

CHU Martinique

Etude d'impact des rejets gazeux radioactifs - Impact sur la santé



Fonctionnement normal

Références : Rapport n° 2025.072

Version : V1

SUEZ Aria Technologies

Siège social - Parc de L'Ile - 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

Référence du projet :

Titre	CHU Martinique - Etude d'impact des rejets gazeux radioactifs - Impact sur la santé Fonctionnement normal
N° rapport	2025.072
N° projet	L-003160 / 25-13237
Sous-traitants	-

Intervenants :

Rédacteur(s)	Claire DUPUIS – Chef de projet Qualité de l'air
Relecteur	Tamara FOURCOUAL - Chef de projet Qualité de l'air
Référent	Héloïse YVERNEAU – Responsable du pôle Études réglementaires

Révisions du document :

Version	Date	Modifications
1	28/11/2025	Version initiale

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	7
1. CADRE DE L'ÉTUDE	8
2. LOCALISATION DU SITE	9
3. MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE	10
4. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR.....	11
5. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION	12
5.1 Domaine d'étude	12
5.2 Populations	12
5.3 Populations sensibles et installations sportives.....	13
5.4 Usages autour du site.....	15
5.4.1 Occupation des sols	16
5.4.2 Usages agricoles	17
5.4.3 Activités de loisirs	18
5.4.4 Recensement des points d'eau.....	18
5.5 Météorologie.....	18
5.5.1 Données météorologiques	19
5.5.2 Analyse météorologique.....	19
6. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE	25
6.1 Données d'entrée	27
6.1.1 Topographie.....	27
6.1.2 Obstacles	27
6.1.3 Émissions	28
6.1.4 Météorologie	28
6.2 Détermination des concentrations dans l'air	29
6.2.1 Paramétrages du modèle	29
6.2.2 Présentation des résultats	29
6.2.3 Concentrations en moyenne annuelle	31
6.2.4 Dépôts au sol	34
7. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE	37
7.1 Identification des dangers	37
7.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations.....	37
7.1.2 Relation Dose-Réponse.....	38
7.2 Schéma conceptuel d'exposition	38
7.2.1 Voies d'exposition	38
7.2.2 Schéma conceptuel d'exposition	39
7.3 Estimation des doses d'exposition	39
7.3.1 Scénario d'exposition	40

7.3.2	Exposition externe (exposition par irradiation).....	41
7.3.3	Exposition interne par inhalation	44
7.4	Evaluation des risques.....	45
7.4.1	Méthodologie	45
7.4.2	Évaluation des risques sanitaires.....	45
8.	INCERTITUDES.....	49
8.1	Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique	49
8.1.1	Incertitudes liées au modèle : validation du modèle MSS	49
8.1.2	Incertitudes liées aux données d'entrée	50
8.1.3	Incertitudes liées à la variabilité.....	51
8.2	Incertitudes relatives à l'évaluation des risques sanitaires	51
8.2.1	Facteurs de surestimation des risques	51
8.2.2	Facteurs dont le sens d'influence sur les résultats n'est pas connu ou est variable.....	51
9.	CONCLUSION.....	53
	ANNEXES	56

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques des rejets.....	11
Tableau 2 : données de population (Source : Insee, Recensement de la population 2022).....	12
Tableau 3 : recensement agricole 2020 (recensement le plus récent disponible) (Source : Ministère de l'Agriculture)	18
Tableau 4 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent toutes directions confondues	20
Tableau 5 : statistiques relatives à la pluviométrie - Extraction au niveau du site - Période du 01/01/2020 au 31/12/2024	22
Tableau 6 : statistiques relatives à la pluviométrie - Extraction au niveau du site - Période du 01/01/2020 au 31/12/2024	23
Tableau 7 : paramètres de calcul des dépôts pour chacune des espèces étudiées.....	29
Tableau 8 : concentrations en moyenne annuelle (Bq/m ³)	31
Tableau 9 : dépôts au sol moyens annuels (Bq/m ² /s).....	34
Tableau 10 : scénarios d'exposition retenus.....	40
Tableau 11 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe – Argon-41	42
Tableau 12 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe – Fluor-18.....	42
Tableau 13 : dose d'exposition par irradiation (panache + dépôts) (mSv/an).....	43
Tableau 14 : volumes d'air inhalés	44
Tableau 15 : doses d'exposition interne par inhalation	45
Tableau 16 : doses efficace totale (mSv/an)	46
Tableau 17 : rappel des scénarios d'exposition retenus	53
Tableau 18 : rappel des doses efficaces totales calculées	54

FIGURES

Figure 1 : localisation du site	9
Figure 2 : localisation du point de rejet.....	11
Figure 3 : domaine d'étude	12
Figure 4 : localisation des populations sensibles et des équipements sportifs extérieurs les plus proches	14
Figure 5 : réseau hydrographique (BD TOPO® Hydrographie, IGN)	15
Figure 6 : occupation du sol (données CORINE Land Cover 2012).....	16
Figure 7 : culture majoritaire sur chaque îlot de culture (données du registre parcellaire graphique RPG 2023)	17
Figure 8 : rose des vents générale sur 5 ans	20
Figure 9 : roses des vents par année	21
Figure 10 : répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique.....	22
Figure 11 : variation moyenne mensuelle de la pluviométrie - Extraction au niveau du site - du 01/01/2022 au 31/12/2022	23

Figure 12 : variation moyenne mensuelle de la température - Extraction au niveau du site - du 01/01/2022 au 31/12/2022	24
Figure 13 : méthodologie mise en œuvre	26
Figure 14 : topographie du domaine d'étude	27
Figure 15 : bâtiments sur la zone d'étude	28
Figure 16 : localisation des points d'intérêt	30
Figure 17 : concentrations au sol en moyenne annuelle en Fluor-18.....	32
Figure 18 : concentrations au sol en moyenne annuelle en Argon-41	33
Figure 19 : dépôts totaux en Fluor-18 en Bq/m ² /s.....	35
Figure 20 : dépôts totaux en Argon-41 en Bq/m ² /s	36
Figure 21 : schéma conceptuel d'exposition	39
Figure 22 : synthèse des doses efficaces totales.....	47
Figure 23 : synthèse des doses efficaces totales par radioélément.....	48
Figure 24 : lignes de courant et concentration en SF6 à 4h10, 4h20 et 4h30.....	50

GLOSSAIRE

AEP	Alimentation en Eau Potable
ASNR	Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSS	Banque du Sous-Sol
CHU	Centre Hospitalier Universitaire
CIPR	Commission Internationale de Protection Radiologique
CLC	Corin Land Cover (occupation des sols)
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DGS	Direction Générale de la Santé
FINESS	Fichier National des Établissements Sanitaires et Sociaux
GBq	Gigabecquerel
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
mSv	millisieverts : unité utilisée pour évaluer l'impact de la radioactivité sur le corps humain
NGF	Nivellement Général de la France
PMSS	Parallel Micro SWIFT-SPRAY
SISE	Système d'Information en Santé Environnement
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

1. CADRE DE L'ÉTUDE

Le CHU de Martinique possède un accélérateur de particules de type cyclotron lui permettant de fabriquer des radionucléides à des fins de recherche biomédicale.

