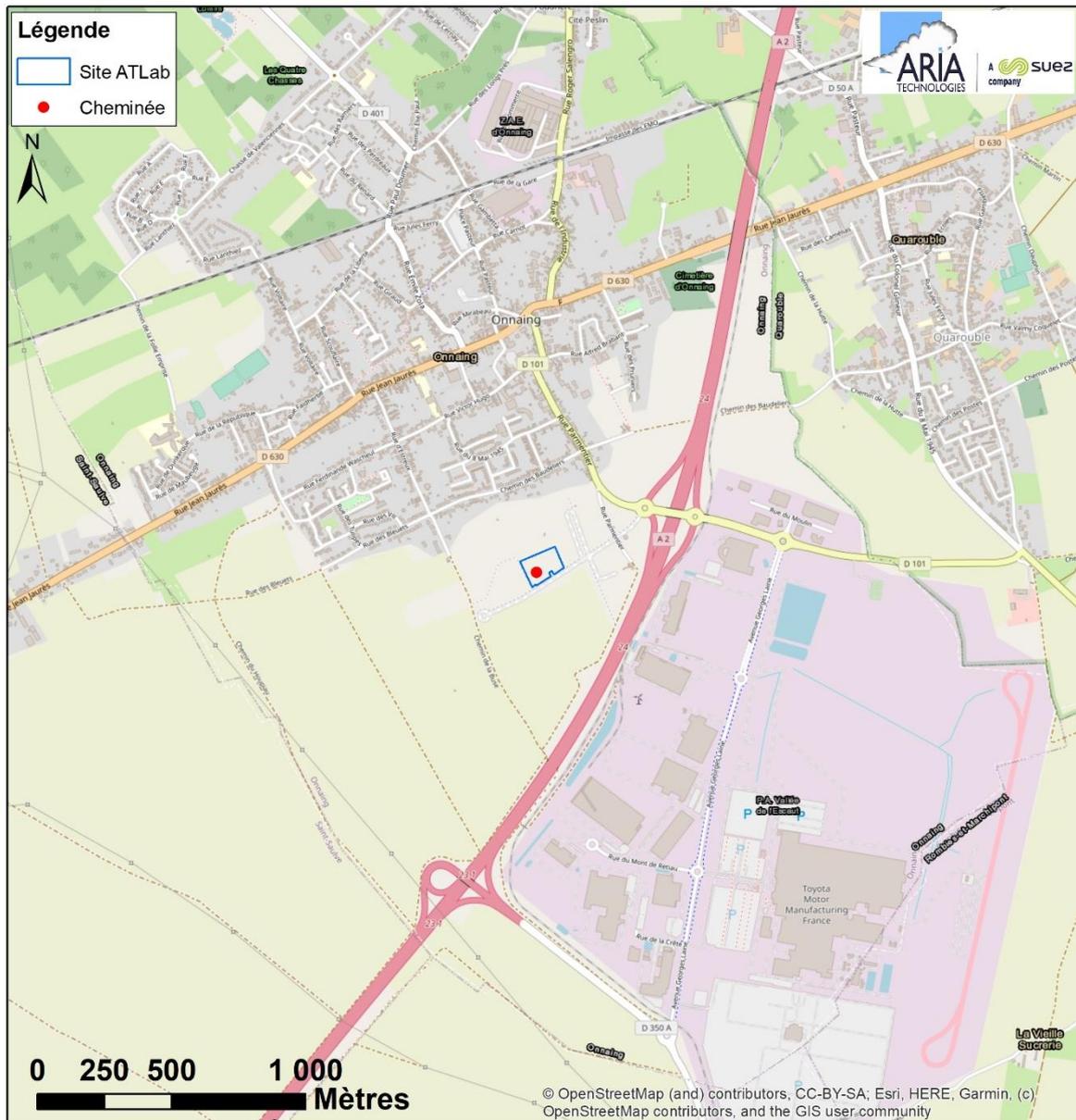
Les caractéristiques du point de rejet ainsi que les émissions sont détaillées dans le Tableau 1. Il s'agit d'un rejet vertical. A noter que l'installation n'existant pas, les données utilisées à ce stade sont des données projet.

Tableau 1 : caractéristiques des rejets

Caractéristiques générales	Unités	Cheminée
Coordonnées du point de rejet	UTM 31	X = 542,809 m Y = 5 580,892 m
Hauteur par rapport au sol	m	16,8
Diamètre cheminée au niveau de l'éjection	m	1
Température des rejets	°C	18
Vitesse d'éjection	m/s	14
Orientation du rejet	-	verticale
Fonctionnement sur l'année	-	continu
Durée d'émission sur l'année	heures/an	8 760
Flux à l'émission		
Flux en Radon 220 (Rn-220)	Bq/h	9,1E+08
Flux en Radon 220 (Rn-220)	Bq/an	8E+12

Le flux en radon retenu (8 TBq/an en Rn-220) correspond au flux attendu dans la configuration maximaliste de production du site à savoir 200 doses de radiopharmaceutiques par jour, avec la mise en œuvre de filtres à charbon actif sur les réseaux d'extraction ambiante et procédé.

Figure 1 : localisation du point de rejet



4. ÉTUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Afin d'estimer les concentrations et dépôts dans l'environnement en radionucléides attribuables à l'installation, une étude de dispersion a été réalisée.

4.1 METHODOLOGIE ET MODELE UTILISE

Deux mécanismes sont prépondérants dans la dispersion des polluants atmosphériques :

- le transport du polluant par le vent (influence des obstacles et des conditions climatiques) ;
- la diffusion du polluant par la turbulence : diffusion (autour de l'axe de propagation) par la turbulence qui reflète les fluctuations du panache par rapport au vent moyen (influence des émissions et de la structure thermique).

Pour les simuler et compte-tenu de la présence de bâtiments, nous avons utilisé le logiciel **ARIA Impact 3D** en mettant en œuvre le modèle 3D **PMSS** (ou Parallel Micro SWIFT-SPRAY). Contrairement aux modèles gaussiens, ce modèle permet de prendre en compte avec précision les champs météorologiques quelles que soient les conditions atmosphériques et la nature du relief. Il est donc particulièrement adapté à des modélisations de sites complexes, accidentés, ou en milieu urbain, présentant des caractéristiques météorologiques particulières. Grâce à un temps de calcul relativement faible, cet outil permet de représenter les distributions de concentration en présence d'obstacles et d'accéder à l'impact à court terme (situation accidentelle) ou à long terme (moyenne annuelle, centile) des émissions.

PMSS (description technique du logiciel en Annexe 4) repose sur la mise en œuvre de :

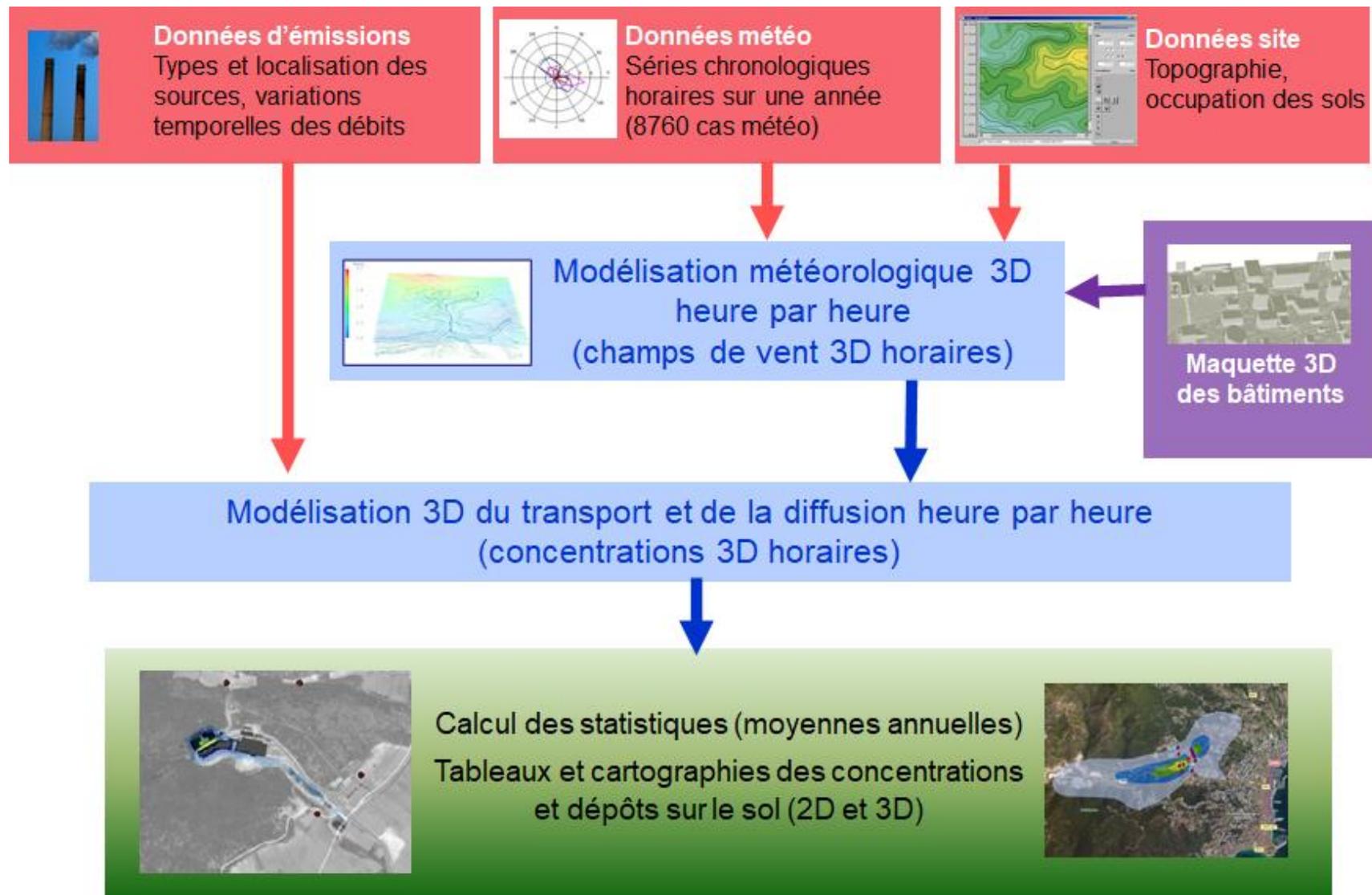
- **SWIFT** : modèle de calcul de champs tridimensionnels de vent et de température prenant notamment en compte l'influence du relief, de l'occupation des sols et des bâtiments. Il a été validé sur de nombreuses campagnes de mesures réalisées notamment par le US Department of Defence (Defence and Threat Response Agency) ainsi que sur des mesures en soufflerie atmosphérique ;
- **SPRAY** : modèle lagrangien tridimensionnel de type Monte-Carlo permettant de calculer la dispersion de polluant à partir du champ de vent tridimensionnel calculé par SWIFT, en utilisant un grand nombre de pseudo-particules (le polluant est simulé par des "particules virtuelles").

La méthodologie employée ici se décompose en plusieurs étapes successives :

- Etape 1 : constitution d'une base météorologique complète au pas horaire sur une année (année 2021, représentative des conditions de vents de la zone d'étude, cf. paragraphe 4.2.5.2.1) ;
- Etape 2 : modélisation de l'écoulement du vent en 3D pour chaque échéance horaire de la base météo → champs de vent 3D heure par heure soit 8 760 échéances ;
- Etape 3 : modélisation de la dispersion des émissions pour chaque échéance horaire de la base météo à partir des champs de vent 3D calculés à l'étape 2 → concentrations 3D heure par heure soit 8 760 échéances ;
- Etape 4 : calcul statistique des concentrations moyennes annuelles et des dépôts au sol à partir des résultats 3D horaires calculés sur l'année.

La Figure 2 présente la méthodologie mise en œuvre pour déterminer les concentrations dans l'air.

Figure 2 : méthodologie mise en œuvre



4.2 DONNEES D'ENTREE

4.2.1 Domaine d'étude

Le site se trouve sur la commune d'Onnaing (59). Le domaine d'étude retenu est un carré de 2 km de côté centré sur le site.

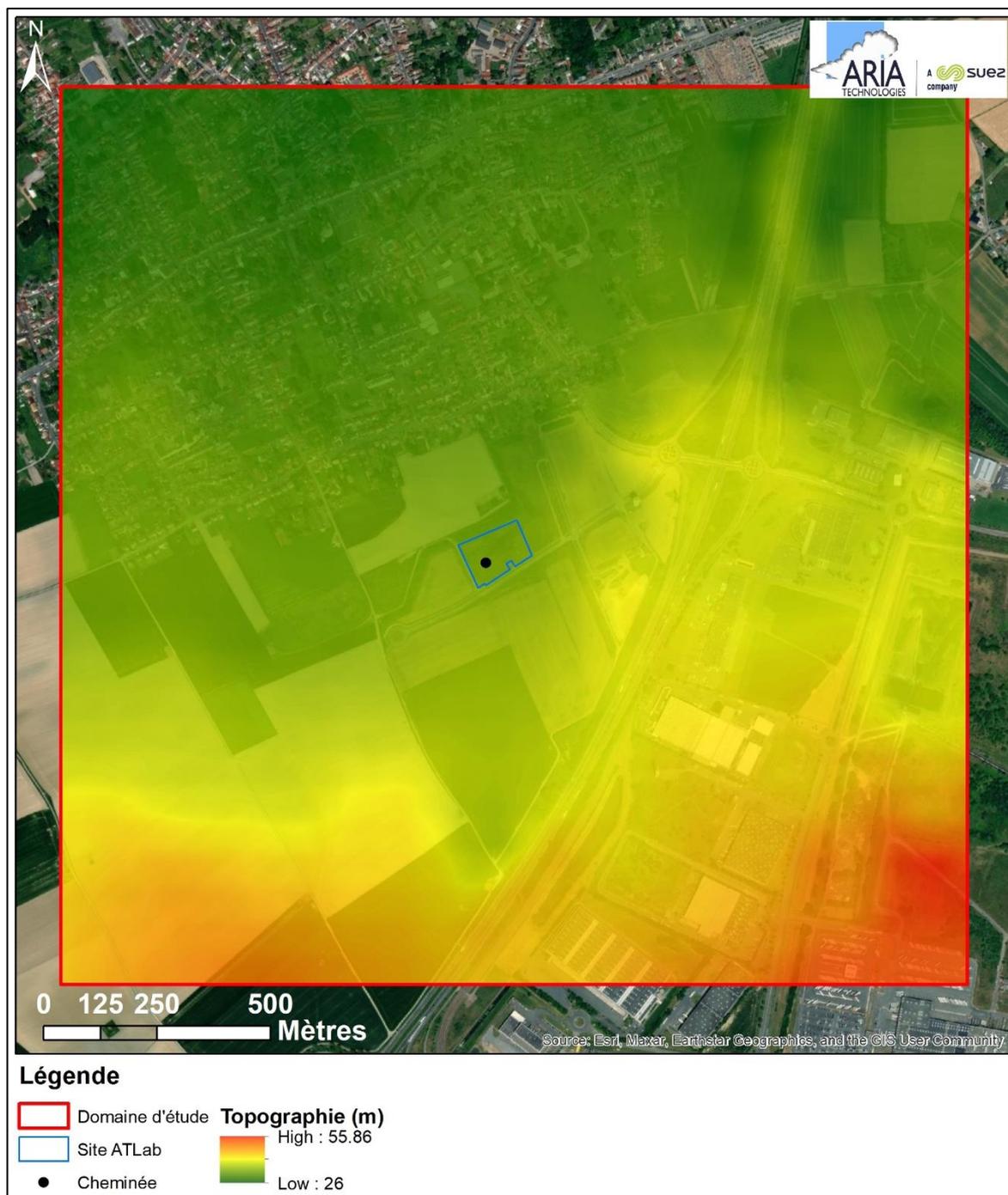
Figure 3 : carte du domaine d'étude



4.2.2 Topographie

La topographie est issue d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 75 mètres. La Figure 4 présente une vue 2D de la topographie sur le domaine d'étude. L'unité est le mètre NGF (Nivellement Général de la France). Le relief sur le domaine d'étude est assez plat et varie entre 26 mètres à 56 mètres.

Figure 4 : topographie du domaine d'étude



4.2.3 Obstacles

Dans le cadre de cette étude, les bâtiments ont été pris en compte dans les simulations.

Les informations concernant les obstacles sont issues :

- de la BD TOPO® de l'IGN pour les bâtiments existants ;
- des données fournies par le Client pour les bâtiments en projet (bâtiment du site ATLab de production, bâtiments associés au développement économique de la zone : projet logistique, hôtel/restaurant, ...).

A partir de ces données, un maillage tridimensionnel fin représentant le domaine d'étude et intégrant les obstacles a été réalisé.

La Figure 5 présente les obstacles de la zone d'étude. La Figure 6 présente des vues 3D des bâtiments.

Figure 5 : bâtiments sur la zone d'étude



Figure 6 : visualisations 3D des obstacles



4.2.4 Emissions

Les émissions prises en compte correspondent au terme source présenté dans le Tableau 1, paragraphe 3.

4.2.5 Météorologie

Les paramètres les plus importants pour les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont : la direction du vent, la vitesse du vent, la température extérieure, la pluviométrie, la stabilité de l'atmosphère.

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). C'est pourquoi il est nécessaire de rechercher des chroniques météorologiques :

- suffisamment longues et complètes,
- représentatives de la climatologie du site.

4.2.5.1 Données météorologiques

Plusieurs paramètres rentrent en ligne de compte pour le choix de la station météorologique la plus représentative de la zone d'étude :

1. **sa position géographique** : la station retenue doit être la plus proche possible de l'installation et il ne doit pas exister d'obstacle majeur entre la station et la zone d'étude.
2. **la cadence d'acquisition des données météorologiques** : Météo France possède des stations où les relevés sont faits toutes les heures et d'autres tous les jours. Pour notre étude, nous avons besoin

de données météorologiques suffisamment fines au niveau horaire pour avoir une bonne représentativité de la météorologie locale et pour prendre en compte les phénomènes météorologiques diurnes. Il est habituel d'utiliser des bases de données météorologiques comportant des données concernant le vent, la température et la nébulosité toutes les 3 heures pendant plusieurs années. Les stations « journalières » sont donc éliminées.

3. la pertinence des données météorologiques.

Les données météorologiques proviennent de la station Météo-France de Valenciennes (station la plus proche) pour les mesures de vent (direction et vitesse), de température, de pluie et pour les observations de nébulosité. Cette station est située à environ 11 km au sud-ouest du site.

Les données météorologiques utilisées sont des mesures horaires (1 mesure toutes les heures). Ce fichier comporte une année de mesures : du 01/01/2021 au 31/12/2021.

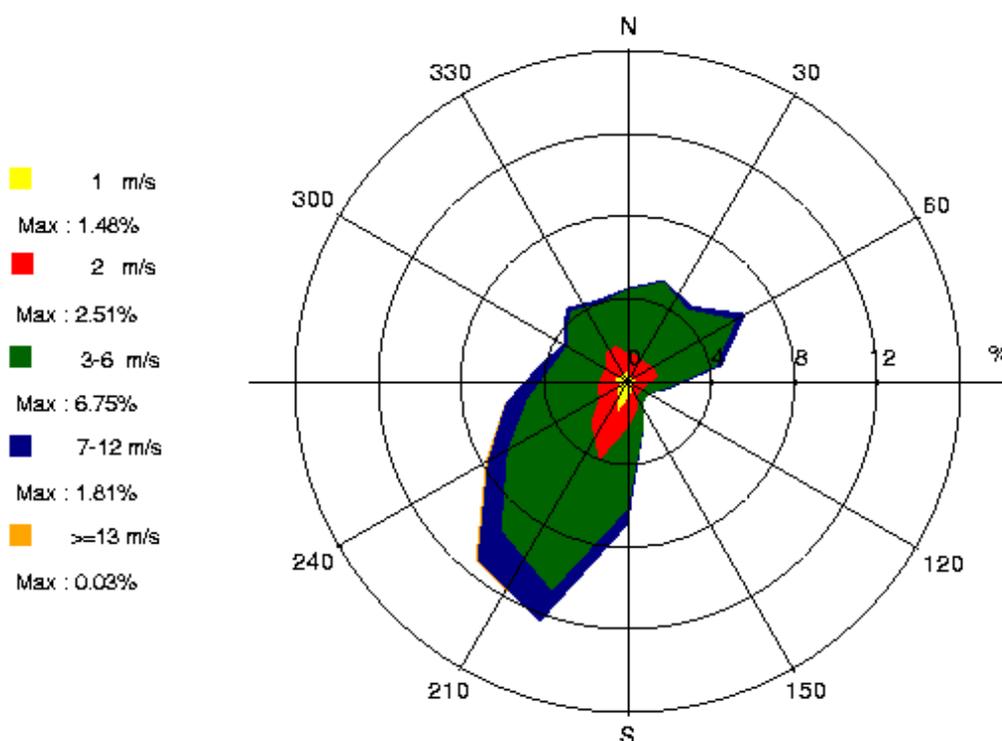
4.2.5.2 Analyse météorologique

4.2.5.2.1 Roses des vents

La rose des vents, en un lieu donné, est la représentation graphique des fréquences des vents classées par direction et vitesse. Les intersections de la courbe avec les cercles d'une fréquence donnée fournissent les fréquences d'apparition des vents en fonction de la direction d'où vient le vent.

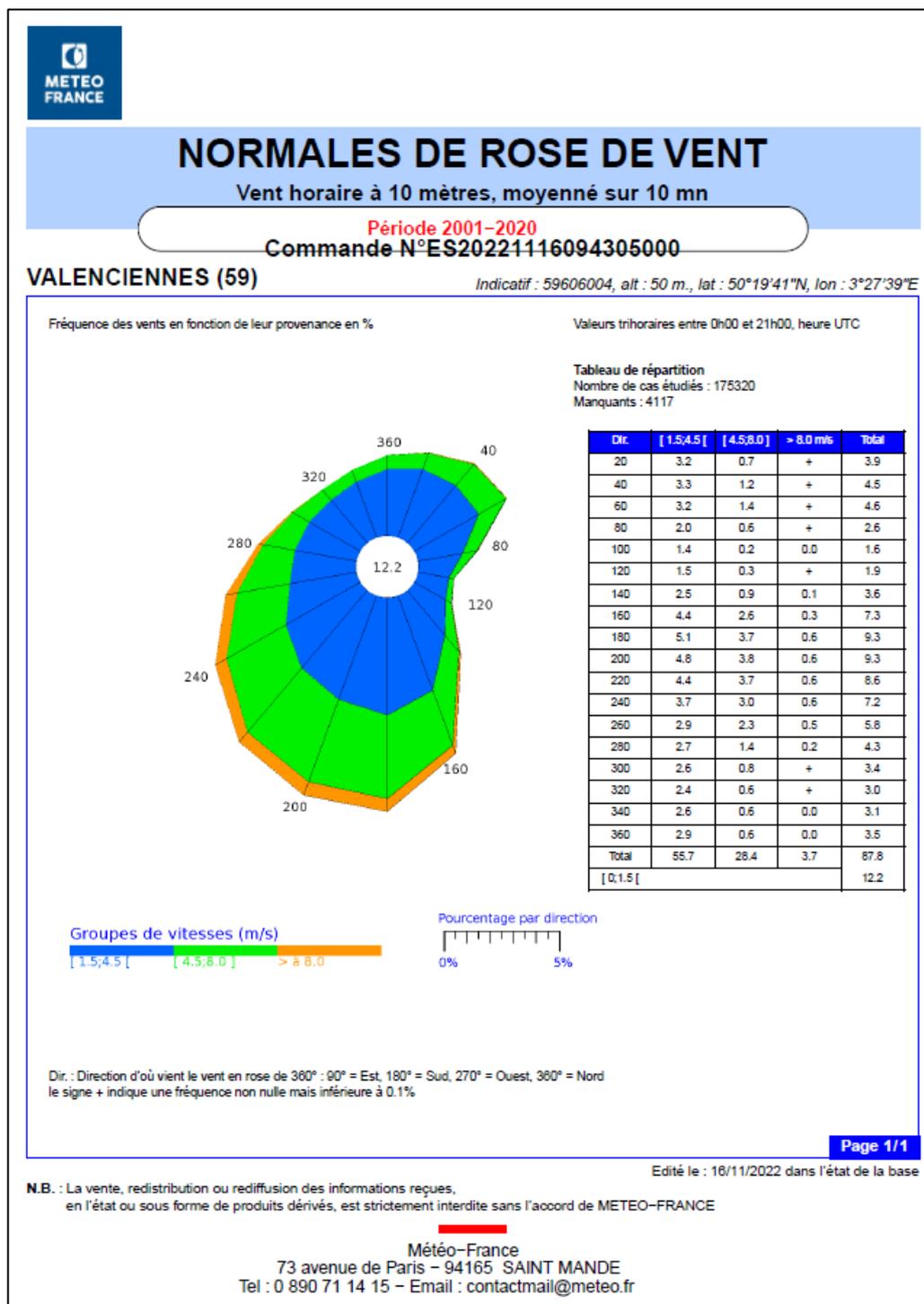
La Figure 7 présente la rose des vents générale pour la station de Valenciennes calculée à partir des données horaires sur la période 01/01/2021 au 31/12/2021.

Figure 7 : rose des vents générale – Station de Valenciennes – 2021



La rose des vents sur l'année 2021 (cf. Figure 7) est similaire aux normales de rose de vent sur la période 2001-2020 (cf. Figure 8). L'année 2021 est donc caractéristique des conditions de vents sur la zone d'étude.

Figure 8 : normales de rose de vent – Station de Valenciennes – 2001-2020



Le Tableau 2 synthétise les fréquences d'occurrence par classe de vitesse, toutes directions confondues

Tableau 2 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent toutes directions confondues

Classe de vitesse (m/s)	calmes	1	2	3 à 6	7 à 12	>=13
Borne de l'intervalle	[0 ; 0,9[	[ 0,9 ; 1,5[	[ 1,5 ; 2,5[	[ 2,5 ; 6,5[	[ 6,5 ; 12,5[	[ 12,5 ; ∞[
Fréquence (%)	6,8	8,6	19,5	55,8	9,1	0,1

Sur la période retenue pour cette étude (du 01/01/2021 au 31/12/2021), les principaux résultats de cette analyse sont les suivants :

- les roses des vents montrent deux directions privilégiées :
 - vents de secteur **sud-ouest** (34 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 180° et 240°²) ;
 - une direction secondaire : vents du **nord-est** (24 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 20° et 80°) ;
- Les vents les plus fréquents sont les vents de vitesse comprise entre 3 et 6 m/s. Les vents ont une vitesse moyenne de 10,2 km/h (2,8 m/s) ;
- Les vents forts (vitesse supérieure à 7 m/s) proviennent principalement du sud-ouest ;
- Les vents faibles (vitesse inférieure à 1,5 m/s) sont assez fréquents puisqu'ils représentent 15,4 % des observations, dont 6,8 % de vents calmes (inférieures à 0,5 m/s).

La fiche climatologique de la station Météo-France de Valenciennes (59), présentée en Annexe 3, indique une vitesse moyenne des vents de 3,7 m/s sur la période 1991-2020. La vitesse moyenne sur l'année 2021 étant inférieure (2,8 m/s) à celle-ci, l'année retenue est pénalisante vis-à-vis des conditions moyennes sur 30 ans, ce qui constitue une hypothèse majorante.

4.2.5.2.2 Stabilité atmosphérique

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, les situations d'inversion thermique se produisent lorsque l'atmosphère est stable.

Dans cette étude, elle a été déterminée à partir des données de vent et de nébulosité qui conduit à distinguer six catégories de stabilité de l'atmosphère :

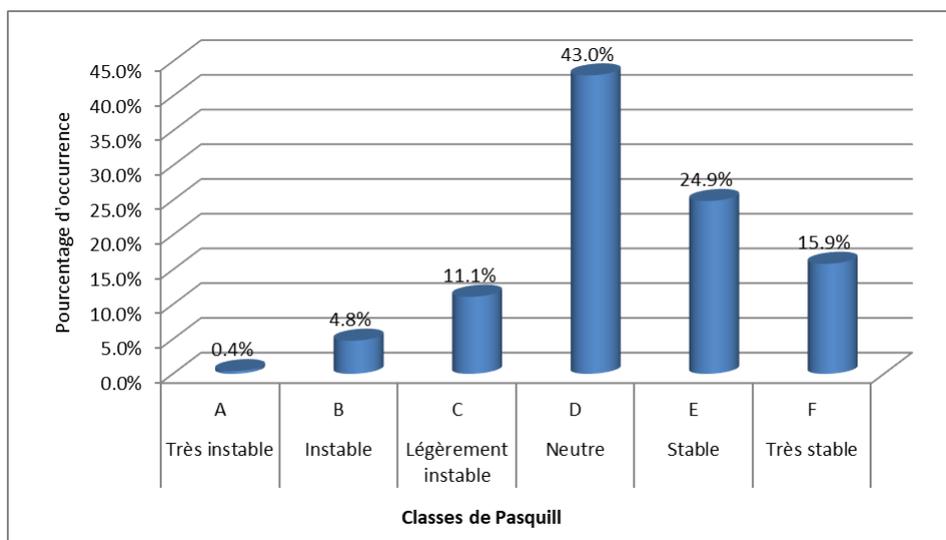
- Classe A : Très instable
- Classe B : Instable
- Classe C : Légèrement instable
- Classe D : Neutre
- Classe E : Stable
- Classe F : Très stable

Plus l'atmosphère est stable (catégories E et F), plus les conditions de dispersion sont défavorables. Ces situations freinent le déplacement des masses d'air et se retrouvent principalement par vents faibles et la nuit.

² Les directions du vent sont données en degrés par rapport au Nord et indiquent la direction d'où vient le vent (convention météorologique internationale). Un vent de 0° est donc un vent venant du Nord, un vent de 180° est un vent venant du Sud.

La Figure 9 présente la répartition des cas météorologiques en fonction de la stabilité atmosphérique.

Figure 9 : répartition des cas météorologiques en fonction de la stabilité atmosphérique



La classe D de Pasquill est la plus fréquemment observée (43,0 %), ce qui est favorable pour la dispersion atmosphérique. Les conditions de dispersion sont relativement favorables puisque 59,3 % des observations présentent une atmosphère instable ou neutre.

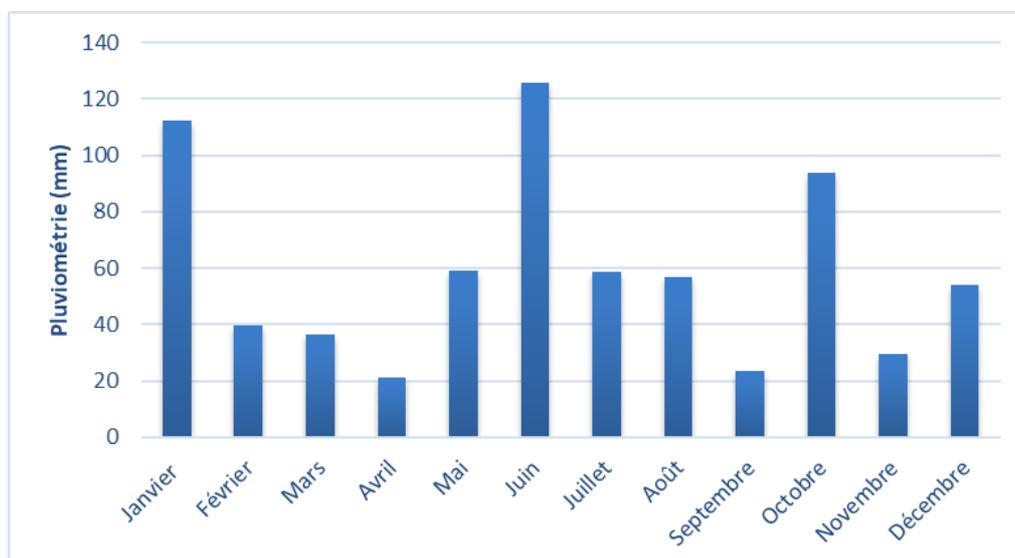
Les vents ont une vitesse moyenne d'environ 2,0 m/s en situation stable, donc pénalisante pour la dispersion des émissions, tandis qu'en atmosphère neutre, elle est de 3,2 m/s.

4.2.5.2.3 Pluviométrie

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenu compte des données de pluviométrie recueillies sur la station de Valenciennes. Il est tombé 711 mm de pluie en 2021.

La fiche climatologique de la station Météo-France de Valenciennes (59), présentée en Annexe 3, indique une pluviométrie moyenne de 694,1 mm sur la période 1991-2020. La pluviométrie sur l'année 2021 étant proche (711 mm) de celle-ci, l'année retenue est représentative des conditions moyennes sur 30 ans.

Figure 10 : variation moyenne mensuelle de la pluviométrie (période du 01/01/2021 au 31/12/2021)

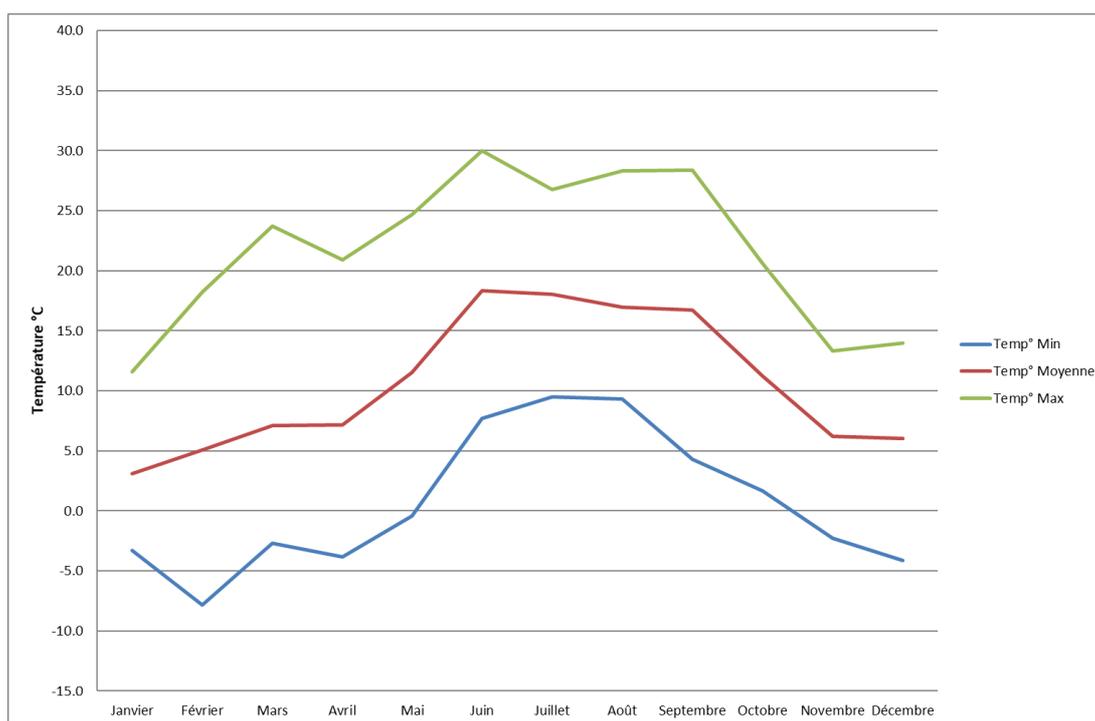


4.2.5.2.4 Température

La température de l'air, dernier paramètre intervenant dans le processus de dispersion des polluants, est en moyenne de 10,7°C à la station de Valenciennes en 2021. La Figure 11 présente les variations moyennes mensuelles de la température minimale, moyenne et maximale sur la période du 01/01/2021 au 31/12/2021.