Dans le cadre de la demande d'autorisation de son site, SUEZ Aria Technologies a réalisé, en 2022, une étude d'impact liée aux rejets du cyclotron situé au sein du CHU de Martinique à Fort-de-France, pour un fonctionnement normal (cf. Rapport ARIA 2022.040_Normal_v2.pdf) et en fonctionnement accidentel (cf. Rapport ARIA 2022.041_Accidentel.pdf).

À la suite de cette étude, l'ASNR a demandé la mise à jour de l'étude en prenant en compte les rejets de Fluor-18 et en mettant à jour la couche d'obstacles.

C'est dans ce contexte que le CHU Martinique a consulté SUEZ Aria Technologies pour réaliser la mise à jour de l'étude d'impact radiologique liée aux radionucléides rejetés par le site en fonctionnement normal et en fonctionnement accidentel.

Le présent rapport présente l'évaluation des risques sanitaires liés aux rejets de Fluor-18 dans l'atmosphère en **fonctionnement normal** du site.

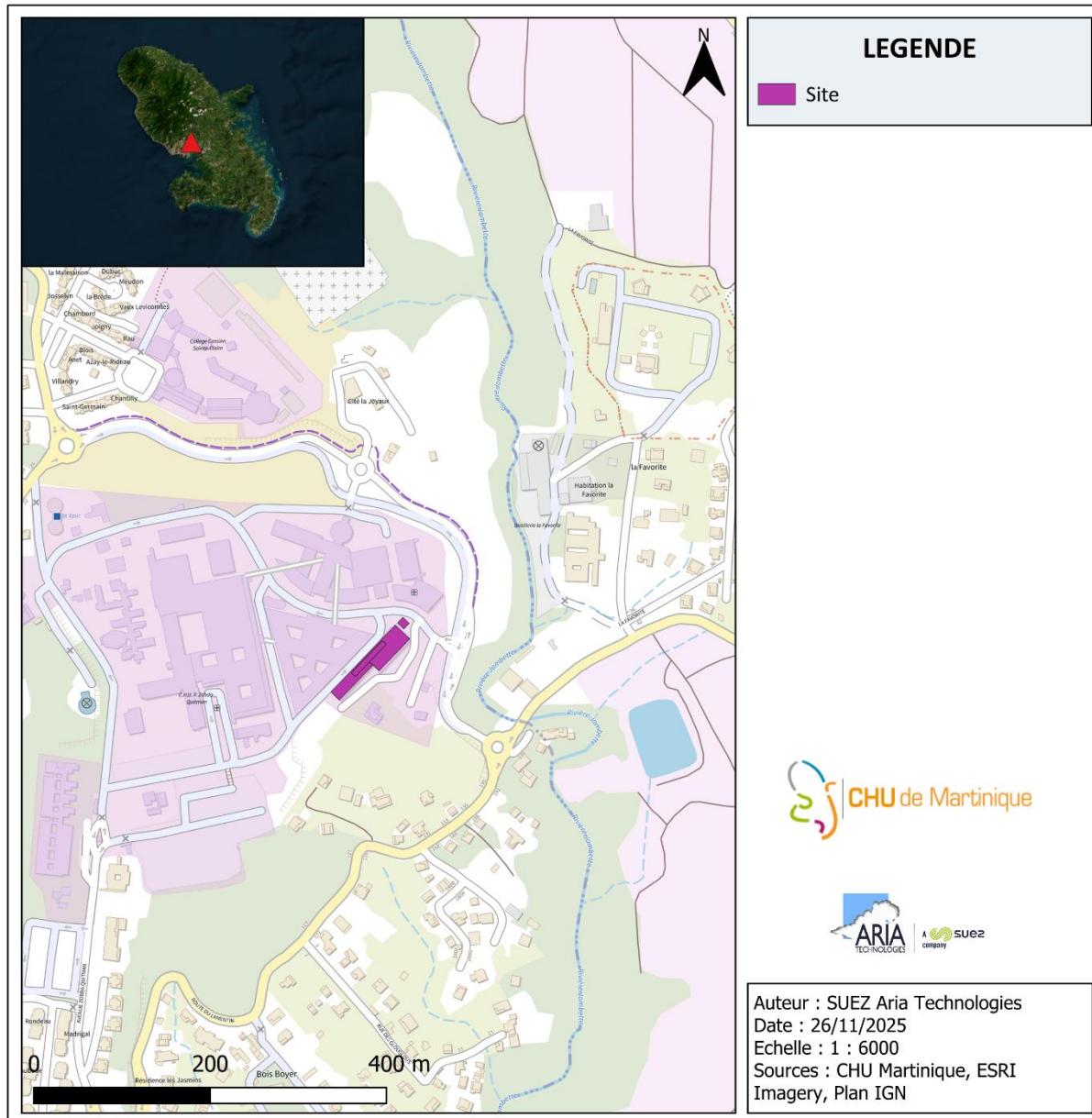
Le présent rapport a été établi sur la base des informations transmises à SUEZ Aria Technologies, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives de la réglementation, en vigueur au moment de la réalisation du dossier (version 1). La responsabilité de SUEZ Aria Technologies ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été fournies sont incomplètes ou erronées.

Sauf mention contraire, l'ensemble des cartographies de ce document sont la propriété de SUEZ Aria Technologies.

2. LOCALISATION DU SITE

Le site est localisé au sein du CHU de Martinique à Fort-de-France (cf. Figure 1).

Figure 1 : localisation du site



3. MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

Cette étude concerne l'impact sur la santé des tiers situés dans l'environnement des rejets de l'installation en fonctionnement normal. 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 « Évaluation 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) 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 :

- Évaluation des émissions de l'installation : caractérisation des émissions du site ;
- Évaluation 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 ;
- Évaluation 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.

4. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR

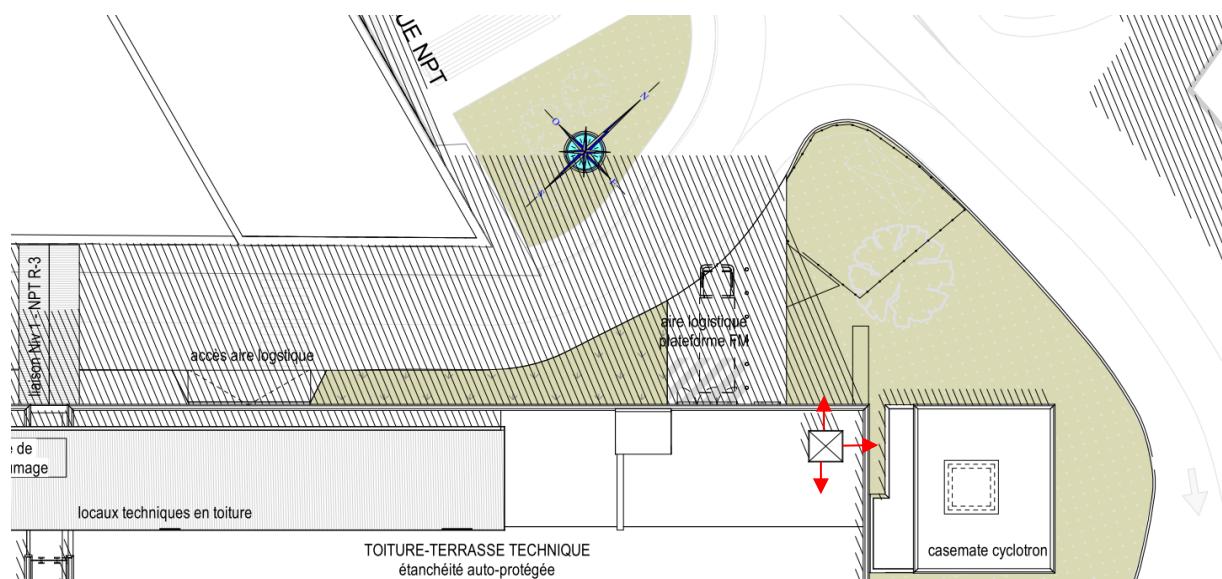
Le terme source a été évalué par le CHU Martinique. Les radionucléides présents dans les rejets atmosphériques sont l'Argon-41 (Ar-41) et le Fluor-18 (F-18).

Les émissions à l'atmosphère se font par un seul point de rejet. Les caractéristiques du point de rejet ainsi que les émissions considérées sont détaillées dans le Tableau 1. Ces informations ont été transmises par le Client. Le point de rejet est localisé sur la Figure 2. Il s'agit d'un rejet horizontal sur 3 faces orienté vers le nord-ouest, le nord-est et le sud-est.

Tableau 1 : caractéristiques des rejets

		Unités	Sortie Cyclotron
Coordonnée X et Y (UTM20)		m	X : 711 494 Y : 1 618 752
Hauteur par rapport au sol		m	17,8
Diamètre équivalent	Ventelle Nord-ouest	m	0,64
	Ventelle Sud-est	m	0,64
	Ventelle Nord-est	m	0,86
Température des rejets		°C	22
Débit		m ³ /h	26 410
Nombre d'heures de fonctionnement		h/an	2 000
Périodes de fonctionnement		-	Du lundi au vendredi de 6h à 14h (52 semaines/an)
Flux à l'émission en Fluor-18		GBq/an	100
Flux à l'émission en Argon-41		GBq/an	100

Figure 2 : localisation du point de rejet

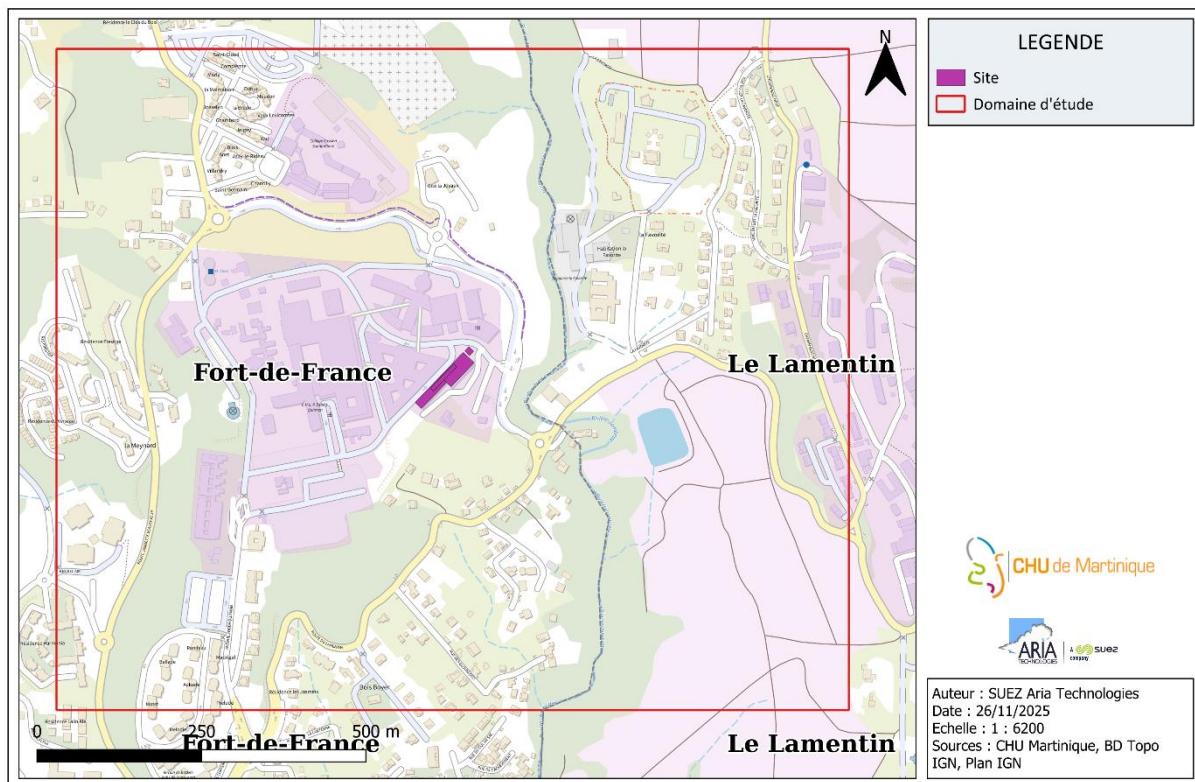


5. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION

5.1 DOMAINE D'ÉTUDE

Le site se trouve au nord-est de Fort-de-France (972). Le domaine d'étude retenu est identique à celui retenu dans la précédente étude, il s'agit d'un rectangle de 1,2 par 1 km de côté centré sur le site. Il est représenté par un carré rouge sur la Figure 3. Deux communes se trouvent dans le domaine d'étude : Fort-de-France et Le Lamentin.