La fiche climatologique de la station Météo-France de Valenciennes (59), présentée en Annexe 3, indique une température moyenne de 11,0°C sur la période 1991-2020. La température sur l'année 2021 étant proche (10,7°C) de celle-ci, l'année retenue est représentative des conditions moyennes sur 30 ans.

Figure 11 : variation moyenne mensuelle de la température (période du 01/01/2021 au 31/12/2021)

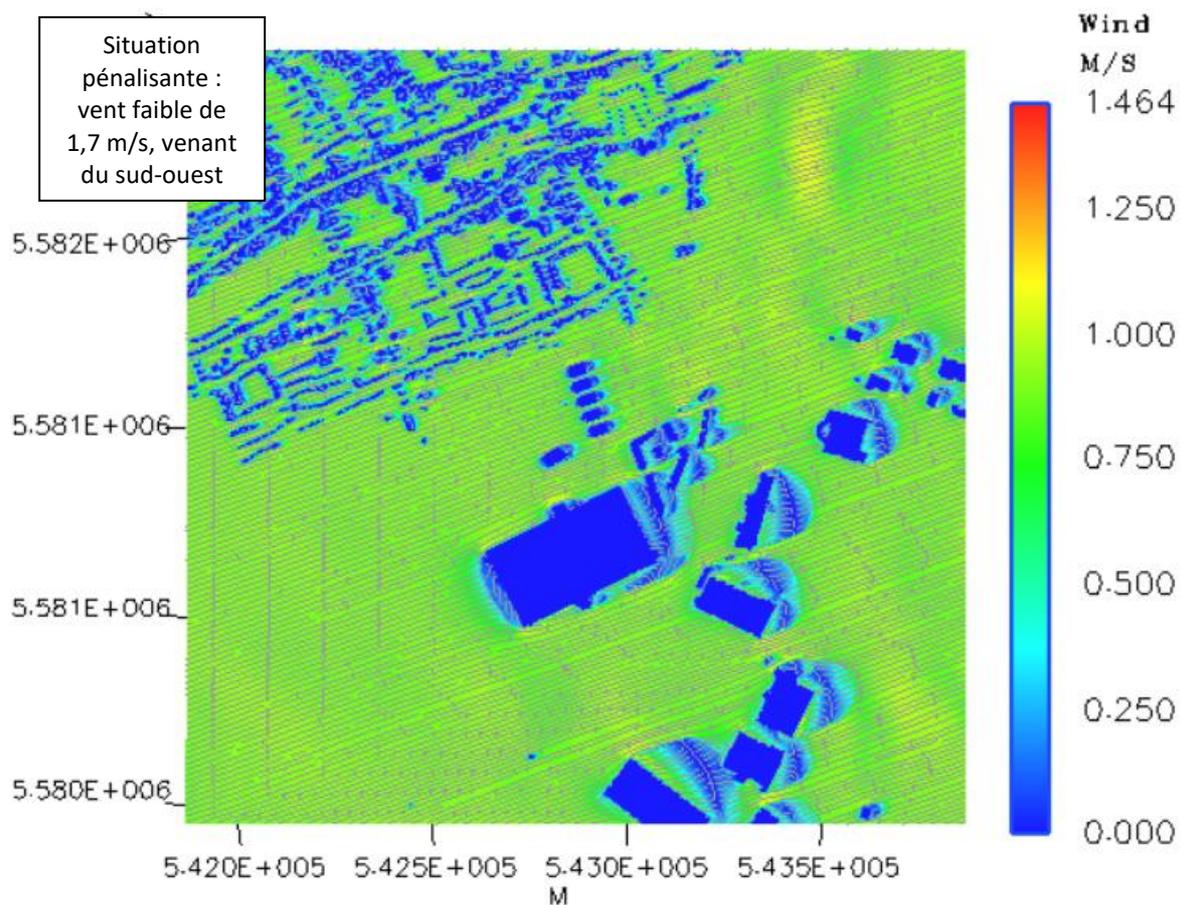


4.2.5.3 Modélisation

A partir de ces données, le modèle météorologique utilisé pour les simulations (cf. Figure 2 page 10) reconstitue l'écoulement du vent sur le domaine d'étude afin de bien reconstruire un champ de vent 3D à chaque échéance horaire de l'année. Ainsi, 8 760 situations météorologiques réelles sont modélisées successivement par le modèle.

La Figure 12 présente les lignes de courant et vitesses du vent à 2 m au-dessus du sol dans le cas d'un vent du sud-ouest à 1,7 m/s (conditions météorologiques mesurées le 01/01/2021 à 10h). Cette figure montre l'influence que peuvent avoir les bâtiments sur l'écoulement du vent.

Figure 12 : lignes de courant et vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol



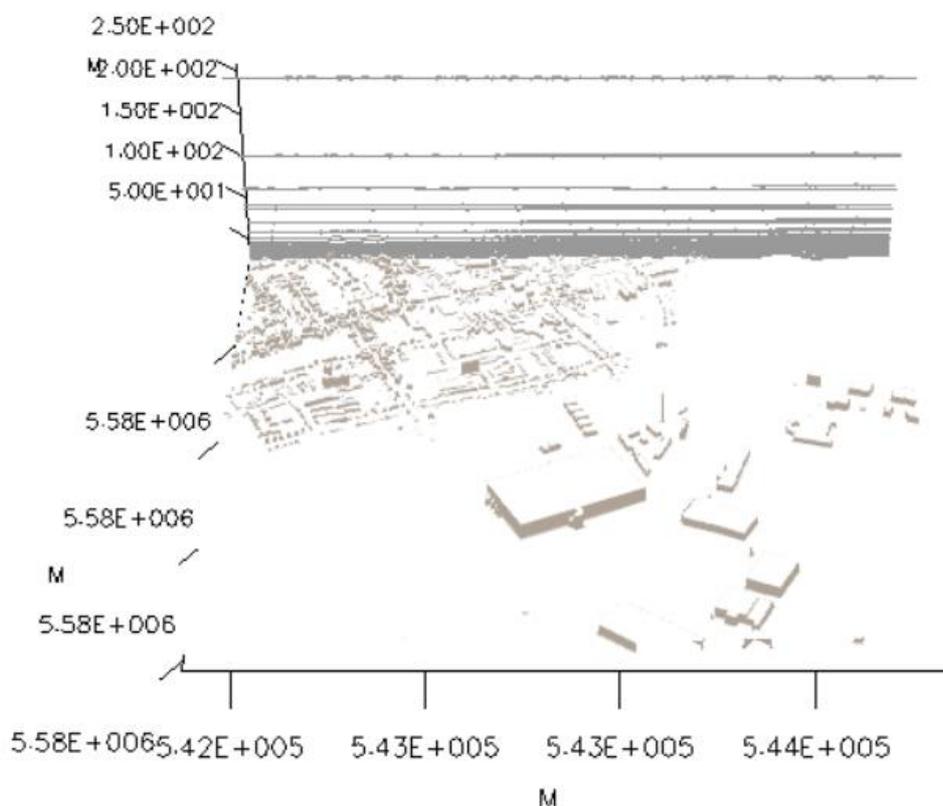
4.3 DETERMINATION DES CONCENTRATIONS DANS L'AIR

4.3.1 Paramétrages du modèle

4.3.1.1 Maillage

Le but étant de modéliser les obstacles présents dans la zone d'étude et pouvant influencer sur les écoulements d'air, ces obstacles ont été modélisés en fonction de leur volume et surtout de leur hauteur. Ces bâtiments ont été pris en compte avec une résolution de 5 mètres dans le plan horizontal et avec une hauteur qui dépend de la répartition des niveaux verticaux. Pour les simulations de la dispersion des polluants, il a été défini 20 niveaux verticaux dont 11 répartis entre 0 et 20 m d'altitude (zone avec présence de bâtiments). La hauteur de maille la plus petite est de 2 mètres près du sol.

Figure 13 : boîte de calcul



4.3.1.2 Surélévation du panache

Le point de départ des trajectoires est le sommet de la cheminée. Lorsque les rejets sont chauds ou que la vitesse d'éjection des fumées est importante, une surhauteur du panache peut être prise en compte. En effet, les fumées de combustion vont s'élever au-dessus de la cheminée jusqu'à ce que leur vitesse ascensionnelle initiale et les effets de différence de densité (dus à la différence de température air/fumées) ne soient plus significatifs. MSS permet de prendre en compte la surhauteur d'origine thermique et d'origine dynamique (formule Briggs (US-EPA) modifiée par Anfossi).

La surélévation étant dépendante des conditions météorologiques (température, vitesse du vent...), elle est calculée par le modèle pour chaque échéance horaire et varie donc au cours du temps.

4.3.1.3 Substances modélisées et caractéristiques retenues

Le Tableau 3 résume les valeurs utilisées dans le cadre de cette étude.

Tableau 3 : paramètres de calcul des dépôts

Polluant	Phase du polluant	Vitesse de dépôt sec (m/s)	Coefficient de lessivage (s ⁻¹)	Diamètre de particules (µm)	Demie-vie (s)	Source biblio.
Rn-220	gaz	5.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴	-	55,8	1

[1] CERES (Code d'Évaluations Rapides Environnementales et Sanitaires).

A noter que le radon-220 est un gaz rare et qu'il ne se dépose pas. Cependant, en réalité, celui-ci sera mêlé à ses descendants solides dans les rejets atmosphériques. C'est pourquoi il est pertinent de modéliser un dépôt pour les rejets dans leur ensemble. Une vitesse de dépôt sec ainsi qu'un coefficient de lessivage lui ont donc été associés.

4.3.1.4 Autres paramètres de calcul

Les simulations ont été réalisées pour des états stationnaires.

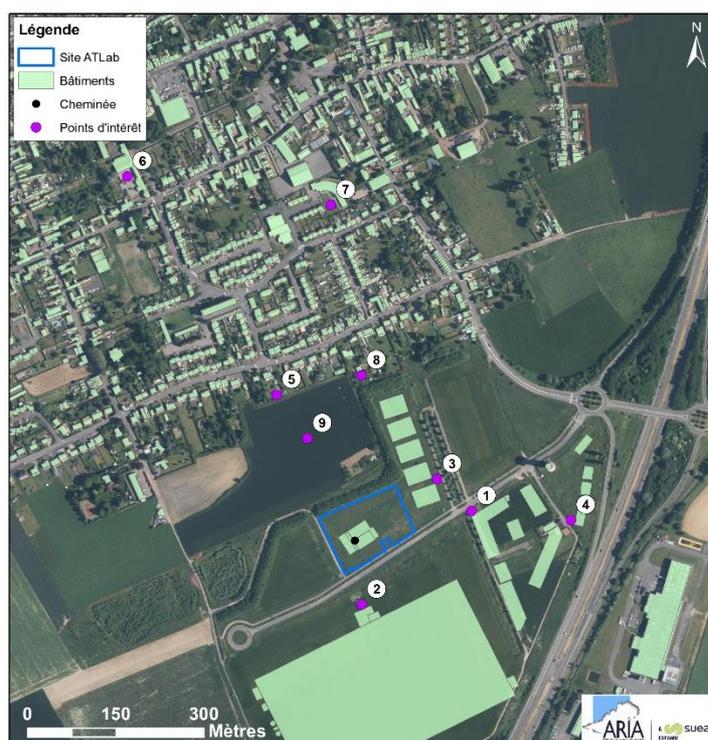
Les valeurs des différents paramètres de calcul pouvant influencer la qualité des résultats de modélisation sont :

- Pas de temps d'émissions des particules : 5 s ;
- Nombre de particules émis par pas de temps : 500 ;
- Durée de moyennage : 3 600 minutes.

4.3.2 Présentation des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de concentration en moyenne annuelle exprimées en Bq/m³ et de dépôt en Bq/m²/s. Les résultats de l'étude sont donnés sous forme de cartes et de tableaux. Ces résultats ne concernent que la contribution des rejets étudiés. Les résultats sont également présentés au niveau de points d'intérêt présentés sur la Figure 14.

Figure 14 : localisation des points d'intérêt



Id	Nom
1	K-Pla Park
2	GOODMAN
3	RESOTAINER*
4	Hôtel-Restaurant Duval
5	Habitation Nord-Ouest
6	Ecole Pablo Picasso
7	EHPAD La roselière
8	Habitation la plus exposée
9	Zone agricole

* La localisation du point n°3 est pénalisante car le seul poste de travail permanent est situé à l'entrée du site dans un bureau d'accueil, ensuite le personnel est amené à se déplacer sur l'ensemble du site.

4.3.3 Concentrations en moyenne annuelle

Le Tableau 4 présente les valeurs calculées en moyenne annuelle en thoron exprimée en Bq/m³ au niveau des points d'intérêt présentés précédemment (cf. Figure 14), au niveau de la zone la plus exposée du domaine d'étude et au niveau de la zone la plus exposée en dehors de l'enceinte du site ATLab.

Tableau 4 : concentrations en moyenne annuelle (Bq/m³)

Concentrations en moyenne annuelle en Thoron Rn-220 (Bq/m ³)		Fonctionnement normal	
Points d'intérêt	1	K-Pla Park (parc d'activités)	0,11
	2	Entreprise GOODMAN	0,03
	3	Entreprise RESOTAINER	0,21
	4	Hôtel-Restaurant Duval	0,04
	5	Habitations Nord-Ouest	0,02
	6	Ecole Pablo Picasso	0,001
	7	EHPAD La roselière	0,02
	8	Habitation la plus exposée	0,14
	9	Zone agricole	0,08
Zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site ATLab (en bordure nord du site)		1,00	

Parmi les points d'intérêt retenus, le point correspondant à l'entreprise RESOTAINER (point n°3) est le plus exposé : il est situé sous les vents dominants venant du sud-ouest.

Les Figure 15 (vue de dessus) et Figure 16 (vue 3D) et présentent la cartographie des concentrations en moyenne annuelle calculées au niveau du sol pour le thoron Rn-220 sur le domaine d'étude. Les aplats colorés montrent les zones où les concentrations au niveau du sol sont comprises entre deux valeurs, par exemple, les zones en « bleu clair » correspondent à des concentrations en thoron comprises entre 0,03 et 0,3 Bq/m³. Les cartographies montrent que les concentrations les plus élevées sont situées le long de la façade nord du bâtiment abritant le projet. Les concentrations diminuent rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du site.