Figure 3 : domaine d'étude



5.2 POPULATIONS

Le Tableau 2 indique les données de population pour les communes présentes dans le domaine d'étude.

Tableau 2 : données de population (Source : Insee, Recensement de la population 2022¹)

Dép.	Communes	Surface de la commune (km ²)	Population municipale en 2022	Densité de population 2022 (hab/km ²)	Population municipale en 2022 pour les 0 – 14 ans
972	Fort-de-France	44,2	75 165	1 700,2	11 727

¹ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/zones/2011101>, consulté le 26/11/2025

Dép.	Communes	Surface de la commune (km ²)	Population municipale en 2022	Densité de population 2022 (hab/km ²)	Population municipale en 2022 pour les 0 – 14 ans
972	Le Lamentin	62,3	39 346	631,4	6 734

L'habitation la plus proche du site est située à environ 130 m au sud-est du point de rejet.

5.3 POPULATIONS SENSIBLES ET INSTALLATIONS SPORTIVES

Certaines populations, plus particulièrement sensibles à la qualité de l'air, peuvent être recensées par l'intermédiaire des structures qu'elles fréquentent :

- Enfants : crèches et écoles ;
- Personnes âgées : maisons de retraite ;
- Personnes malades : hôpitaux et cliniques ;
- Sportifs : stades, centres sportifs, terrains de sport extérieurs.

Sur le domaine d'étude, il est dénombré :

- 1 collège² ;
- 2 établissements sanitaires et sociaux³ ;
- 10 équipements sportifs extérieurs⁴.

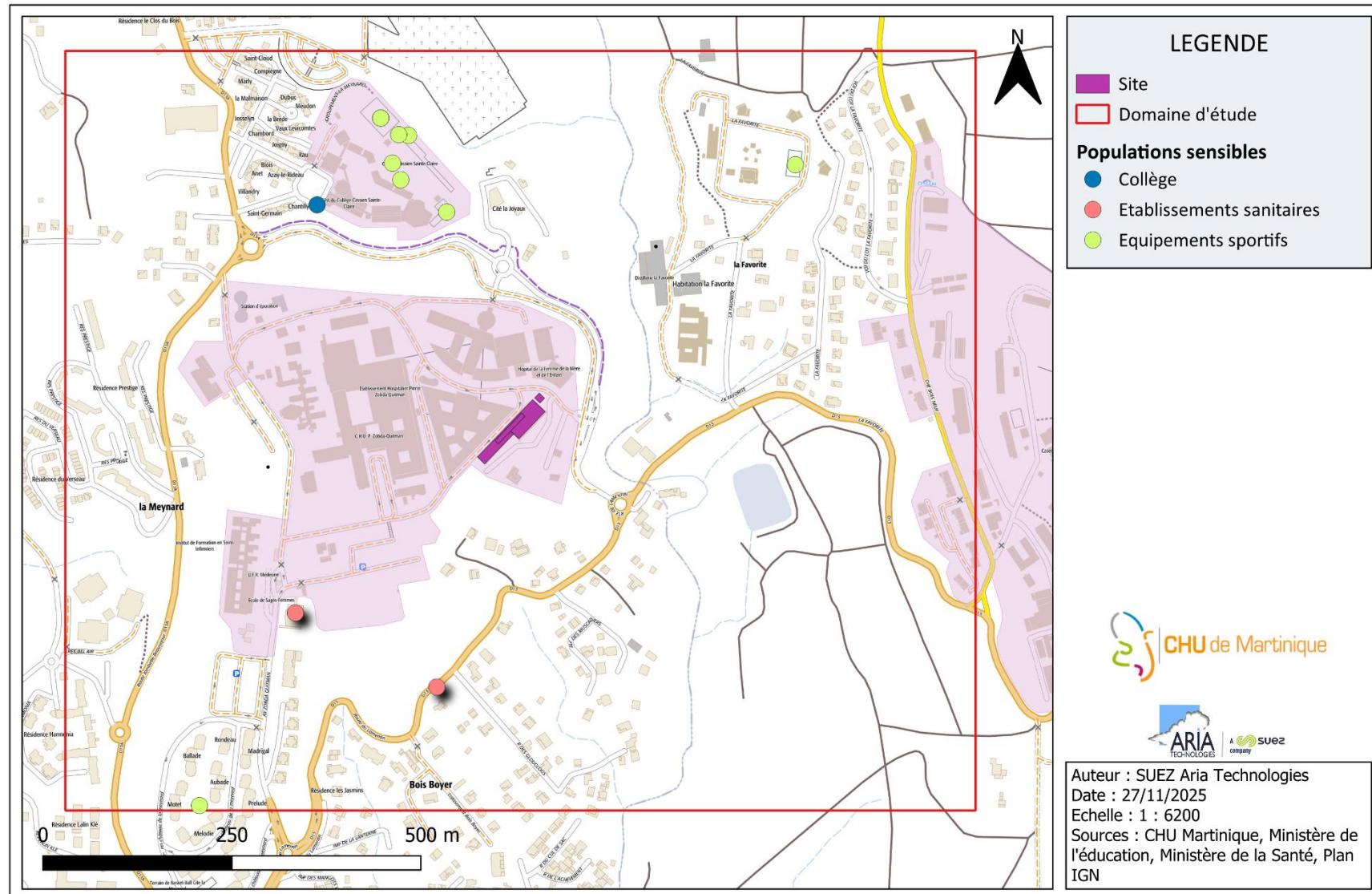
La Figure 4 localise ces établissements. L'établissement sensible le plus proche du site est le Centre Hospitalier Universitaire de Martinique.