Figure 15 : carte des concentrations au sol en moyenne annuelle en thoron (Rn-220)

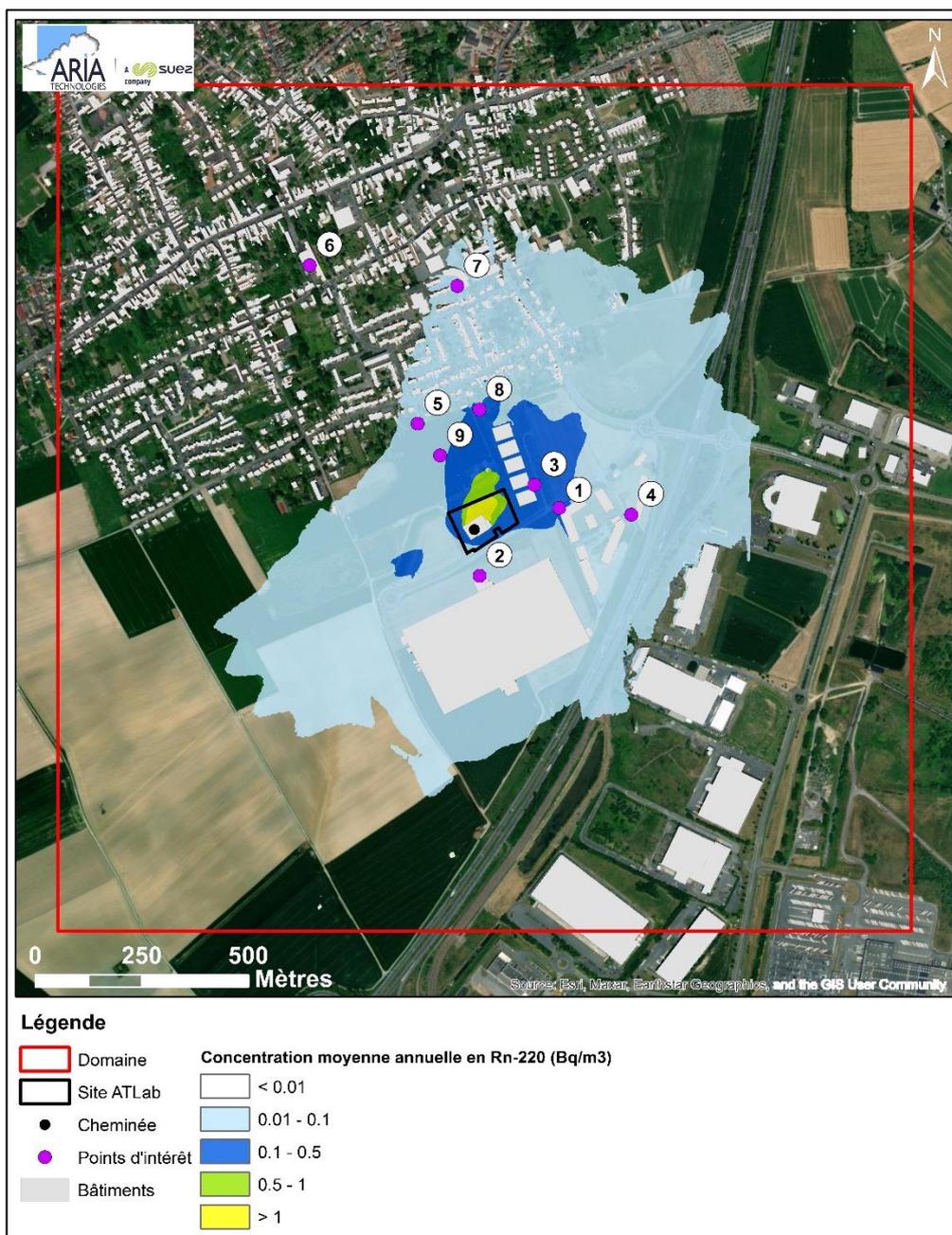


Figure 16 : vue 3D des concentrations en moyenne annuelle en thoron (Rn-220)



4.3.4 Dépôts au sol

Le Tableau 5 présente les valeurs calculées en moyenne annuelle en thoron exprimée en Bq/m²/s au niveau des points d'intérêt présentés précédemment (cf. Figure 14), au niveau de la zone la plus exposée du domaine d'étude, au niveau de la zone la plus exposée en dehors de l'enceinte du site ATLab Europe ainsi qu'au niveau de la zone urbaine la plus exposée, pour les deux scénarios étudiés.

Tableau 5 : dépôts au sol moyens annuels (Bq/m²/s)

Dépôts au sol moyens annuels en Thoron Rn-220 (Bq/m ² /s)			Fonctionnement normal
Points d'intérêt	1	K-Pla Park (parc d'activités)	1,8E-05
	2	Entreprise GOODMAN	1,9E-05
	3	Entreprise RESOTAINER	3,7E-05
	4	Hôtel-Restaurant Duval	6,6E-06
	5	Habitation Nord-Ouest	4,0E-06
	6	Ecole Pablo Picasso	1,3E-07
	7	EHPAD La roselière	2,6E-06
	8	Habitation la plus exposée	2,1E-05
	9	Zone agricole	1,1E-05
Zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site ATLab (en bordure nord du site)			2,0E-04

Parmi les points d'intérêt retenus, le point correspondant à l'entreprise RESOTAINER (point n°3) est le plus exposé.

La Figure 17 présente la cartographie des dépôts moyens annuels calculés au niveau du sol pour le thoron Rn-220 sur le domaine d'étude. La cartographie montre que les dépôts les plus élevés sont situés le long de la façade nord du bâtiment abritant le projet. Les dépôts diminuent rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du site.

Figure 17 : carte des dépôts moyens annuels au sol en thoron (Rn-220)



5. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE

5.1 IDENTIFICATION DES DANGERS

5.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations

5.1.1.1 Effets sur la santé humaine (source : www.asn.fr)

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.

Ils peuvent être classés en deux catégories :

- les effets à incidences déterministes ou non stochastiques ;
- les effets à incidences aléatoires ou stochastiques.

5.1.1.1.1 Les effets déterministes

Les effets déterministes se produisent de manière certaine. Pour des doses élevées (supérieures à plusieurs grays), ils sont observés chez tous les sujets exposés. Ce sont donc des effets à seuil.

Ils se déclarent en général de manière précoce, avec des temps de latence compris entre quelques jours et quelques mois. Leur gravité augmente avec la dose absorbée.

Généralement, les effets déterministes se produisent dans le cas d'une exposition unique à fort débit de dose³. Ce sont donc souvent dans le cas de situations accidentelles. Ils ne sont pas étudiés dans le cadre de la présente étude.

5.1.1.1.2 Les effets à incidences aléatoires ou stochastiques.

Les expositions à des doses plus ou moins élevées de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme sous la forme de cancers ou de mutations génétiques affectant sa descendance. Dans ce cas, la gravité de l'effet demeure identique quelle que soit la dose ; seule la probabilité d'apparition de l'effet est fonction de la dose absorbée. En d'autres termes, le pourcentage de sujets exposés chez qui on observe ce type d'effet augmente avec la dose.

Le temps de latence (temps séparant l'exposition de l'apparition de l'effet) est en moyenne beaucoup plus long que pour les effets déterministes (plusieurs dizaines d'années). Enfin, on considère que la moindre dose de rayonnement est susceptible de provoquer ce type d'effets.

³ <https://www.asn.fr/lexique/D/Debit-de-dose>

5.1.1.2 Exposition des populations

Les radionucléides contenus dans les rejets atmosphériques peuvent atteindre l'homme via l'air, le sol et la chaîne alimentaire. L'exposition d'une personne aux rayonnements ionisants peut exister sous deux formes différentes :

- une **exposition externe** lorsque la source est à l'extérieur de l'organisme ;
- une **exposition interne** lorsque la source de rayonnement est absorbée à l'intérieur de l'organisme.

Les voies de contamination possibles sont les suivantes :

- l'exposition pendant le passage du panache, qui conduit à une exposition externe par irradiation et à une exposition interne par inhalation ;
- l'exposition externe due aux dépôts sur le sol ;
- l'exposition interne par ingestion de produits d'origine végétale cultivés sur des zones de dépôts ; l'activité transférée par cette voie d'exposition provient des dépôts d'aérosols lors du passage du panache et de la pluie sur les végétaux, ainsi que des transferts racinaires depuis les dépôts sur le sol ;
- l'exposition interne par ingestion de produits d'origine animale provenant d'élevages qui ont consommé des produits issus des zones de dépôt.

L'eau de boisson et le poisson ne sont pas considérés comme des vecteurs de transfert des radionucléides émis dans l'atmosphère.

5.1.2 Relation Dose-Réponse

Il n'existe pas de Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour l'exposition aux rayonnements.

La réglementation nationale de la santé publique et du travail fixe, pour le public et les travailleurs, des limites de doses individuelles annuelles cumulées admissibles. Pour le public, la limite de la dose efficace est fixée à 1 mSv/an.

L'évaluation des risques se fait en comparant l'exposition des personnes exposées vis-à-vis de la limite pour le public de 1 mSv par an.

5.2 SCHEMA CONCEPTUEL D'EXPOSITION

5.2.1 Voies d'exposition

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

- pendant le passage du panache
=> exposition externe par irradiation et par passage cutané
=> exposition interne par inhalation
- 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 sur les végétaux, 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

L'eau de boisson et le poisson ne sont pas considérés comme des vecteurs de transfert des radionucléides émis dans l'atmosphère.

5.2.2 Schéma conceptuel d'exposition

La voie d'exposition principale pour le thoron (Rn-220), compte tenu de ses caractéristiques, est l'inhalation. L'exposition externe sera également conservée.

Le thoron (Rn-220), compte-tenu de sa durée de vie très courte, n'est pas concerné par la voie par ingestion. Cependant, le caractère négligeable de la voie d'exposition interne par ingestion est démontré en Annexe 5 car le Pb-212, descendant du Rn-220, a une demi-vie de 10,6 h et peut alors se déposer sur des légumes et fruits issus de jardins et potagers et entraîner une dose liée à leur consommation.

Les voies d'exposition retenues sont donc :

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

5.3 ESTIMATION DES DOSES D'EXPOSITION

L'ensemble des paramètres relatifs au radionucléide étudié sont issus de l'arrêté du 16 novembre 2023 et du Federal Guidance n°15⁴ relatifs aux modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

⁴ "Federal Guidance Report n°15 - External Exposure to radionuclides in air, water and soil", EPA United States Environmental/Protection Agency, August 2019.

5.3.1 Scénario d'exposition

Les scénarios retenus sont indiqués dans le Tableau 6.

Tableau 6 : scénarios d'exposition retenus

Scénario retenu	Typologie	Durée d'exposition	Temps d'exposition	Individu	Voies d'exposition
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	1 an	8 760 h/an (toute l'année)	Adulte (17 ans et plus) Bébé (enfant de 1 à 2 ans) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	Exposition interne par inhalation du panache Exposition externe aux dépôts au sol
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site (zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site)		182,5 h (0,5h/j, 7j/7, 52 semaines par an)	Adulte (17 ans et plus) Bébé (enfant de 1 à 2 ans) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	
	Habitation la plus exposée (point n°8)		8 577,5 h (le reste du temps)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6)		1 296 h (9h/j, 4j/7, 36 semaines par an)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 2 à 7 ans*	
	Habitation la plus exposée (point n°8)		7 464 h (le reste du temps)		
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3)		2 000 h/an	Adulte (17 ans et plus)	
	Habitation la plus exposée (point n°8)		6 760 h/an (le reste du temps)		
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)		2 000 h/an	Adulte (17 ans et plus)	
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	8 760 h/an (toute l'année)	Adulte (17 ans et plus)		

* L'école Pablo Picasso accueille des enfants de maternelle d'où le choix de cette classe d'âge pour ce scénario.

A noter qu'il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de l'exposition externe par le panache.

5.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation)

5.3.2.1 Méthodologie

L'irradiation a lieu :

- Par exposition au panache ;
- Par exposition aux dépôts.

5.3.2.1.1 Exposition externe au panache

La dose efficace annuelle due à l'exposition externe au panache est donnée par :

$$E_{pan} = A_{air} \times CD_{pan} \times F_{tp} \times t$$

Avec :

E_{pan} : dose efficace annuelle due au panache (Sv.an⁻¹)

A_{air} : concentration dans l'air (Bq.m⁻³)

CD_{pan} : coefficient de dose efficace externe au panache (Sv.s⁻¹)/(Bq.m⁻³)

F_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache (s.d.)

t : durée d'exposition (en secondes)

5.3.2.1.2 Exposition externe aux dépôts

La dose efficace annuelle due à l'exposition externe aux dépôts est donnée par :

$$E_{dep} = A_{dep} \times \frac{(1 - e^{-(\lambda_m + \lambda_r) \times t})}{(\lambda_m + \lambda_r)} \times CD_{dep} \times F_{tp} \times t$$

Avec :

E_{dep} : dose efficace annuelle due au dépôt (Sv.an⁻¹),

A_{dep} : activité déposée sur le sol (Bq.m⁻².s⁻¹),

CD_{dep} : coefficient de dose efficace externe au dépôt (Sv.s⁻¹ / Bq.m⁻²)

F_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition externe au dépôt (s.d.).

t : durée d'exposition (en secondes, pris égale à 1 an)

λ_r : constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s⁻¹),

λ_m : constante de décroissance par migration dans le sol du radionucléide considéré (s⁻¹)

En général, la valeur par défaut de la constante de décroissance par migration dans le sol correspond à une période de 100 ans (CCE, 1995). Cette valeur est retenue.

5.3.2.2 Hypothèses

Il a été choisi de retenir les coefficients de dose efficace externe au panache et au dépôt du thoron 220. Faute de données dans l'arrêté du 16 novembre 2023, les valeurs des coefficients de dose efficace externe au panache sont issues du Federal Guidance n°15⁵, et sont présentées dans le Tableau 7.

Pour rappel, le Pb-212 est le descendant du Rn-220 ayant la demi-vie la plus longue (10,6 h). Toutefois, ses rejets et son impact chimique sont négligeables vis-à-vis de ceux en Rn-220 (cf.

⁵ "Federal Guidance Report n°15 - External Exposure to radionuclides in air, water and soil", EPA United States Environmental/Protection Agency, August 2019.

Annexe 2).

Tableau 7 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe par irradiation

	Constante radioactive	Irradiation au panache	Irradiation au dépôt	Durée d'exposition
Unités	s ⁻¹	(Sv/s)/(Bq/m ³)	(Sv/s)/(Bq/m ²)	année
Rn-220	1,25E-02	2,77E-17	4,06E-19	1 année, dose calculée au bout de 1 an de fonctionnement

La fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache est différente selon le lieu du scénario étudié (entre 182,5 et 8 760 h par an, cf. Tableau 6). Il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de cette voie d'exposition. C'est une approche conservative.

5.3.2.3 Calcul de la dose d'exposition par irradiation

Le Tableau 8 présente les doses d'exposition pour les différents scénarios étudiés.

A noter que, quel que soit le groupe d'individu étudié (enfant ou adulte), la dose d'exposition par irradiation est identique car l'exposition par irradiation ne dépend d'aucun paramètre physique lié à l'individu.

Tableau 8 : dose d'exposition par irradiation (mSv/an)

Scénario	Typologie	Cible	Dose externe (irradiation panache)	Dose externe (irradiation dépôts)	Dose externe totale par irradiation
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,3E-07	2,1E-11	1,3E-07
		Enfant	1,3E-07	2,1E-11	1,3E-07
		Adulte	1,3E-07	2,1E-11	1,3E-07
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site (zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site)	Bébé	1,8E-08	4,3E-12	1,8E-08
		Enfant	1,8E-08	4,3E-12	1,8E-08
		Adulte	1,8E-08	4,3E-12	1,8E-08
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,2E-07	2,1E-11	1,2E-07
		Enfant	1,2E-07	2,1E-11	1,2E-07
		Adulte	1,2E-07	2,1E-11	1,2E-07
	TOTAL	Bébé	1,4E-07	2,5E-11	1,4E-07
		Enfant	1,4E-07	2,5E-11	1,4E-07
		Adulte	1,4E-07	2,5E-11	1,4E-07
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6)	Enfant	8,1E-11	2,0E-14	8,1E-11
		Adulte	8,1E-11	2,0E-14	8,1E-11
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Enfant	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07
		Adulte	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07
	TOTAL	Enfant	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07
		Adulte	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	4,2E-08	8,7E-12	4,2E-08
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Adulte	9,7E-08	1,6E-11	9,7E-08
	TOTAL	Adulte	1,9E-07	3,4E-11	1,9E-07
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	4,2E-08	8,7E-12	4,2E-08
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	Adulte	1,4E-08	2,6E-12	1,4E-08

5.3.3 Exposition interne par inhalation

5.3.3.1 Méthodologie

Pour le radon 220, la dose efficace est calculée à partir de l'Energie Alpha Potentielle (EAP) qui prend en compte l'ensemble de ses descendants considérés comme étant à l'équilibre avec lui.

$$E_{inh\ Rn220} = A_{air} \times EAP \times Cd\ Rn220 \times F_{tp} \times t$$

Avec :

$E_{inh\ Rn220}$: dose efficace due à l'inhalation (Sv.an⁻¹),

A_{air} : concentration dans l'air (Bq.m⁻³)

EAP : Energie Alpha Potentielle (J/m³ pour 1 Bq/m³ de radon 220 à l'équilibre),

Cd Rn220 : coefficient de dose applicable pour les descendants du radon 220 (Sv/J.h/m³).

F_{tp} : fraction de temps où l'individu est immergé dans le panache (s.d.)

t : durée d'exposition (en h)

5.3.3.2 Hypothèses

L'Arrêté du 13 novembre 2023 propose un coefficient de dose pour les descendants du radon 220 dans les lieux de travail. A défaut de valeur spécifique pour la population générale, il a été retenu la valeur « travailleurs » proposée, c'est une hypothèse majorante.

Tableau 9 : valeurs retenues (EAP, FC Rn)

Unités	Unités	Valeur	Source
EAP	J/m ³ pour 1 Bq/m ³ de radon 220 à l'équilibre	7,56E-08 ⁶	ICPR 137 ⁷
FC Rn	Sv /J.h/m ³	1,5	Arrêté du 13 novembre 2023

⁶ EAP pour le thoron et l'ensemble de ces descendants, cf. tableau A1 p455, ICPR, 2017.

⁷ ICPR, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICPR Publication 137. Ann. ICPR 46(3/4).

5.3.3.3 Calcul de la dose d'exposition par inhalation

Le Tableau 10 présente les doses d'exposition par inhalation pour chaque scénario retenu (cf. Tableau 6 paragraphe 5.2).

Tableau 10 : dose d'exposition par inhalation (mSv/an)

Scénario	Typologie	Cible	Dose d'exposition par inhalation (mSv/an) – FC Rn conforme à l'arrêté du 16/11/2023
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	0,14
		Enfant	0,14
		Adulte	0,14
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site (zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site)	Bébé	0,02
		Enfant	0,02
		Adulte	0,02
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	0,14
		Enfant	0,14
		Adulte	0,14
	TOTAL	Bébé	0,16
		Enfant	0,16
		Adulte	0,16
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6)	Enfant	0,0001
		Adulte	0,0001
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Enfant	0,12
		Adulte	0,12
	TOTAL	Enfant	0,12
		Adulte	0,12
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	0,05
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Adulte	0,11
	TOTAL	Adulte	0,16
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	0,05
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	Adulte	0,02

5.4 EVALUATION DES RISQUES

5.4.1 Méthodologie

Il n'existe pas de Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour l'exposition aux rayonnements. L'évaluation des risques se fait en comparant l'exposition des personnes exposées vis-à-vis de la limite pour le public de 1 mSv par an (la réglementation française⁸ fixe à 1 millisievert (mSv) par an la dose efficace maximale admissible résultant des activités humaines en dehors de la radioactivité naturelle et des doses reçues en médecine. Il s'agit de "doses corps entier").

L'objectif de l'évaluation de l'impact du rejet de substances radioactives en fonctionnement normal est de situer l'impact ajouté vis-à-vis de la limite réglementaire d'exposition pour le public (1 mSv par

⁸ <https://www.laradioactivite.com/site/pages/LimitesDoses.htm>

an) et des objectifs de sûreté pour les travailleurs. Cet impact ajouté pour le public est comparé à la dose moyenne annuelle en France (4,5 mSv⁹). Les doses efficaces sont évaluées après 1 an de fonctionnement des installations.

5.4.2 Evaluation des risques sanitaires

Le Tableau 11 et la Figure 18 synthétisent les résultats de doses efficaces d'exposition pour les différents scénarios d'exposition retenus.

Tableau 11 : doses efficaces totales

Scénario	Typologie	Cible	Dose externe totale par irradiation	Dose d'exposition par inhalation	Dose totale annuelle	Dose efficace admissible en France	Dose efficace moyenne annuelle en France
			(mSv/an)				
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,3E-07	0,14	0,14	1*	4,5**
		Enfant	1,3E-07	0,14	0,14		
		Adulte	1,3E-07	0,14	0,14		
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site + Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,4E-07	0,16	0,16		
		Enfant	1,4E-07	0,16	0,16		
		Adulte	1,4E-07	0,16	0,16		
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6) + Habitation la plus exposée (point n°8)	Enfant	1,1E-07	0,12	0,12		
		Adulte	1,1E-07	0,12	0,12		
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3) Habitation la plus exposée (point n°8)	Adulte	1,4E-07	0,16	0,16		
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	4,2E-08	0,05	0,05		
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	Adulte	1,4E-08	0,02	0,02		

* résultant des activités humaines

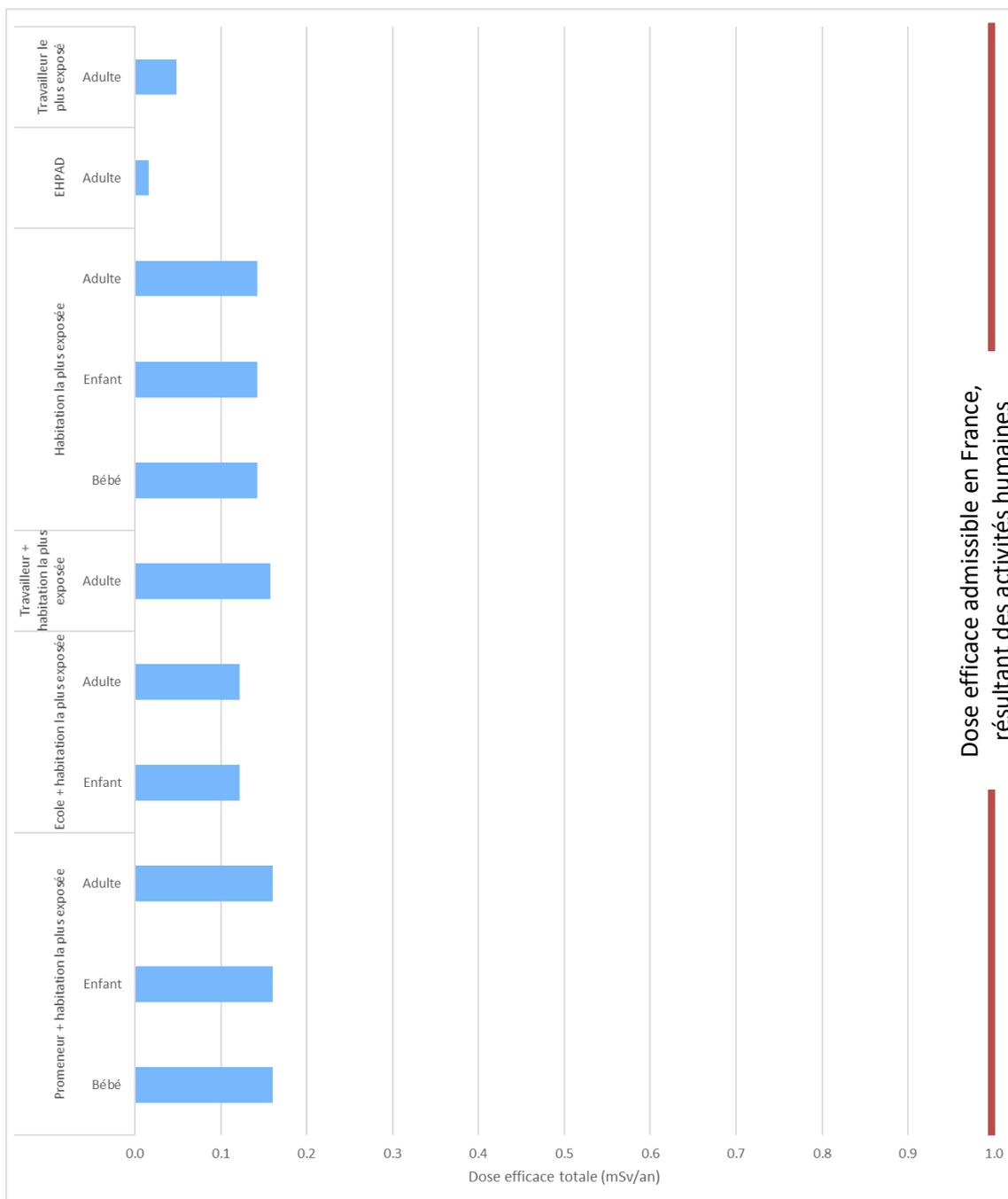
** 2,9 mSv d'origine naturelle et 1,6 mSv d'origine artificielle

Quel que soit le scénario étudié et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions de thoron (Rn-220) est faible vis-à-vis de la dose admissible en France et représente au maximum 16% de celle-ci.

Pour tous les scénarios, l'exposition externe par irradiation est négligeable devant l'exposition par inhalation. Également, l'exposition externe par irradiation dépôts est négligeable devant l'exposition par irradiation panache.

⁹ IRSN 2016 toutes sources d'exposition confondues : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-population/exposition-population-france-metropole/Documents/IRSN_Infographie-Exposition-population_201609.pdf

Figure 18 : synthèse des doses efficace



Les résultats détaillés sont disponibles dans le Tableau 12.

Tableau 12 : doses efficaces totales

Scénario	Typologie	Cible	Dose externe (irradiation panache)	Dose externe (irradiation dépôts)	Dose externe totale par irradiation	Dose d'exposition par inhalation (mSv/an)	Dose totale annuelle (mSv/an)	Dose efficace admissible en France	Dose efficace moyenne annuelle en France
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,3E-07	2,1E-11	1,3E-07	0,14	0,14	1*	4,5**
		Enfant	1,3E-07	2,1E-11	1,3E-07	0,14	0,14		
		Adulte	1,3E-07	2,1E-11	1,3E-07	0,14	0,14		
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site (zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site)	Bébé	1,8E-08	4,3E-12	1,8E-08	0,02	0,02		
		Enfant	1,8E-08	4,3E-12	1,8E-08	0,02	0,02		
		Adulte	1,8E-08	4,3E-12	1,8E-08	0,02	0,02		
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,2E-07	2,1E-11	1,2E-07	0,14	0,14		
		Enfant	1,2E-07	2,1E-11	1,2E-07	0,14	0,14		
		Adulte	1,2E-07	2,1E-11	1,2E-07	0,14	0,14		
	TOTAL	Bébé	1,4E-07	2,5E-11	1,4E-07	0,16	0,16		
		Enfant	1,4E-07	2,5E-11	1,4E-07	0,16	0,16		
		Adulte	1,4E-07	2,5E-11	1,4E-07	0,16	0,16		
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6)	Enfant	8,1E-11	2,0E-14	8,1E-11	0,0001	0,0001		
		Adulte	8,1E-11	2,0E-14	8,1E-11	0,0001	0,0001		
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Enfant	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07	0,12	0,12		
		Adulte	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07	0,12	0,12		
	TOTAL	Enfant	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07	0,12	0,12		
		Adulte	1,1E-07	1,8E-11	1,1E-07	0,12	0,12		
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	4,2E-08	8,7E-12	4,2E-08	0,05	0,05		
	Habitation la plus exposée (point n°8)	Adulte	9,7E-08	1,6E-11	9,7E-08	0,11	0,11		
	TOTAL	Adulte	1,4E-07	2,5E-11	1,4E-07	0,16	0,16		
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	4,2E-08	8,7E-12	4,2E-08	0,05	0,05		
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	Adulte	1,4E-08	2,6E-12	1,4E-08	0,02	0,02		

* résultant des activités humaines

** 2,9 mSv d'origine naturelle et 1,6 mSv d'origine artificielle

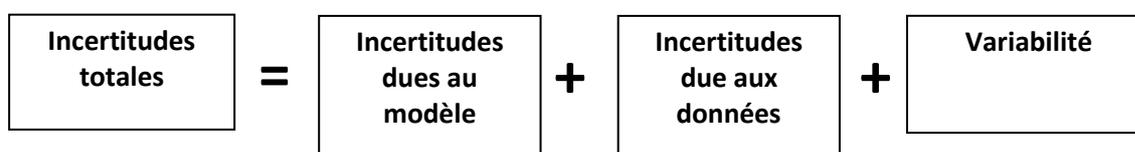
5.5 INCERTITUDES

Ce chapitre a pour objectif d'inventorier les incertitudes liées à la démarche d'évaluation des risques sanitaires ou aux hypothèses retenues dans les différentes étapes.

Les incertitudes sont classées en fonction de l'influence qu'elles peuvent avoir sur les résultats d'évaluation des risques sanitaires, chaque fois que cette précision peut être apportée.

5.5.1 Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique

Les incertitudes liées à la modélisation de pollution de l'air ont été définies (Morgan M.G, 1990) comme étant le cumul, au prorata de leurs contributions, des incertitudes des différentes données nécessaires au fonctionnement du modèle et au modèle lui-même. Ces incertitudes peuvent être résumées par l'équation ci-dessous :



Pour d'autres auteurs, elles ont pour origine trois sources majeures (Hanna, 2004) en ce qui concerne la modélisation de la qualité de l'air :

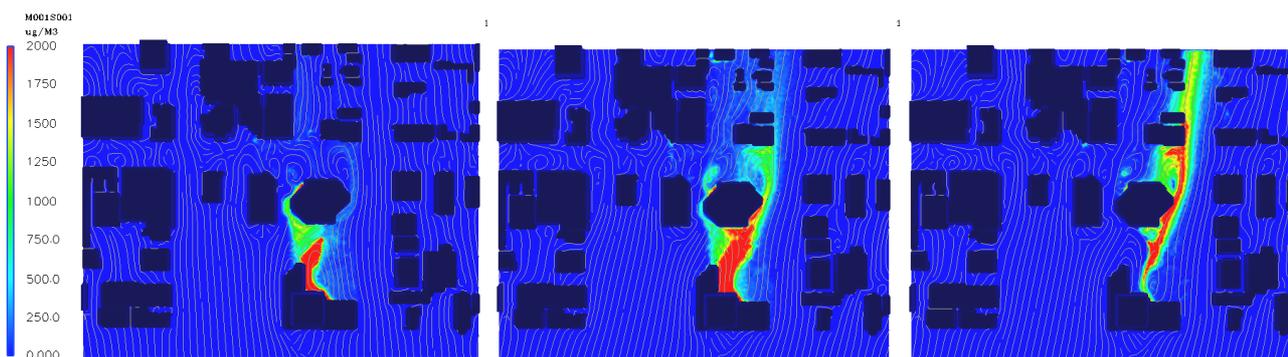
- La variabilité des résultats due aux fluctuations naturelles de la concentration dans l'atmosphère (turbulence aléatoire). Ce type d'incertitude sera présent dans n'importe quel modèle prenant en compte des phénomènes météorologiques ;
- Les erreurs sur les données d'entrées : émissions, données sur les instruments de mesures ou manque de représentativité des instruments de mesures par exemple ;
- Les erreurs dues à la représentation de la physique dans les modèles soit dues à des erreurs de formulation soit dues à des incertitudes dans les paramètres utilisés dans les formulations.

5.5.1.1 Incertitudes liées au modèle : validation du modèle MSS

Concernant MSS, des validations ont été réalisées à l'aide de campagnes de mesures effectuées en soufflerie et en milieu urbain réel. Certains de ces cas de validation sont présentés ci-dessous.

- Le projet EMU est une simulation de l'émission de scalaires passifs en atmosphère neutre, réalisée au laboratoire EnFlo de l'Université anglaise de Surrey. Il est constitué de plusieurs expériences (formes et nombre de bâtiments divers, données météorologiques et d'émission distinctes).
- URBAN 2000 fut une campagne de mesures menée par des chercheurs américains à Salt Lake City en Octobre 2000. Le Département de l'Energie (US-DOE), le DOD, la DTRA, et des laboratoires gouvernementaux anglais et américains se sont réunis afin de mener à bien ce gigantesque projet. L'ensemble des données et des résultats est accessible sur <http://urban.llnl.gov/>.
- La campagne MUST a également été financée par la DTRA. Elle constitue une expérience intermédiaire entre la soufflerie et un terrain urbain réel puisque les bâtiments ont été simulés par des containers.

Figure 19 : lignes de courant et concentration en SF6 à 4h10, 4h20 et 4h30



MSS a obtenu de bonnes performances dans le cadre de plusieurs campagnes de mesures in situ, ce qui est un gage de qualité.

5.5.1.2 Incertitudes liées aux données d'entrée

Les données d'entrées du modèle sont de trois natures :

- Les émissions ;
- La météorologie ;
- Les paramètres du modèle choisis.

5.5.1.2.1 Incertitudes liées aux émissions

Les concentrations et dépôts calculés par le modèle à une échéance donnée sont directement proportionnels aux flux émis par l'installation.

Notons que la configuration étudiée est maximaliste (cf. Annexe 1) et que les résultats ainsi obtenus sont majorants.

5.5.1.2.2 Incertitudes liées aux caractéristiques thermo-dynamiques de l'installation

Les paramètres thermodynamiques retenus pour l'installation ont un impact direct sur les résultats de la modélisation. Un calcul spécifique a été réalisé en supposant une vitesse d'éjection et un diamètre plus faibles que ceux retenus dans la présente étude.

Le Tableau 13 présente les résultats de la modélisation dans la configuration :

- Vitesse d'éjection : 10 m/s (au lieu de 14 m/s).

Les autres paramètres (température, hauteur d'éjection, localisation et flux à l'émission en radon 220) restent identiques à ceux présentés dans le Tableau 1 p.7.

Ce scénario est un scénario hypothétique non réaliste du fonctionnement normal du site car la vitesse d'éjection minimale sera de 14 m/s. C'est pourquoi il n'est présenté que dans la partie Incertitudes.

Tableau 13 : résultats de la modélisation avec modification des caractéristiques de l'installation

Concentration en Thoron Rn-220 (Bq/m ² /s)		Scénario 10 m/s	Rappel Scénario 14 m/s (scénario retenu)	
Points d'intérêt	1	K-Pla Park (parc d'activités)	0,18	0,11
	2	Entreprise GOODMAN	0,06	0,03
	3	Entreprise RESOTAINER	0,29	0,21
	4	Hôtel-Restaurant Duval	0,05	0,04
	5	Habitations Nord-Ouest	0,03	0,02
	6	Ecole Pablo Picasso	0,00	0,001
	7	EHPAD La roselière	0,02	0,02
	8	Habitation la plus exposée	0,16	0,14
	9	Zone agricole	0,10	0,08
Zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site ATLab Europe (en bordure nord du site)		1,44	1,00	

Les concentrations sont environ 31% plus importantes pour ce scénario avec une vitesse de 10 m/s et un diamètre de 0,85 m.

Les doses efficaces totales alors obtenues sont présentées dans le Tableau 14. Elles sont en moyenne supérieures de 19% à celles présentées dans le corps du rapport (cf. partie 5) et rappelées ci-dessous (scénario 14 m/s).