2 Source : Adresse et géolocalisation des établissements d'enseignement du premier et second degrés <https://data.education.gouv.fr>

3 Source : FINESS (Fichier National des Établissements Sanitaires et Sociaux) <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/finess-extraction-du-fichier-des-établissements/>

4 Source : <https://equipements.sports.gouv.fr/explore/dataset/data-es/export/>

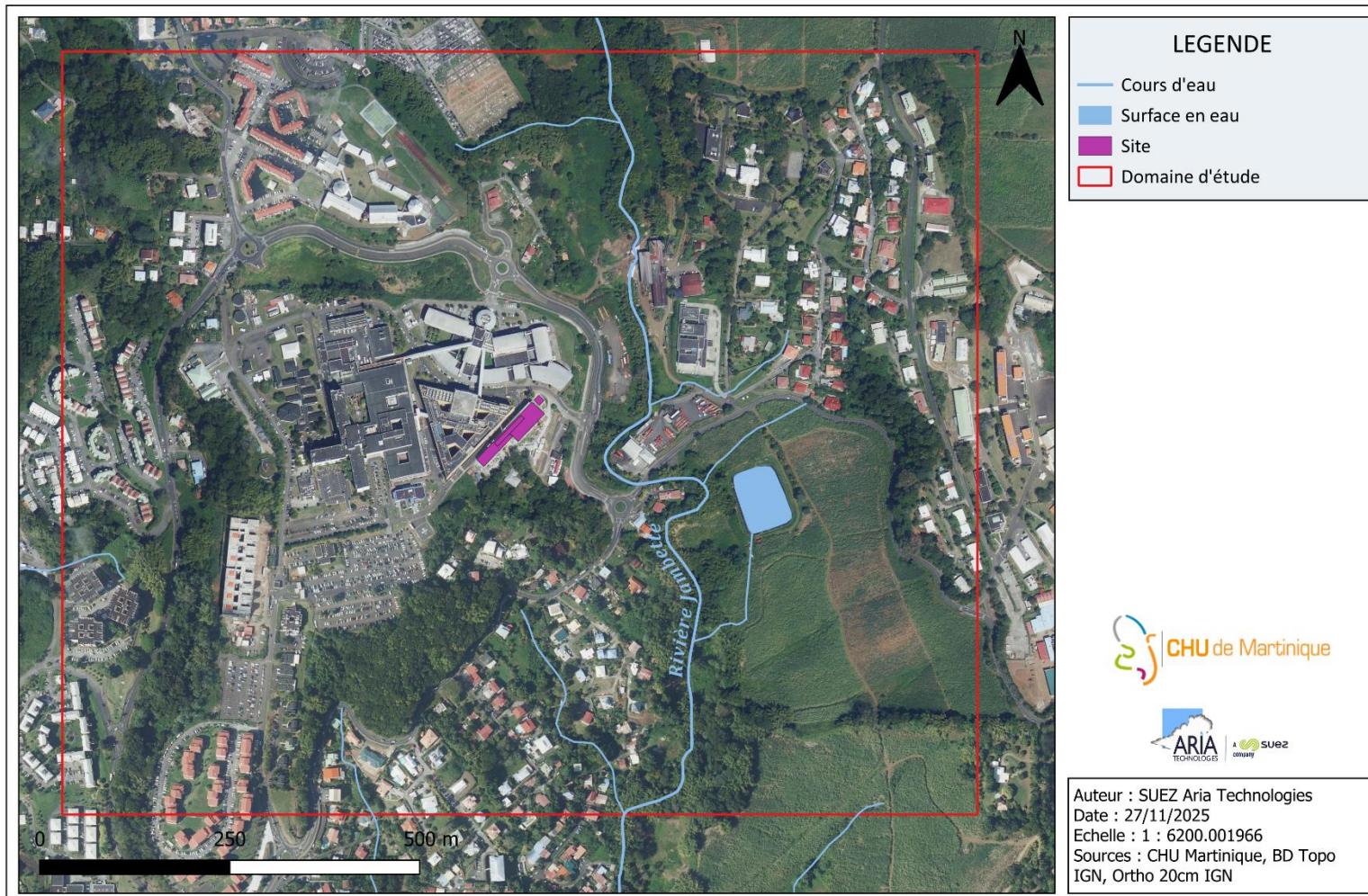
Figure 4 : localisation des populations sensibles et des équipements sportifs extérieurs les plus proches



5.4 USAGES AUTOUR DU SITE

Un seul cours d'eau traverse le domaine d'étude comme le montre la Figure 5. Il s'agit du cours d'eau « La Jambette ».

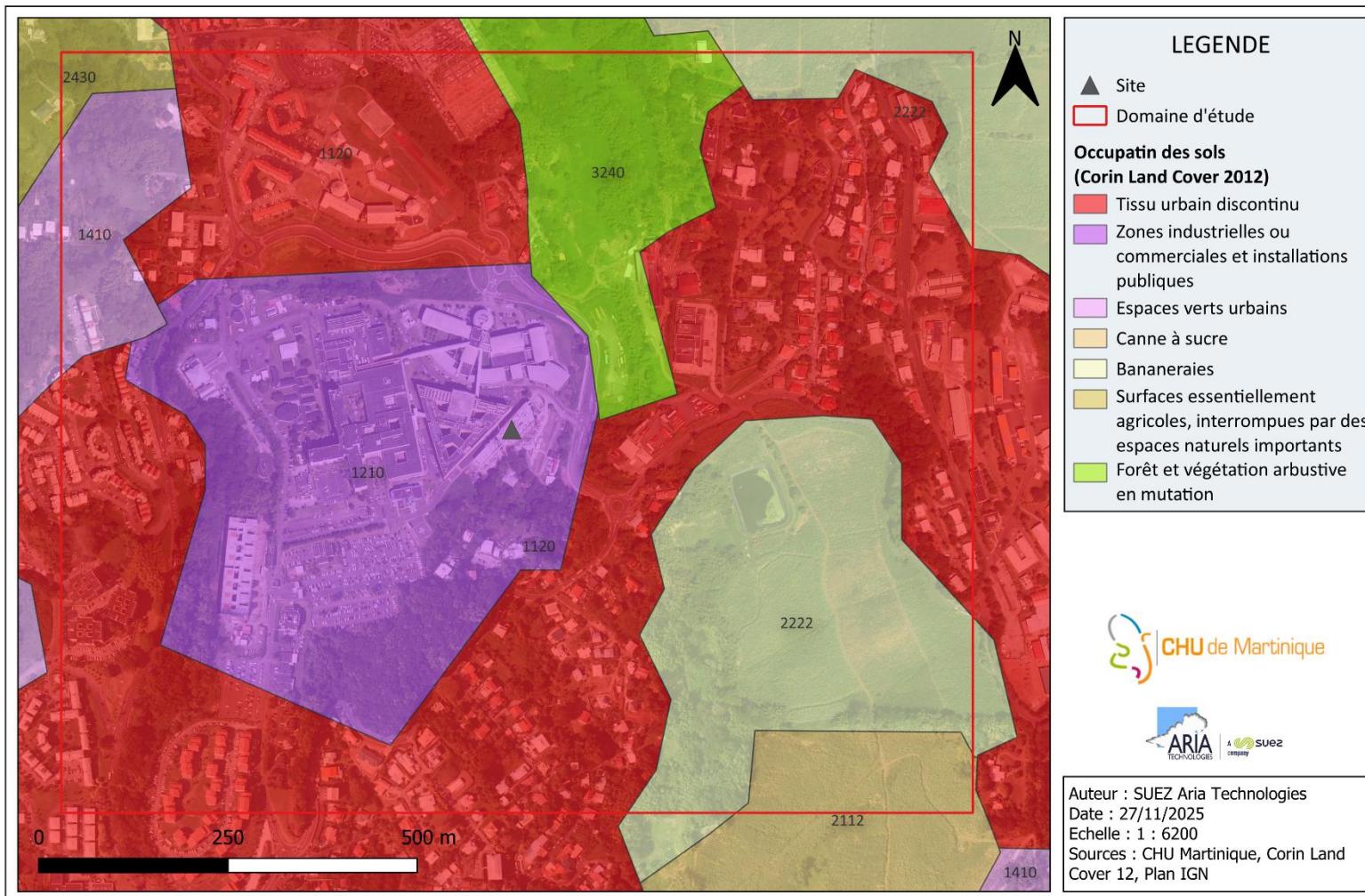
Figure 5 : réseau hydrographique (BD TOPO® Hydrographie, IGN)



5.4.1 Occupation des sols

Comme le montre la Figure 6 (données Corine Land Cover 2012 d'occupation du sol), le site se trouve dans une zone industrielle et commerciale.

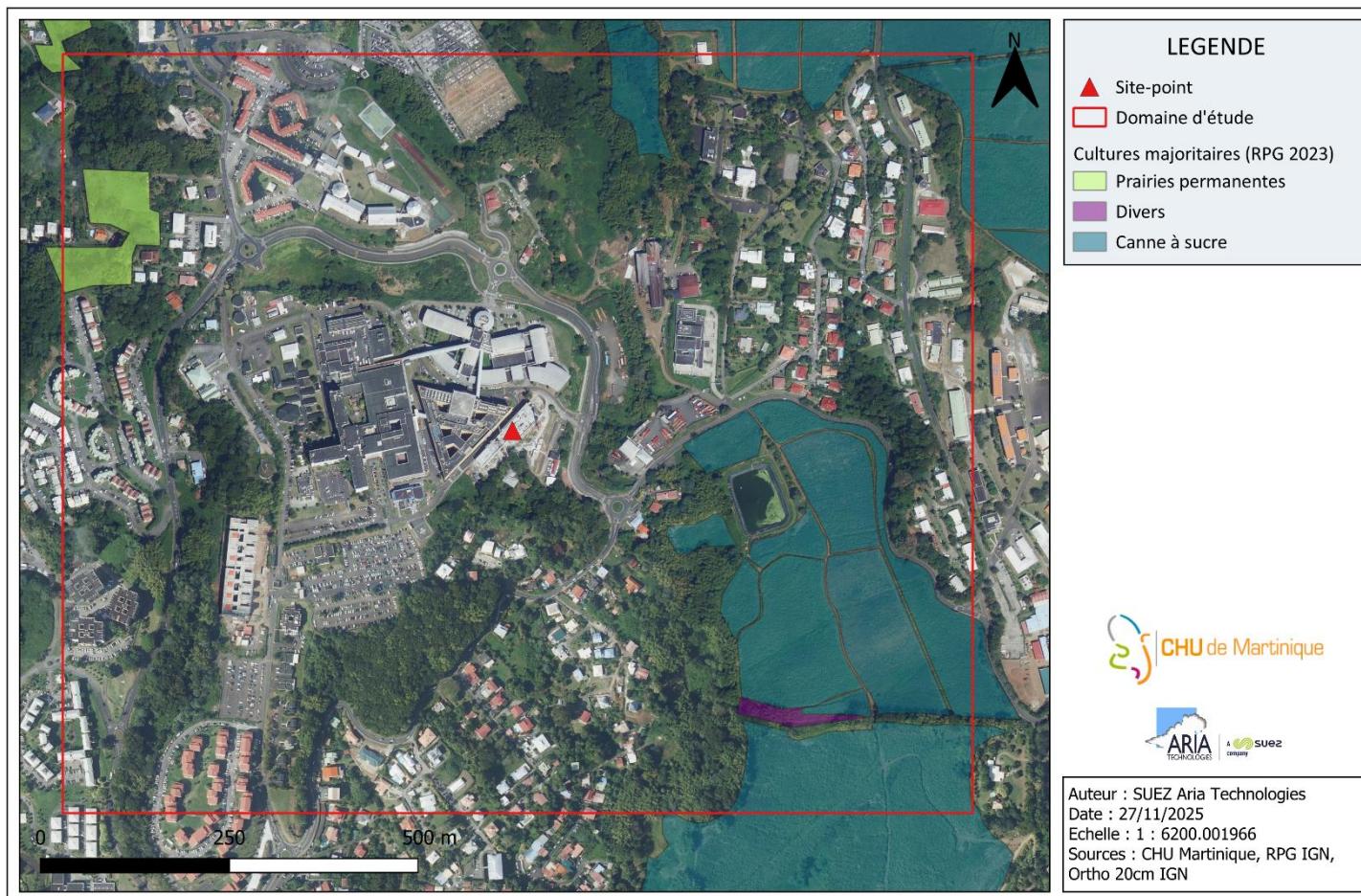
Figure 6 : occupation du sol (données CORINE Land Cover 2012)



5.4.2 Usages agricoles

Comme le montre la Figure 6, même si le site se trouve en zone industrielle, des zones de cultures sont présentes sur le domaine d'étude, principalement à l'est du site. Afin d'avoir une présentation plus précise des zones de cultures, la Figure 7 présente les cultures majoritaires sur chaque îlot de cultures pour l'année 2023. Les zones agricoles correspondent en grande partie à des cultures de canne à sucre.

Figure 7 : culture majoritaire sur chaque îlot de culture (données du registre parcellaire graphique RPG 2023)



Le Tableau 3 présente les résultats du recensement général agricole 2020. Le recensement agricole offre un portrait instantané, complet et détaillé, du secteur de l'agriculture (population agricole, surfaces végétales, y compris viticoles, effectifs animaux, moyens de production, activités annexes, etc.).

Tableau 3 : recensement agricole 2020 (recensement le plus récent disponible) (Source : Ministère de l'Agriculture⁵)

Communes	Orientation technico-économique de la commune	Exploitations agricoles ayant leur siège dans la commune	Superficie agricole utilisée en hectare
Fort-de-France	Fleurs et horticulture diverse	31	226
Le Lamentin	Fruits et autres cultures permanentes	184	2 485

5.4.3 Activités de loisirs

Il n'y a aucune zone de baignade autorisée et surveillée sur la zone d'étude⁶.