Tableau 14 : doses efficaces totales avec modification des caractéristiques de l'installation

Scénario	Typologie	Cible	Dose totale annuelle (mSv/an)		Dose efficace admissible en France (mSv/an)	Dose efficace moyenne annuelle en France (mSv/an)
			Scénario 10 m/s	Scénario 14 m/s (retenu)		
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	0,16	0,14	1*	4,5**
		Enfant	0,16	0,14		
		Adulte	0,16	0,14		
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site + Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	0,19	0,16		
		Enfant	0,19	0,16		
		Adulte	0,19	0,16		
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6) + Habitation la plus exposée (point n°8)	Enfant	0,14	0,12		
		Adulte	0,14	0,12		
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3) Habitation la plus exposée (point n°8)	Adulte	0,19	0,16		
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)	Adulte	0,06	0,05		
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	Adulte	0,02	0,02		

* résultant des activités humaines

** 2,9 mSv d'origine naturelle et 1,6 mSv d'origine artificielle

5.5.1.2.3 Incertitudes liées aux mesures météorologiques

Les données météorologiques sont issues de mesures Météo-France.

L'incertitude la plus grande dans la fourniture des données météorologiques est l'incertitude sur la direction du vent qui est de +/- 5°. Ce manque de précision sur la direction de vent peut avoir pour incidence la surestimation des concentrations dans les 36 directions « mesurées » et une sous-estimation dans les zones entre deux données de direction « mesurées ».

Les précisions des mesures de vent d'un dixième m/s et celle de la température d'un dixième de degré Celsius sont largement suffisantes compte tenu de leur intervention dans les équations.

Les données de nébulosité sont exprimées en octas. Elles sont issues d'une observation « manuelle » de l'opérateur Météo-France.

La station météorologique de Valenciennes est située à environ 11 km du site. Même si le relief est relativement plat entre la station et le site, l'utilisation de données météorologiques recueillies à distance du site est également source d'incertitudes.

5.5.1.2.4 Incertitudes liées aux paramètres du modèle

Dans les modèles complexes prenant en compte de façon fine les géométries et ayant des paramétrisations fines des phénomènes physiques, l'incertitude liée au choix par l'utilisateur des paramètres du modèle, c'est-à-dire des options de calcul mais également de la génération du maillage de calcul peut être grande. Des études ont montré qu'à données identiques, le même modèle mis en œuvre par deux équipes différentes pouvait conduire à des résultats présentant des écarts importants.

Concernant les paramètres liés aux polluants (vitesse de dépôt, coefficient de lessivage, type particulaire ou non), ces paramètres sont issus de l'état de l'art actuel des connaissances.

5.5.1.3 Incertitudes liées à la variabilité

Les phénomènes de turbulence de micro-échelle peuvent induire des fluctuations importantes des concentrations et des paramètres météorologiques. Le modèle PMSS permet aujourd'hui de quantifier les fluctuations de concentrations autour de la concentration moyenne calculée.

5.5.2 Incertitudes relatives à l'évaluation des risques sanitaires

5.5.2.1 Facteurs de surestimation des risques

La méthodologie pour estimer les risques sanitaires potentiels emploie par nature les principes de précaution et sont par défaut conservatrices.

Durée d'exposition

Elle est au total de 8 760 h/ an mais le temps passé en dehors du lieu de résidence dépend du scénario étudié :

- Pour les promeneurs : 182,5 h/an passées en bordure du site ;
- Pour les enfants et les enseignants : 1 296 h/an passées au niveau de l'école la plus proche ;
- Pour les travailleurs : 2 000 h/an passées au niveau de l'entreprise la plus exposée.

Pour la population générale, en absence de données sur le temps d'exposition des personnes, il est pris l'hypothèse qu'elles séjournent sur leur lieu d'habitation en permanence (365 j/an, 24h/24). Cette hypothèse est majorante puisque les personnes ne seront pas exposées en permanence car elles sont amenées à se déplacer pour des raisons personnelles (congés, loisirs) et professionnelles.

Pénétration des polluants dans les habitats

Il est posé l'hypothèse que les polluants ont un taux de pénétration dans les habitats de 100 %, ce qui est une hypothèse majorante.

5.5.2.2 Facteurs dont le sens d'influence sur les résultats n'est pas connu ou est variable

Constance des paramètres

Toutes les données utilisées (émissions, dispersion, transferts, exposition) sont supposées rester constantes pendant les années d'exposition futures étudiées.

Interactions des polluants

En absence de connaissances scientifiques suffisantes sur les interactions des polluants les uns par rapport aux autres et des conditions d'interactions en eux, il a été considéré que les polluants qui avaient la même cible organique et le même mécanisme d'action cumulaient leurs risques. En réalité, les polluants peuvent également avoir des effets antagonistes (dans ce cas nous aurions majoré les risques) ou synergiques (dans ce cas nous aurions minimisé les risques).

6. CONCLUSION

Dans le cadre de sa demande d'autorisation, Orano Med a demandé à SUEZ Aria Technologies de réaliser une étude d'impact radiologique liée aux rejets atmosphériques de la future installation ATLab située à Onnaing (59).

Les rejets gazeux radioactifs du site ATLab d'Onnaing sont composés uniquement de thoron (Rn-220).

Dans ce contexte, SUEZ Aria Technologies a réalisé une étude de dispersion et une estimation des doses d'expositions afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques du thoron sur les travailleurs et riverains présents autour du site.

Les voies d'exposition retenues sont :

- l'exposition externe par irradiation (exposition externe au panache et aux dépôts) ;
- l'exposition interne par inhalation.

Plusieurs scénarios d'exposition ont été étudiés :

Scénario retenu	Typologie	Durée d'exposition	Temps d'exposition	Individu	Voies d'exposition
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	1 an	8 760 h/an (toute l'année)	Adulte (17 ans et plus) Bébé (enfant de 1 à 2 ans) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	Exposition interne par inhalation du panache Exposition externe aux dépôts au sol
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site (zone la plus exposée du domaine d'étude en dehors de l'enceinte du site)		182,5 h (0,5h/j, 7j/7, 52 semaines par an)	Adulte (17 ans et plus) Bébé (enfant de 1 à 2 ans) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	
	Habitation la plus exposée (point n°8)		8 577,5 h (le reste du temps)		
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6)		1 296 h (9h/j, 4j/7, 36 semaines par an)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 2 à 7 ans	
	Habitation la plus exposée (point n°8)		7 464 h (le reste du temps)		
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3)		2000 h/an	Adulte (17 ans et plus)	
	Habitation la plus exposée (point n°8)		6760 h/an (le reste du temps)		
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)		2 000 h/an	Adulte (17 ans et plus)	
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	8 760 h/an (toute l'année)	Adulte (17 ans et plus)		

Les doses d'exposition pour les différents scénarios d'exposition sont rappelées dans le Tableau 12. Quel que soit le scénario d'exposition étudié, l'exposition externe par irradiation est négligeable devant l'exposition par inhalation.

Tableau 15 : doses efficaces totales

Scénario	Typologie	Cible	Dose externe totale par irradiation	Dose d'exposition par inhalation	Dose totale annuelle	Dose efficace admissible en France	Dose efficace moyenne annuelle en France
			(mSv/an)				
Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,3E-07	0,14	0,14	1*	4,5**
		Enfant	1,3E-07	0,14	0,14		
		Adulte	1,3E-07	0,14	0,14		
Promeneur + habitation la plus exposée	Chemin promenade en bordure du site + Habitation la plus exposée (point n°8)	Bébé	1,4E-07	0,16	0,16		
		Enfant	1,4E-07	0,16	0,16		
		Adulte	1,4E-07	0,16	0,16		
Ecole + habitation la plus exposée	Ecole Pablo Picasso (point n°6) + Habitation la plus exposée (point n°8)	Enfant	1,1E-07	0,12	0,12		
		Adulte	1,1E-07	0,12	0,12		
Travailleur + habitation la plus exposée	Entreprise RESOTAINER (point n°3) Habitation la plus exposée (point n°8)	Adulte	1,4E-07	0,16	0,16		
Travailleur le plus exposé	Entreprise RESOTAINER (point n°3)		4,2E-08	0,05	0,05		
EHPAD	EHPAD La roselière (point n°7)	Adulte	1,4E-08	0,02	0,02		

* résultant des activités humaines

** 2,9 mSv d'origine naturelle et 1,6 mSv d'origine artificielle

Quel que soit le scénario étudié et le profil (enfants ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions de thoron (Rn-220) est faible vis-à-vis de la dose admissible en France et représente au maximum 16% de celle-ci.

ANNEXES

Annexe 1 : Justification du terme source des rejets atmosphériques (fournie par le client)

Outre la détention de sources scellées destinées à la calibration et considéré comme négligeable, l'installation ATLab reçoit comme unique source radioactive non scellée du Thorium 228. Les substances radioactives détenues et manipulées au sein de l'installation ATLab sont donc le thorium 228 et ses descendants (les impuretés présentes dans le thorium 228 sont considérées comme négligeable). Tous les éléments issus de la chaîne de désintégration du thorium 228 sont à l'état solide à l'exception du ^{220}Rn .

Considérant le système de ventilation et de filtration mis en place au sein de l'ATLab :

- Ventilation des locaux : un niveau de filtration THE (Très Haute Efficacité) ;
- Ventilation des enceintes du procédé (enceintes blindées contenant les colonnes thorium..., boîte à gant) : deux niveaux de filtration mixte [1^{er} niveau : filtres THE + filtres à charbon actif ; 2^{ème} niveau : filtres THE + filtres charbon actif] ;
- Ventilation du réseau d'extraction chimique (sorbonnes, armoires ventilées) : un niveau de filtration mixte (THE + charbon actif)

Les rejets particuliers (alpha, beta) sont donc considérés comme nulle. L'absence de rejet sera garantie par la présence d'une sonde alpha/beta au niveau de l'émissaire de rejet.

Les seuls rejets atmosphériques possibles au niveau de l'installation ATLab sont donc les rejets gazeux dus au ^{220}Rn .

Orano Med exploite depuis plusieurs années l'installation LMT à Bessines-sur-Gartempe (87). Cette installation met en œuvre un terme source similaire à celui de l'ATLab à savoir des substances radioactives issues de la chaîne de désintégration naturelle du thorium.

A cet égard l'installation LMT détient une autorisation de rejet de 21,4 TBq/an pour un coefficient Q de $6,19 \cdot 10^7$. Le coefficient Q de l'installation ATLab étant de $6,9 \cdot 10^7$ (dans sa configuration maximaliste de production de 200 radiopharmaceutiques/jour) un rejet atmosphérique de 24 TBq/an en ^{220}Rn pourrait être envisagé initialement.

Néanmoins l'installation ATLab est équipée de 2 niveaux filtres à charbon actif* sur le réseau d'extraction procédé (avec pour chaque niveau entre 2 et 4 filtres selon les configurations). Or il a été démontré dans le cadre d'une étude menée au LMT (CRD-RE-22-021) la capacité de ces filtres à réduire la concentration en Rn-220 dans les rejets. L'hypothèse sur le terme source rejeté peut ainsi être divisé d'un facteur 3 par rapport à une configuration de l'ATLab sans filtre à charbon actif.

D'après le tableau de synthèse des résultats de l'étude précitée (CRD-RE-22-021), une filtration de 4 filtres à charbon actif sur le réseau engendre une diminution des rejets (en Bq/m³) d'un facteur 3 environ. Etant donné que l'installation ATLab possède à minima 2 filtres par niveau de filtration, et est équipée de 2 niveaux de filtration sur le réseau d'extraction, le facteur de réduction de 3 peut être choisi comme hypothèse (4 filtres à minima sont installés sur le réseau d'extraction procédé de l'ATLab). Cette hypothèse reste conservatrice, étant donné que l'étude montre que l'augmentation du nombre de filtres sur le réseau d'extraction engendre une diminution plus importante des rejets de thoron.

Le terme source des rejets atmosphériques en ^{220}Rn à l'émissaire est donc ré-évalué de façon conservatrice à 8 TBq/an (terme source initial divisé par le facteur de réduction retenu sur la base de l'étude précitée soit 24 TBq divisé par 3).

*La mise en œuvre de filtres à charbon actif sur le réseau d'extraction procédé correspond à la MTD (Meilleure Technique Disponible) identifiée par Orano Med concernant la limitation des rejets d'effluents gazeux.

Annexe 2 : Impact chimique du Pb-212

Afin de démontrer le caractère négligeable de l'impact chimique du Pb-212, l'équivalent massique du flux rejeté a été calculé et comparé à la VTR disponible par voie orale du plomb inorganique, indiquée dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Valeur Toxicologique de Référence pour les effets chroniques à seuil du plomb inorganique

Substance	Voie d'exposition	Population	VTR		Référence	Justification du choix
Plomb inorganique	Orale	Enfant ou adulte	0,63	µg/kg/j	ANSES 2013	VTR ANSES prioritaire

La formule permettant de calculer la masse de Pb-212 rejetée est la suivante :

$$A = \frac{m}{M} N_A \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Avec :

A : activité (Bq)

m : masse (g)

M : masse molaire (g/mol)

N_A : constante d'Avogadro ($6,02E+23 \text{ mol}^{-1}$)

$t_{1/2}$: temps de demi-vie (secondes)

Les rejets de Pb-212 représentent 11,7 GBq/an, soit l'activité en Rn-220 multipliée par un facteur 0,00144¹⁰. Les valeurs retenues ainsi que la masse calculée sont indiquées dans le Tableau 17.

Tableau 17 : calcul de la masse de Pb-212 rejetée

Paramètre	Unité	Valeur
Activité (A)	Bq	1,17E+10
Masse molaire (M)	g/mol	212
Temps de demi-vie ($t_{1/2}$)	s	38 304
Masse (m)	g	2,3E-07

La masse de Pb-212 rejetée annuellement est donc de 0,23 µg/an, soit 0,0006 µg/j, ce qui est très faible en comparaison avec la VTR par voie orale du plomb inorganique (0,63 µg/kg/j) applicable aux enfants et aux adultes.

¹⁰ Facteur calculé avec la formule de Bateman.

Annexe 3 : Fiche climatologique de la station Météo-France de Valenciennes (59)



FICHE CLIMATOLOGIQUE

Statistiques 1991-2020 et records

VALENCIENNES (59)

Indicatif : 59606004, alt : 50m, lat : 50°19'41"N, lon : 3°27'39"E

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
La température la plus élevée (°C)													
Records établis sur la période du 01-02-1987 au 02-10-2024													
	15.3	19.2	23.9	28	31.2	35	40.9	37.2	34.8	28.6	21.8	16.2	40.9
Date	09-2015	26-2019	31-2021	20-2018	29-2017	28-2011	25-2019	12-2003	15-2020	01-2011	12-1995	31-2022	2019
Température maximale (moyenne en °C)													
	6.4	7.6	11.4	15.1	18.8	21.9	24	24	20.4	15.5	10.2	6.9	15.2
Température moyenne (moyenne en °C)													
	3.9	4.5	7.4	10.1	13.6	16.6	18.7	18.6	15.5	11.7	7.3	4.5	11
Température minimale (moyenne en °C)													
	1.3	1.4	3.3	5	8.4	11.4	13.5	13.2	10.7	8	4.4	2	6.9
La température la plus basse (°C)													
Records établis sur la période du 01-02-1987 au 02-10-2024													
	-14.9	-13.3	-11.9	-4.9	-1.1	1.1	5	5.6	-0.4	-6.2	-10.1	-11.6	-14.9
Date	07-2009	04-2012	13-2013	11-2003	06-2019	02-2006	31-2015	20-2014	30-2018	24-2003	23-1998	18-2010	2009
Nombre moyen de jours avec													
Tx >= 30 °C	.	.	.	.	0.2	1.4	2.7	3.0	0.2	.	.	.	7.5
Tx >= 25 °C	.	.	.	0.5	3.6	6.8	12.2	10.8	3.4	0.1	.	.	37.4
Tx <= 0 °C	1.9	1.2	0.1	.	.	.	.	.	.	.	0.3	1.5	5.0
Tn <= 0 °C	11.4	10.3	6.1	2.7	0.2	.	.	.	0.0	1.0	4.3	10.0	46.0
Tn <= -5 °C	2.7	1.9	0.3	.	.	.	.	.	.	0.1	0.4	1.8	7.2
Tn <= -10 °C	0.5	0.3	0.0	.	.	.	.	.	.	.	0.0	0.1	0.9
Tn : Température minimale, Tx : Température maximale													
La hauteur quotidienne maximale de précipitations (mm)													
Records établis sur la période du 01-04-1987 au 02-10-2024													
	31.6	24.4	34	21.4	40.8	50.8	51.2	57.1	25.5	38.2	51	29	57.1
Date	27-2002	12-2002	07-1989	26-2003	28-2018	04-2002	02-1995	15-2010	17-2013	07-1987	09-1988	11-2017	2010
Hauteur de précipitations (moyenne en mm)													
	54.3	47.3	50.8	41.8	57.9	63.1	66.4	67.6	52.1	60.1	63.9	68.8	694.1
Nombre moyen de jours avec													
Rr >= 1 mm	11.3	9.9	10.0	9.1	9.6	9.2	9.9	9.4	8.9	10.7	12.0	12.3	122.3
Rr >= 5 mm	3.8	3.4	3.5	2.8	3.8	4.1	4.2	4.2	3.9	3.9	4.5	5.2	47.3
Rr >= 10 mm	1.0	0.8	1.0	0.9	1.4	1.9	2.1	1.9	1.5	1.6	1.5	1.9	17.4
Rr : Hauteur quotidienne de précipitations													

Page 1/2

N.B.: La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues en l'état ou sous forme de produits dérivés est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Edité le : 06/10/2024 dans l'état de la base

Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
 42 avenue Gustave Coriolis - 31057 Toulouse Cedex



FICHE CLIMATOLOGIQUE

Statistiques 1991-2020 et records

VALENCIENNES (59)

Indicatif : 59606004, alt : 50m, lat : 50°19'41"N, lon : 3°27'39"E

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Degrés Jours Unifiés (moyenne en °C)													
	437.3	381.6	329.3	237.7	142.8	63.3	26.6	25.9	84.5	195.7	319.4	419.9	2664.0
Rayonnement global (moyenne en J/cm²) Données non disponibles													
Durée d'insolation (moyenne en heures) Données non disponibles													
Evapotranspiration potentielle (ETP Penman moyenne en mm) Données non disponibles													
La rafale maximale de vent (m/s) Records établis sur la période du 15-01-1988 au 02-10-2024													
	35	36	30	26	27	27	23.6	25.4	23.7	34	30.1	28.2	36
Date	22-1988	28-1990	17-1995	29-2002	28-2000	08-2017	22-2006	26-2011	23-2010	27-2002	02-2023	02-2007	1990
Vitesse du vent moyenné sur 10 mn (moyenne en m/s)													
	4.4	4.2	4	3.6	3.4	3.3	3.3	3.1	3.2	3.7	3.7	4.2	3.7
Nombre moyen de jours avec rafales													
>= 16 m/s	-	6.0	-	-	2.7	-	-	2.1	1.9	3.3	-	5.9	-
>= 28 m/s	-	0.2	-	-	.	-	-	.	.	0.1	-	0.0	-
16 m/s = 58 km/h, 28 m/s = 100 km/h													
Nombre moyen de jours avec brouillard / orage / grêle / neige Données non disponibles													

- : donnée manquante

. : donnée égale à 0

Ces statistiques sont établies sur la période 1991-2020.