5.4.4 Recensement des points d'eau

Les captages d'eau destinée à la consommation humaine, captages en eau souterraine et en eau de surface continentale (rivières, lacs) sont issues du référentiel des captages AEP (Alimentation en Eau Potable), disponible sur le site <http://www.ades.eaufrance.fr/>. Le référentiel des captages d'eau souterraine est élaboré à partir de champs issus d'une part de la base de données du ministère en charge de la Santé SISE-Eaux (Système d'information en santé environnement sur les eaux) et d'autre part de ceux de la banque de données du BRGM BSS EAU (Banque du Sous-Sol Eau).

Aucun captage d'eau AEP destinée à la consommation humaine n'est présent dans le domaine d'étude.

5.5 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 stabilité de l'atmosphère et la pluviométrie.

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.

⁵ <http://recensement-agricole.agriculture.gouv.fr/>

⁶ <https://baignades.sante.gouv.fr/>

5.5.1 Données météorologiques

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

- **sa position géographique** : la station retenue doit être la plus proche possible de la zone d'étude et il ne doit pas exister d'obstacle majeur entre la station et la zone d'étude ;
- **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 les paramètres vent, température et nébulosité toutes les heures ou toutes les 3 heures pendant une ou plusieurs années ;
- **la pertinence des données météorologiques.**

Les données météorologiques retenues pour la simulation de dispersion sont des **données extraites au niveau du site** qui proviennent de la société Meteomatics. Elle propose la fourniture de données historiques issues de stations METAR et de simulations météorologiques mondiales afin de représenter au mieux la météorologie au niveau du site (données « Meteomatics Mix »⁷). Les données simulées pour le vent (direction et vitesse), la nébulosité, la pluviométrie et la température ont été acquises dans le cadre de cette étude.

Les données météorologiques étudiées sont les mesures horaires (1 mesure toutes les heures) sur les cinq dernières années : du 01/01/2020 au 31/12/2024.

5.5.2 Analyse météorologique

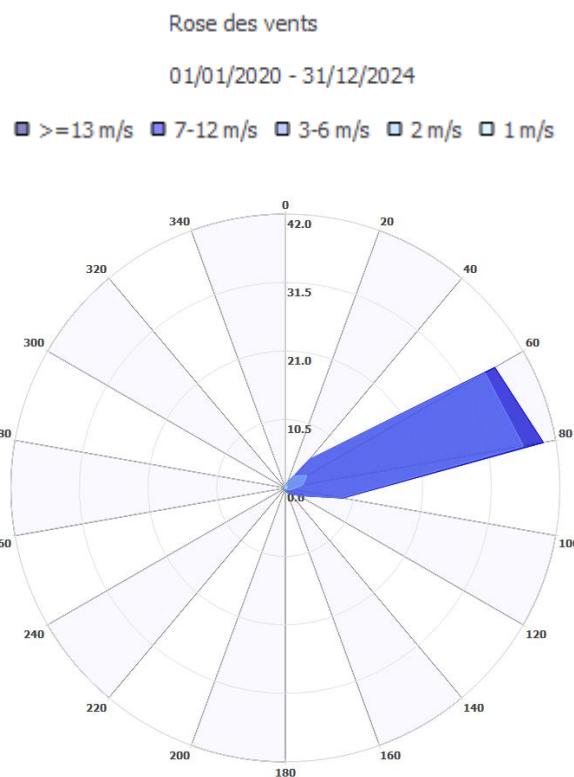
5.5.2.1 Roses des vents

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 8 présente la rose des vents générale par classe de vitesse au niveau du site sur la période du 01/01/2020 au 31/12/2024.

⁷ Le Meteomatics Mix combine différentes sources en un mélange intelligent, de sorte que la meilleure source de données est choisie pour chaque heure et chaque lieu : combine l'ECMWF avec plus de 25 autres modèles météorologiques, mélange de modèles météorologiques et de terrain, de données sur l'utilisation des sols et de données astronomiques, calibrés avec les données de la station pour une précision encore plus grande. Résolution : 100 m

Figure 8 : rose des vents générale sur 5 ans
Extraction au niveau du site – Période du 01/01/2020 au 31/12/2024



Le Tableau 4 synthétise les fréquences d'occurrence par classe de vitesse, toutes directions confondues.

Tableau 4 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent toutes directions confondues
Extraction au niveau du site – Période du 01/01/2020 au 31/12/2024

Classe de vitesse (m/s)	calmes	1	2	3-6	7-12	>=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 (%)	1,5	2,5	10,7	80,3	5	0

Sur la période du 01/01/2019 au 31/12/2019, les principaux résultats de cette analyse sont les suivants :

- La rose des vents montre une direction privilégiée : les vents provenant de l'est-nord-est (77,2 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 60° et 80°⁸) ;
 - Sur l'ensemble des directions, les vents ont une vitesse moyenne de 4,1 m/s (soit 14,7 km/h) ;
 - Les vents les plus fréquents sont les vents de vitesse comprise entre 3 m/s et 6 m/s, soit respectivement 10,8 km/h et 21,6 km/h ;