Page 2/2

N.B.: La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues en l'état ou sous forme de produits dérivés est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Edité le : 06/10/2024 dans l'état de la base

Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
 42 avenue Gustave Coriolis - 31057 Toulouse Cedex

Annexe 4 : Description du logiciel PMSS

Descriptif du modèle Micro SWIFT

1. Le domaine

Le domaine horizontal est un rectangle (Lx, Ly) dans le système de projection plane choisi (ex.: Lambert, UTM). Les dimensions Lx et Ly varient de 500 m à 500 km.

Le domaine vertical est défini par les masses d'air comprises entre la topographie (définie par un MNT, ie Modèle Numérique de Terrain) et une altitude de contrôle H, typiquement de l'ordre de 1500 à 2500 m, qui doit être plus élevée si le domaine comprend une topographie importante (domaines montagneux).

2. Le maillage

Le maillage horizontal définit un réseau X-Y régulier ou irrégulier, dont le pas peut varier de 1 mètre (en cas de prise en compte de bâtiments) à plusieurs kilomètres. Le maillage horizontal coïncide exactement avec les données du MNT, contenant la matrice des altitudes $ZG_{ij} = ZG(X_i, Y_j)$, où ZG est l'altitude de contrôle de chaque maille.

Le maillage vertical est défini par deux choix :

1. Définition d'une coordonnée verticale transformée S permettant de suivre le terrain:

$$S = (Z - ZG) / (H - ZG)$$

où: Z = altitude / mer de chaque point du maillage.

On a S=0 au sol et S=1 à l'altitude H par définition.

2. Définition d'un vecteur S_k contenant les valeurs de la coordonnée verticale S pour chaque niveau vertical de maillage, de sorte que les niveaux sont plus rapprochés près du sol (S=0) qu'en altitude (S=1).

3. Variables

Les variables 3D principales traitées sont toujours les trois composantes du vecteur vent moyen $V(u,v,w)$ dans un système cartésien classique, et de manière optionnelle la température (T) et la diffusivité turbulente suivant la verticale (Kz).

Les variables 3D auxiliaires sont un champ de potentiel de Lagrange intermédiaire (P) calculé pour assurer la conservation de la masse (divergence nulle) et un facteur de transmissivité verticale (Alpha) lié à la stabilité, et dépendant éventuellement de la température et de la vitesse du vent.

4. Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle sont :

Le modèle numérique de terrain (MNT) ;

La description de l'occupation des sols sur le même maillage horizontal ;

Le masque terre - mer (le cas échéant) ;

Une description des bâtiments (facultatif) ;

Toutes les données météorologiques disponibles (Vent, Température).

Les données météorologiques fournies en entrée peuvent être des données de mesure éparses, des données de prévision, des valeurs arbitraires (simulations à caractère académique). Il n'est pas obligatoire que les données météorologiques soient situées à l'intérieur du domaine géographique traité, défini par le MNT.

5. Méthodes de calcul

Micro SWIFT comporte trois étapes de calcul distinctes :

Interpolation des données existantes pour fournir une première ébauche des champs de vent et de température recherchés.

Ajustement itératif, par une méthode variationnelle, de la solution, destiné à créer un champ de vitesses à divergence nulle, en prenant en compte les contraintes imposées par la stabilité atmosphérique.

Calcul de la turbulence de fond (méthode EPA) et éventuellement de la turbulence induite du fait de la présence de bâtiments.

6. Description des sorties

Les champs de vent 3D et de turbulence obtenus à l'issue de l'étape de turbulence :

Respectent les valeurs fournies en entrée au voisinage des points de données.

Satisfont l'équation de continuité sous sa forme incompressible (divergence nulle)

Restituent l'influence de la stabilité atmosphérique sur les déviations du vent.

Comportent un champ de vitesse verticale cohérent avec la topographie et les obstacles.

Fournissent une turbulence tridimensionnelle représentative du site étudié.

7. Références

Micro SWIFT appartient à la famille des modèles d'analyse objective à divergence nulle. Il est dérivé du modèle MINERVE, développé à partir de 1980 initialement par Electricité de France (EDF), qui a été appliqué à l'étude des sites nucléaires français, et validé notamment par EDF à l'occasion de campagnes météorologiques intensives, comportant une couverture météorologique à petite échelle rarement atteinte: jusqu'à 15 stations sol et 3 radars acoustiques vent (SODARS). On peut citer entre autres les expériences EDF de CREYS-MALVILLE 1983, CHOOZ 1986, VALLEE DU RHONE 1989 et la Campagne Européenne FOS 1983.

Les principales références applicatives commerciales du modèle MINERVE (études ou systèmes) sont les suivantes :

SNCF (2000)

CERTU, DDE 42, ADEME (1999)

DRIRE Haut.10-Normandie (1998)

BORDEAUX - Etude pour le compte de l'ADEME et EDF (1996-1997)

ROUEN-LE HAVRE Réseau AIR NORMAND (1997)

Regione Campania (NAPLES-ITALIE) Réseau de surveillance de la qualité de l'air.

Regione ABRUZZO (ATRI-ITALIE) Réseau de surveillance de la qualité de l'air.

ENEL Centre de Recherches (MILAN-ITALIE)

CISE Centre d'études (SEGRAT.10-ITALIE)

RHONE-POULENC SA (LYON-FRANCE)

Institut Paul SCHERRER (VILLIGEN-CH)

Institut Josef STEFAN (Slovénie)

IBERDROLA SA (Madrid- Espagne)

Defence Nuclear Agency (Washington - USA)

HANFORD Nuclear Center (Seattle - USA)

CNRS Service d'aéronomie et LMD (Paris - France)

FOS-BERRE 1995 - Etude pour le compte de DRIR.10-PACA (Marseille - France)

Les principales références applicatives commerciales du modèle Micro SWIFT (études ou systèmes) sont les suivantes:

United States Department of Defence (US-DOD) (2002-2005)

CEA-DAM (2005)

Città di BOLOGNA (2003)

Descriptif du modèle Micro SPRAY

INFORMATIONS DE BASE

Version :

Version 5.0

Champs d'application :

Modèle de dispersion lagrangien à particules. Il simule la dispersion des émissions atmosphériques par le mouvement stochastique de pseudo-particules dans le flux turbulent atmosphérique sur terrain complexe. Il peut effectuer des simulations de l'échelle locale (500 m-5 km) à la méso-échelle (100 km).

INFORMATIONS DETAILLEES

Description :

Micro SPRAY est un modèle tridimensionnel pour la simulation de la dispersion des polluants dans l'atmosphère et peut tenir compte des variations du flux et de la turbulence atmosphérique aussi bien dans l'espace (conditions hétérogènes) que dans le temps (conditions non stationnaires). Il est en mesure de reconstruire des champs de concentration à partir de sources ponctuelles, linéaires, surfaciques ou volumiques.

Le polluant est simulé par des "particules virtuelles" dont le mouvement dans un domaine tridimensionnel est défini par le vent local et dont la dispersion est obtenue par le truchement de fluctuations de vitesse aléatoires solution des équations différentielles stochastiques, qui reproduisent les caractéristiques de la turbulence atmosphérique locale. De cette façon, différentes parties du panache émis peuvent "voir" différentes conditions atmosphériques, permettant des simulations plus réalistes en conditions difficiles que des modèles traditionnels (vent calme, inversion de température avec l'altitude, impact avec une topographie complexe, dispersion sur des sites avec de fortes discontinuités spatiales de type "terre - mer" ou "ville - campagne").

Le modèle simule la dispersion des polluants à l'intérieur d'un domaine de calcul de forme parallélépipédique dont la limite inférieure est représentée par une fonction $Z_G(x,y)$ obtenue en interpolant avec une bilinéaire les niveaux du terrain dans chaque cellule d'un maillage tridimensionnel défini par l'utilisateur. Le mouvement moyen des particules est décrit par des matrices tridimensionnelles de module de vent dans le système de référence "terrain-following" x, y, s dont la coordonnée verticale s est définie comme:

$$s = \frac{Z - Z_g}{Z_{top} - Z_g}$$

où:

Z est la coordonnée géométrique verticale

Z_{top} est l'altitude du sommet du domaine fluide étudié (en m)

$Z_g = Z_g(x,y)$ est l'altitude du relief (en m) au point de coordonnées (x,y) du maillage horizontal considéré.

Les particules interpolent linéairement la valeur du vent au point x, y, z où elles se trouvent en utilisant les valeurs de ces matrices. Il est possible de simuler des conditions non stationnaires en interpolant linéairement dans le temps la valeur entre deux matrices successives.

Le mouvement turbulent des particules est décrit à l'aide de l'intégration le long des axes cartésiens x, y, z , de 3 équations de Langevin pour les composantes des vitesses selon les schémas optionnels suivants :

Equations linéaires couplées avec une fonction de forçage aléatoire correspondant à une distribution de probabilité tridimensionnelle non gaussienne selon une réalisation du schéma de Thomson (1984). Des schémas de travail plus simples sont en outre pris en compte (équations découplées) pour traiter des problèmes à plus grande échelle.

Equations non linéaires avec forçage gaussien selon le schéma de Thomson (1987). Des schémas de description non gaussienne de la turbulence verticale sont également pris en compte selon la distribution bi-gaussienne Gram-Charlier du 3^{ème} ordre ou du 4^{ème} ordre. Sur le niveau de la couche limite, la part turbulente du mouvement des particules peut être optionnellement obtenue par l'intégration des équations stochastiques sur les déplacements.

La turbulence est décrite par des matrices tridimensionnelles dans le système x, y, z de :

$$\sigma_{u'_x}, \sigma_{u'_y}, \sigma_{u'_z}, \overline{u'^3_z}$$
$$\overline{u'_x u'_y}, \overline{u'_x u'_z}, \overline{u'_y u'_z}$$
$$\mathbf{T}_{L_{u'_x}}, \mathbf{T}_{L_{u'_y}}, \mathbf{T}_{L_{u'_z}}$$

dans le cas des schémas de Thomson 1984 ou bien :

$$\sigma_{u'_x}, \sigma_{u'_y}, \sigma_{u'_z}, \overline{u'^3_z}$$
$$\mathbf{T}_{L_{u'_x}}, \mathbf{T}_{L_{u'_y}}, \mathbf{T}_{L_{u'_z}}$$

K_x, K_y, K_z (options sur la couche limite)

dans le cas des schémas de Thomson 1987.

Schéma de génération interne des champs de turbulence, construits à travers les profils verticaux de similarité obtenus en considérant les caractéristiques du terrain.

Les variables d'échelle de la couche de surface (hauteur de la couche limite h_{mix} , vitesse de frottement u^* , longueur de Monin-Obukhov L , et vitesse convective verticale d'échelle w^*) sont calculées, sur la base des données d'entrée, pour chaque point du maillage grâce à un pré-processeur météorologique (Paine, 1988). Puis, les profils verticaux des variables turbulentes nécessaires à la simulation sont générés à partir de relations dépendantes de la stabilité atmosphérique (Hanna, 1982). La surhauteur des panaches est calculée par la formule d'Anfossi (Anfossi, 1985), capable de tenir compte des variations verticales et horizontales du vent et de la stabilité atmosphérique, grâce à une matrice tridimensionnelle de température sur la même grille que les matrices météorologiques.

Limitations :

Le modèle ne contient pas de réactions chimiques entre les espèces émises, qui sont donc considérées comme inertes. La version 3.0 contient un schéma de dépôt sec et humide, et peut tenir compte de la chute gravitationnelle. La radio décroissance radioactive peut être également appliquée.

Résolution :

Résolution spatiale horizontale :

Maillage à pas fixe régulier: $\Delta x = \Delta y$

Résolution minimale conseillée: 0,1 m (en cas de prise en compte de bâtiments)

Résolution maximale conseillée: 10km

Résolution spatiale verticale :

Maillage de type "terrain - following" de coordonnées S à pas variable défini par l'utilisateur.

Résolution temporelle :

Possibilité de choisir entre des pas d'intégration Δt des équations de mouvement fixes ou variables.
 Δt variables limités automatiquement par les caractéristiques du vent moyen et de la turbulence vue par la particule.

Techniques de résolution :

Différences finies pour l'évolution temporelle des particules.

Optimisation du choix des pas de temps sur des échelles de temps Lagrangien dans le cas du schéma à Δt variable.

Données d'entrées requises :

Générales :

Le positionnement, les dimensions, la structure horizontale et verticale du domaine, la topographie sont définis dans un fichier météorologique, en format binaire, contenant au minimum les champs de vent tridimensionnels. Les options du calcul (période et durée de la simulation, schémas numériques, conditions initiales et aux limites) sont contenues dans un fichier ASCII.

Météorologiques :

Micro SPRAY reçoit en entrée une série temporelle de champs tridimensionnels de vent, de température voire de turbulence sur le maillage décrit précédemment, dans un format binaire. Les champs de turbulence peuvent être générés en interne ou fournis sur le même maillage dans le même fichier que le vent, issu d'un modèle de dynamique des fluides externe. Dans le premier cas, doivent être fournies au modèle les matrices bidimensionnelles de caractérisation du sol, contenant les valeurs de: la hauteur de la rugosité Z_0 , l'albédo et le rapport de Bowen (rapport entre le flux de chaleur sensible et latente au point du maillage). Il est en outre nécessaire d'avoir une série temporelle des données météorologiques qui couvre la période complète de simulation, en particulier pour la radiation solaire, la température et le gradient thermique vertical à l'aube, utilisés dans les schémas de paramétrisation de la turbulence de la couche limite.

Emissions :

La description des émissions: des sources de typologie multiple sont prévues (ponctuelles, linéaires et surfaciques) ce qui permet donc de simuler des cheminées ou des routes. Chacune peut émettre diverses espèces non réactives. On doit définir: la position, la géométrie et le taux d'émissions de chaque source pour chaque espèce considérée, sur des intervalles de temps quelconques non réguliers. Le nombre de particules pour chaque source est sélectionné par l'utilisateur et le modèle en détermine automatiquement la masse en fonction des caractéristiques de l'émission.

Données de sorties générées :

Fichiers binaires de particules contenant la position, la masse, la source d'origine et le temps de vie de chaque particule, mémorisées à des intervalles de temps sélectionnés par l'utilisateur.

Matrices tridimensionnelles de concentrations sur un maillage "terrain-following" sélectionné par l'utilisateur, sur des temps moyennés et à des intervalles présélectionnés, avec la méthode du comptage dans chaque maille, sur un fichier binaire de structure similaire à celle du fichier de vents utilisé en entrée.

Fichiers binaires de reprise générés à des intervalles réguliers choisis par l'utilisateur et utilisés soit pour la récupération après d'éventuelles ruptures du calcul, soit pour diviser les simulations de longue durée en sections plus brèves analysées séparément.

Fichier ASCII d'informations sur le déroulement de la simulation.

Disponibilité d'interfaces :

Le modèle a une interface à fichiers et ne nécessite pas d'interfaces utilisateurs graphiques particulières. Pour effectuer une simulation, seuls sont suffisants les outils d'édition standard présents sous les divers systèmes. Cette modalité permet la portabilité du code.

Il existe des interfaces utilisateurs graphiques développées par ARIA Technologies pour définir en mode interactif le contenu informatique de tous les fichiers ASCII d'entrée.

Les sorties binaires de particules et de concentration peuvent être lues et interfacées avec le pack graphique EWB de WINDLOGICS.

Documentation :

La documentation est disponible en français, en italien et en anglais sur support papier ou sur support informatique.

Validation :

Simulations sur terrain plat :

Confrontation à des données mesurées durant une campagne dans la vallée du Rhin près de Karlsruhe (Thomas et al., 1983).

Le modèle a été modifié dans la partie relative à l'équation de mouvement vertical, de façon à tenir compte des hétérogénéités de la turbulence et a été appliqué pour la simulation des conditions neutres et convectives de l'expérience de Karlsruhe (Brusasca et al., 1989).

Simulation en conditions d'atmosphère stable et vent faible.

Il a été implémenté un algorithme ad hoc pour la simulation du vent meandering dans des conditions de vent faible et dans cette version, le modèle a été utilisé pour simuler l'expérience de traçage réalisé près du laboratoire INEL en Idaho (Sagendorf and Dickson, 1974). Les résultats ont été publiés dans deux articles (Anfossi et al., 1990; Brusasca et al., 1992).

Simulations de la surhauteur dynamique.

Il a été inséré et validé un algorithme pour le calcul de la surhauteur des fumées chaudes. Les résultats ont été confrontés avec des données de Lidar enregistrés durant la campagne internationale de Sostanj en 1991 en Slovénie (Anfossi et al., 1993).

Simulations sur terrain complexe :

Expérimentation en soufflerie EPA sur des collines bidimensionnelles.

Des confrontations avec les données obtenues dans le cadre de l'expérience EPA RUSHIL (Khurshudyan et al., 1981) de dispersion sur des collines bidimensionnelles ont été réalisées. Les résultats obtenus ont été publiés (Tinarelli et al., 1994) et présentés aux congrès internationaux de l'American Meteorological Society de Portland - 1992 (Tinarelli et al., 1992) et du CCMS NATO à Valencia - Espagne (Tinarelli et al., 1993).

Expérience Transalpine.

Des simulations ont été effectuées sur l'expérience Transalp. 1989, qui consistait au rejet d'une substance traçante à l'embouchure des vallées Levantina et Blenio dans le canton Ticino (Suisse) dans le but de vérifier les effets de la canalisation. Le jour simulé est le 19 octobre, de 11h à 17h, avec des conditions d'atmosphère instable à stable et sur une topographie extrêmement complexe. Les résultats ont été publiés dans un numéro spécial "d'Atmospheric Environment" consacré à la campagne Transalp. (Anfossi et al., 1998). Le travail a été entre autre présenté au congrès international CCMS NATO de 1995 à Baltimore (Brusasca et al., 1995).

Campagne Sostani.

Des simulations de la période relative à la campagne de 1991 près de la centrale thermique de Sostani en Slovénie ont été réalisées conjointement par ENEL, CISE et Josef Stefan Institute de Lubiana. Le site est modérément montagneux et les situations de stabilité simulées étaient caractérisées par des

conditions neutres et instables, avec quelques périodes de vent calme. Les résultats, présentés au congrès ENVIROSOFT 1994 de Barcelone (Espagne) et au workshop de Manno "Intercomparison of advanced practical short range atmospheric dispersion models" de 1993 (Tinarelli et al., 1993), ont été comparés avec ceux de modèles eulériens simples pour terrain complexe et d'un modèle lagrangien à bouffées montrant une supériorité de la part du modèle SPRAY qui se prête mieux à la simulation de situations complexes. Le travail mis en œuvre pour effectuer ces simulations avec SPRAY est décrit entre autre dans un rapport interne de l'ENEL (Tinarelli et al., 1994).

Applications :

Poste de centralisation intelligent de Fusina et Porto Marghera. Une version simplifiée du code dénommée SPRAY/S a été mis en œuvre sur le nœud automatique de relevé environnemental de la région de Fusina et port Marghera (Stefani et al. 1997) où il est en mesure de fonctionner en temps réel, alimenté par des données fournies en automatique par le système d'acquisition des données.

Système de mesure environnemental de la décharge de Barricalla (Torino). A été mis en œuvre, sur un financement européen dans le cadre du projet LIFE 1, un système de contrôle de l'impact des émissions provenant de la décharge d'ordures toxiques située près de Turin dans la commune Barricalla (Pacitti et al., 1997). Le modèle SPRAY a été inséré dans ce système sur PC (Pacitti et al., 1997), et est utilisable sur demande pour réaliser des simulations de la dispersion des substances émises par la décharge ou des émissions du trafic provenant des axes routiers environnements.

Application dans le cadre de l'étude pluridisciplinaire du dépérissement du pin forestier et des autres espèces biogéniques de la vallée d'Aoste (Manzi et al., 1998). Des simulations de la dispersion des polluants provenant des principales émissions (trafic routier, industrie et chauffage domestique) recensées dans la région ont été effectuées sur un domaine de 100 × 80 km². Les simulations, sur une durée moyenne de 10 à 15 jours, ont permis de fournir une description climatologique du site sur un domaine extrêmement complexe, aussi bien pour des conditions estivales qu'hivernales.

Simulation des émissions provenant de la centrale thermoélectrique de Vado Ligure, pour le compte de la province de Savone. Des simulations de la dispersion des fumées émises par la centrale ont été réalisées sur une durée d'environ 10 jours sur un domaine de 20 × 23 km². L'objectif était de contrôler l'impact de la centrale sur le territoire environnant, à forte complexité topographique, et le niveau de représentativité du réseau de mesures météorologiques ou de qualité de l'air géré par l'ENEL et la province de Savone.

Références :

- Anfossi D. (1985) Analysis of plume rise data from five TVA Steam Plants. *J. Clim. appl. Met.* 24, 1225-1236
- Anfossi D., Brusasca G., Tinarelli G. (1990): "Simulation of atmospheric diffusion in low windspeed meandering conditions by a Monte Carlo dispersion model". *Il Nuovo Cimento C* 13, N. 6, 995 - 1006.
- Anfossi D., Brusasca G., Tinarelli G. (1990): "Results from a random walk dispersion model in low windspeed stable conditions", Proc. of 9th Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Roskilde (Denmark), April 30 - May 3, 6.1, 160-163.
- Anfossi D., Ferrero E., Brusasca G., Marzorati A., Tinarelli G. (1993): "A simple way of computing buoyant plume rise in Lagrangian stochastic dispersion models", *Atmospheric Environment* 27A, 1443-1451.
- Anfossi D., Desiato F., Tinarelli G., Brusasca G., Ferrero E., Sacchetti D. (1998): "TRANSALP 1989 Experimental Campaign - part II: Simulation of a tracer experiment with Lagrangian particle models.", *Atmospheric Environment*, 32, 7, 1157-1166.
- Brusasca G., Tinarelli G., Anfossi D. (1989): "Comparison between the results of a Monte Carlo atmospheric diffusion model and tracer experiments", *Atmospheric Environment* 23, 1263-1280.
- Brusasca G., Tinarelli G., Anfossi D. (1992): "Particle model simulation of diffusion in low windspeed stable conditions", *Atmospheric Environment* 26, 707-723.
- Brusasca G., Ferrero E., Anfossi D., Desiato F., Tinarelli G., Morselli M.G., Finardi S., Sacchetti D. (1995): "Intercomparison of 3-D flow and particle models with Transalp 1989 meteorological and tracer data", Proc. of the 21st CCMS-NATO meeting, Baltimore, 6-10 November, 1995, 386-394. *Air Pollution Modelling and its Application XI*, Plenum Press, 559-567
- Hanna S. R. Application in air pollution modelling in "Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling". Ed. by S.T.M. Nieuwstadt and H. Van Dop, D.Reitell Pub. Comp., 1982, pp.275-310.
- Berkowicz, R., Hertel, O., Sørensen, N.N. and Michelsen, J.A., (1997), Modelling air pollution from traffic in urban areas. In *Flow and Dispersion Through Groups of Obstacles*, R.J. Perkins and S.E. Belcher (editors), Clarendon Press, Oxford, pp. 121-141.
- Hertel, O. and Berkowicz, R., (1989), Modelling pollution from traffic in a street canyon. Evaluation of data and model development, DMU Luft A-129, 77pp.
- Hertel, O and Berkowicz, R., (1989), Operational Street Pollution Model (OSPM). Evaluation of model on data from St. Olavs street in Oslo, DMU Luft A-135, 34pp. Khurshudyan L.H., W.H. Snyder, and I.Y. Nekrasov, 1981: Flow and dispersion of pollutants over two-dimensional hills. Rpt. No. EPA-600/4-81-067, Envir. Prot. Agcy., Res. Tri. Pk., N.C., USA
- Manzi G., Brusasca G., Morselli M.G., Tinarelli G. (1998): "Indagine generale per lo studio pluridisciplinare del deperimento del pino silvestre ed altre specie botaniche in Val D'Aosta, simulazione della dispersione in atmosfera degli inquinanti emessi dal traffico veicolare e dal riscaldamento", relazione ENEL/CRAM 1998-0022
- Pacitti M., Mensio P., Brusasca G., Tinarelli G., Genon G., Marchese F., Nobile G., Malvasi G. (1997): "Global evaluation of the activity of toxic and hazardous waste landfills using monitoring and modeling integrated system". Proc. of 5th International Conference "Air Pollution 1997", 16-18 September, Bologna, Italy. *Air Pollution V, modelling, monitoring and management*, 517-526, Computational Mechanics Publications.

- Paine, R.J. User's guide to the CTDM meteorological preprocessor (METPRO) program. US-EPA report EPA/600/8-88/004, 1988.
- Sagendorf J.D. and Dickson C.R. (1974): Diffusion under low windspeed, inversion conditions. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-52
- Stefani A., Brusasca G., Grigolon E., Martinelli U., Marzorati A. (1997) "Integrazione di un sistema di supervisione ambientale nel sistema informativo della Centrale Termoelettrica di Fusina", Atti del 97° convegno AEI - Baveno (VB) 7-9 Maggio 1997.
- Tinarelli G., Giostra U., Ferrero E., Tampieri F., Anfossi D., Brusasca G., Trombetti F., (1992): "SPRAY, a 3-D particle model for complex terrain dispersion", Proc. of 10th Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Portland, Oregon (USA), 29-Sept. - 2 Oct, P2.9, 147-150.
- Tinarelli G., D. Anfossi, G. Brusasca, E. Ferrero, J. Moussafir (1993) "A complete 3-D Lagrangian particle model to simulate the dispersion of non-reacting airborne pollutants over complex terrain". Workshop on: Intercomparison of Advanced Practical Short-Range Atmospheric Dispersion Models. Manno (Svizzera), August 29 - September 3, 1993
- Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Tampieri F., Trombetti F. (1993): "Lagrangian model simulation of 3-d concentration distribution over complex terrain", Proc. of the 20th CCMS-NATO meeting, Valencia, 29 November-3 December 1993; Air Pollution Modelling and its Application X, Plenum Press, 621-622.
- Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Moussafir J., Tampieri F., Trombetti F. (1994): "Lagrangian particle simulation of tracer dispersion in the lee of a schematic two-dimensional hill", Journal of Applied Meteorology, Vol. 33, N. 6, 744-756.
- Tinarelli G., Brusasca G., Morselli M.G. (1994): "Il modello Lagrangiano a particelle SPRAY - Descrizione generale e validazioni", relazione ENEL/CRAM N. E1/94/10.
- Thomas P., Hubschmann W., Schuttelkops H., Vogt S., (1983): "Experimental determination of the atmospheric dispersion parameters at the Karlsruhe Nuclear Research Center for 160 m and 195 m emission heights. Part I: measured data. KfK Report 3456.
- Thomson D.J., (1984), Random walk modelling of diffusion in inhomogeneous turbulence, Q.J.R.Met.Soc. 110, 1107-1120.
- Thomson D.J. (1987), Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. J. Fluid Mech., 1987, 180, 529-556.

Annexe 5 : Exposition interne par ingestion

Le thoron Rn-220, compte-tenu de sa durée de vie très courte, n'est pas concerné par la voie par ingestion. Cependant, le caractère négligeable de la voie d'exposition interne par ingestion est démontré dans cette annexe car le Pb-212, descendant du Rn-220, a une demi-vie de 10,6 h et peut alors se déposer sur des légumes et fruits issus de jardins et potagers et entraîner une dose liée à leur consommation.

Cette voie d'exposition n'est étudiée que pour le scénario « Habitation la plus exposée ». Les concentrations et dépôts retenus sont les valeurs calculées pour le Rn-220 et non le Pb-212, ce qui constitue une hypothèse très majorante.

Détermination de l'activité dans les végétaux

Nous retiendrons pour les calculs de dose par ingestion la concentration atmosphérique calculée au niveau de l'habitation la plus exposée, celle-ci se trouvant à proximité de zones agricoles.

Pour les végétaux :

$$A_{\text{végH3}} = A_{\text{air}} \times F_{\text{vc}}$$

Avec :

$A_{\text{végH3}}$: activité du végétal en Bq.kg⁻¹

A_{air} : activité volumique annuelle moyenne de l'air en Bq.m⁻³

F_{vc} : facteur de concentration au végétal pour le radionucléide considéré en m³.kg⁻¹

Les facteurs sont issus du rapport GRNC^{Erreur ! Signet non défini.} et sont présentées dans le Tableau 18.

Tableau 18 : facteur de concentration au végétal pour le Pb-212

Fvc : facteur de concentration au végétal pour le radionucléide considéré en m ³ .kg ⁻¹					
Légumes racines	Légumes feuilles	Légumes fruits	Fruits	Mais	Grains
2,00E-01	6,55E-01	8,74E-01	8,74E-01	3,82E+00	3,82E-01

Calcul des doses d'exposition par voie digestive

La dose efficace annuelle due à l'ingestion est obtenue selon la formule suivante :

$$E_{\text{ing}} = CD_{\text{ing}} \times 1000 \times \sum_i \frac{A_i \times Q_i \times f_i \times F}{P}$$

Avec :

- E_{ing} : Dose efficace par ingestion (mSv/kg poids corporel/jour)
- CD_{ing} : coefficient de dose efficace par ingestion (Sv.Bq⁻¹)
- A_i : activité dans l'aliment i (Bq/kg)
i correspondant au sol (terre ingérée), aux légumes-feuilles, aux légumes-fruits, aux légumes-racines, aux fruits, à la viande de volaille, aux œufs, aux autres viandes et aux produits laitiers.
- Q_i : quantité de l'aliment i ingérée (kg/jour)
- f_i : fraction d'aliment i provenant de la zone d'exposition (-)
- F : fréquence d'exposition (nombre annuel d'heures ou de jours d'exposition ramené au nombre total annuel d'heures ou de jours), fixée à 1 dans une hypothèse majorante.
- P : masse corporelle de la cible (kg)

Les activités A_i dans l'aliment i sont calculées suivant les méthodologies présentées dans la partie précédente.

Les Doses efficaces par ingestion sont calculées en prenant comme hypothèses les valeurs de poids corporel, de consommations journalières et de taux d'autoconsommation préconisées par l'INERIS¹¹ et utilisées dans le logiciel MODUL'ERS pour chaque catégorie d'âge étudié (cf. Tableau 19). Ces données prennent en compte les dernières enquêtes de consommation disponibles en France, et sont donc plus récentes que celles disponibles dans la base de données CIBLEX.

Tableau 19 : paramètres de consommation relatifs aux différentes catégories d'âge (données INERIS)

	Classe 1 : de 0 à 1 an	Classe 2 : de 1 à 3 ans	Classe 3 : de 3 à 6 ans	Classe 4 : de 6 à 11 ans	Classe 5 : de 11 à 15 ans	Classe 6 : de 15 à 18 ans	Classe 7 : les plus de 18 ans
Poids (kg)	7,6	12,4	17,8	28,7	47,2	60	70,4
Consommation de légumes et fruits							
Quantité de fruit ingérée (g/j)	16	53	90	90	83	82	160
Quantité de tubercules ingérée (g/j)	18	52	46	46	58	60	58
Quantité de légume racine ingérée (g/j)	15	26	7	7	9	9	12
Quantité de légume feuille ingérée (g/j)	7	22	8	10	12	12	24
Quantité de légume fruit ingérée (g/j)	11	40	66	64	70	72	110

Tableau 20 : fraction d'aliments auto-produits (données INERIS)

Catégories d'aliments	Fraction d'aliments auto-produits pour la population moyenne
Sol	1
Fruits	0,20
Tubercules	0,45
Légume racine	0,45
Légume feuille	0,50
Légume fruit	0,55
Viande de bœuf	0,03
Viande de volaille	0,11
Œufs	0,15
Lait et produits laitiers	0,04

Le Tableau 21 présente les doses d'exposition pour chaque tranche d'âge considéré au niveau de la zone habitée avec jardin la plus exposée.

¹¹ Rapport INERIS-DRC-14-141968-11173C (juin 2017) – Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS.

Tableau 21 : dose efficace par ingestion (mSv/an) pour chaque tranche d'âge

Classe	DJE due à l'ingestion de végétaux
Classe 1 : de 0 à 1 an	1,7E-03
Classe 2 : de 1 à 3 ans	3,4E-03
Classe 3 : de 3 à 6 ans	3,1E-03
Classe 4 : de 6 à 11 ans	1,9E-03
Classe 5 : de 11 à 15 ans	1,2E-03
Classe 6 : de 15 à 18 ans	9,8E-04
Classe 7 : les plus de 18 ans	1,3E-03

Ainsi, la dose liée à l'ingestion de végétaux est, pour les adultes, environ 107 fois inférieure à la dose liée à l'inhalation au niveau de l'habitation la plus exposée. Pour rappel, cette dose liée à l'ingestion est fortement surestimée car les concentrations et dépôts retenus sont ceux calculés pour le Rn-220 et non le Pb-212.