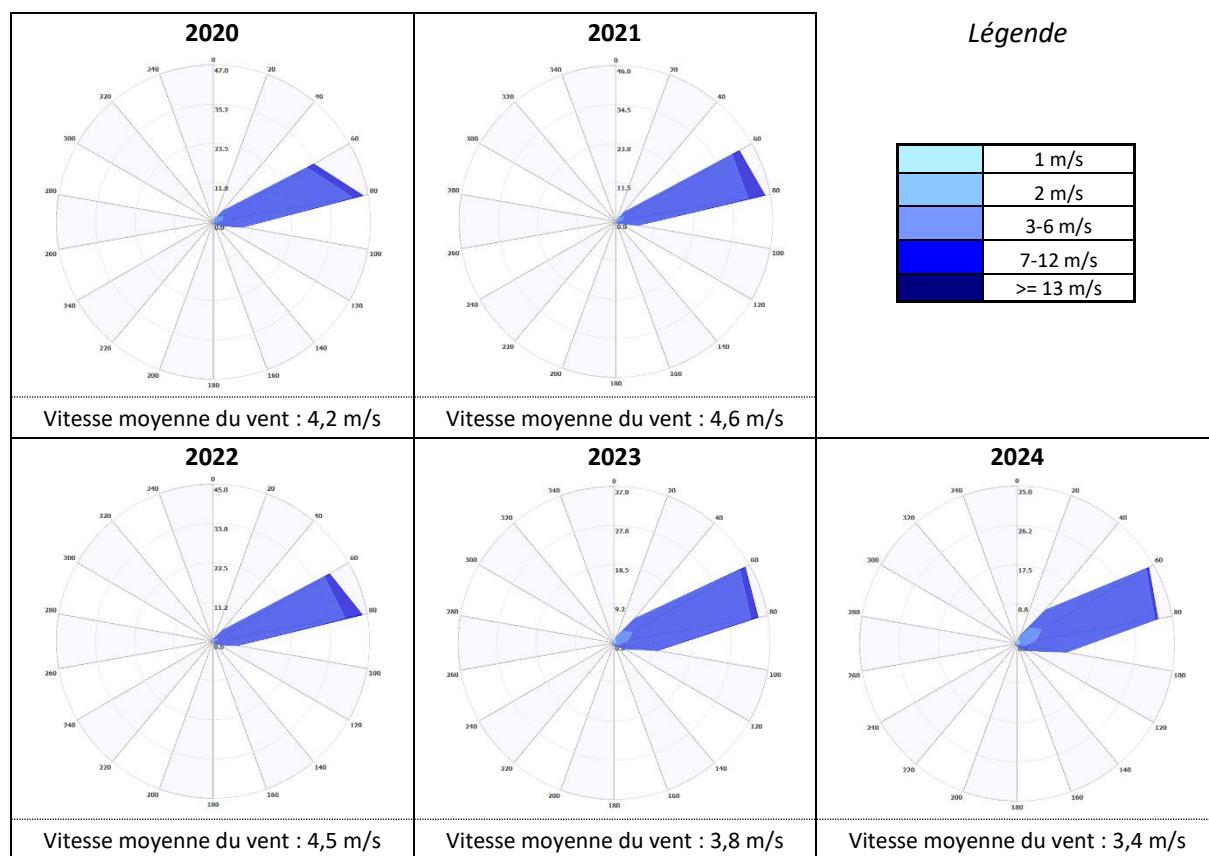
⁸ Les directions du vent sont données en degrés par rapport au Nord et indiquent la direction d'où vient le vent (convention météorologique internationale). Un vent de 0° est donc un vent venant du Nord, un vent de 180° est un vent venant du Sud.

- Les vents faibles (de vitesse inférieure ou égale à 2 m/s) sont relativement fréquents et représentent 14,7 % des observations, dont 1,5 % de vents calmes (vents inférieurs à 0,9 m/s) ;
- Les vents forts (de vitesse supérieure à 7 m/s) sont observés peu fréquents puisqu'ils représentent 5 % des observations.

5.5.2.2 Roses des vents par année

Les roses des vents pour chaque année, de 2020 à 2024, sont présentées sur la Figure 9.

Figure 9 : roses des vents par année



L'année 2022 est l'année pour laquelle la rose des vents est la plus semblable à celle obtenue sur la période 2020-2024. De plus, la moyenne de la vitesse de vent pour l'année 2022 (4,5 m/s) est proche de la vitesse moyenne calculée sur les cinq années (à savoir 4,1 m/s). **L'année 2022 sera donc retenue pour les simulations.**

5.5.2.3 Stabilité atmosphérique

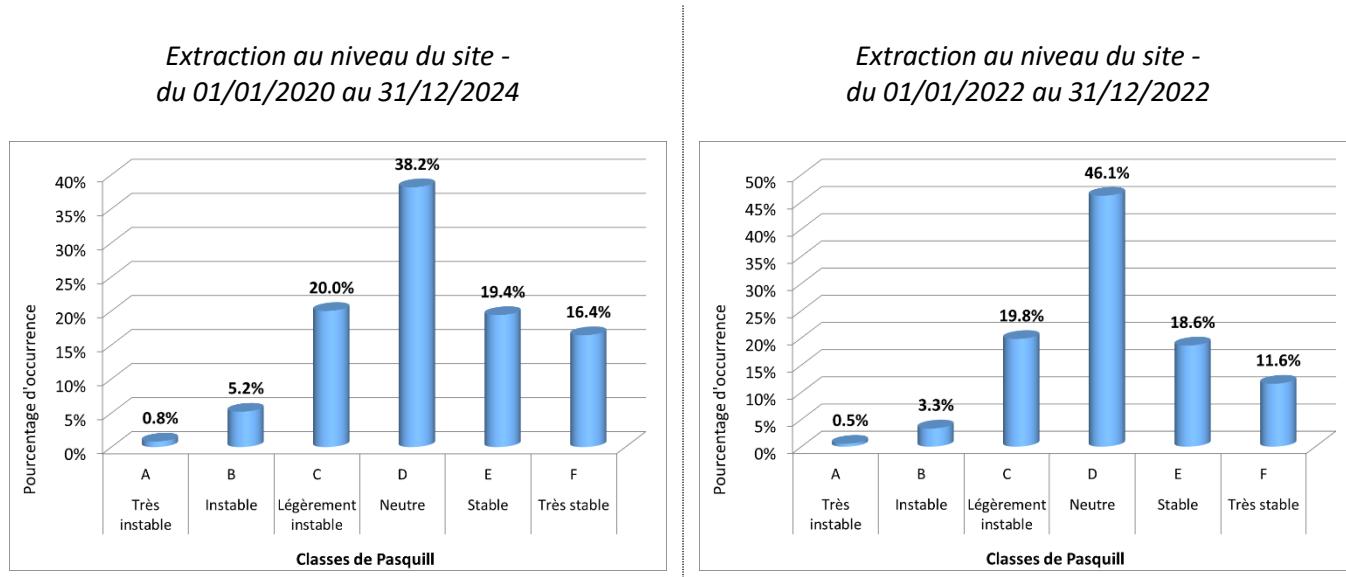
La stabilité de l'atmosphère est destinée à quantifier les propriétés diffuses de l'air dans les basses couches. Elle est souvent associée à la structure thermique de l'atmosphère : par exemple, les situations d'inversion thermique se produisent lorsque l'atmosphère est stable. Elle est déterminée à partir du vent et de la 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

La Figure 10 présente la répartition des cas météorologiques en fonction de la stabilité atmosphérique.

Figure 10 : répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique



Sur l'année 2022, comme sur les cinq dernières années, la classe D de Pasquill est la plus fréquemment observée (46,1 %), ce qui est très favorable pour la dispersion atmosphérique. Sur cette même année, les vents ont une vitesse moyenne d'environ 2,9 m/s en situation très stable - donc pénalisante pour la dispersion des émissions, tandis qu'en atmosphère neutre, elle est de 4,7 m/s.

5.5.2.4 Pluviométrie

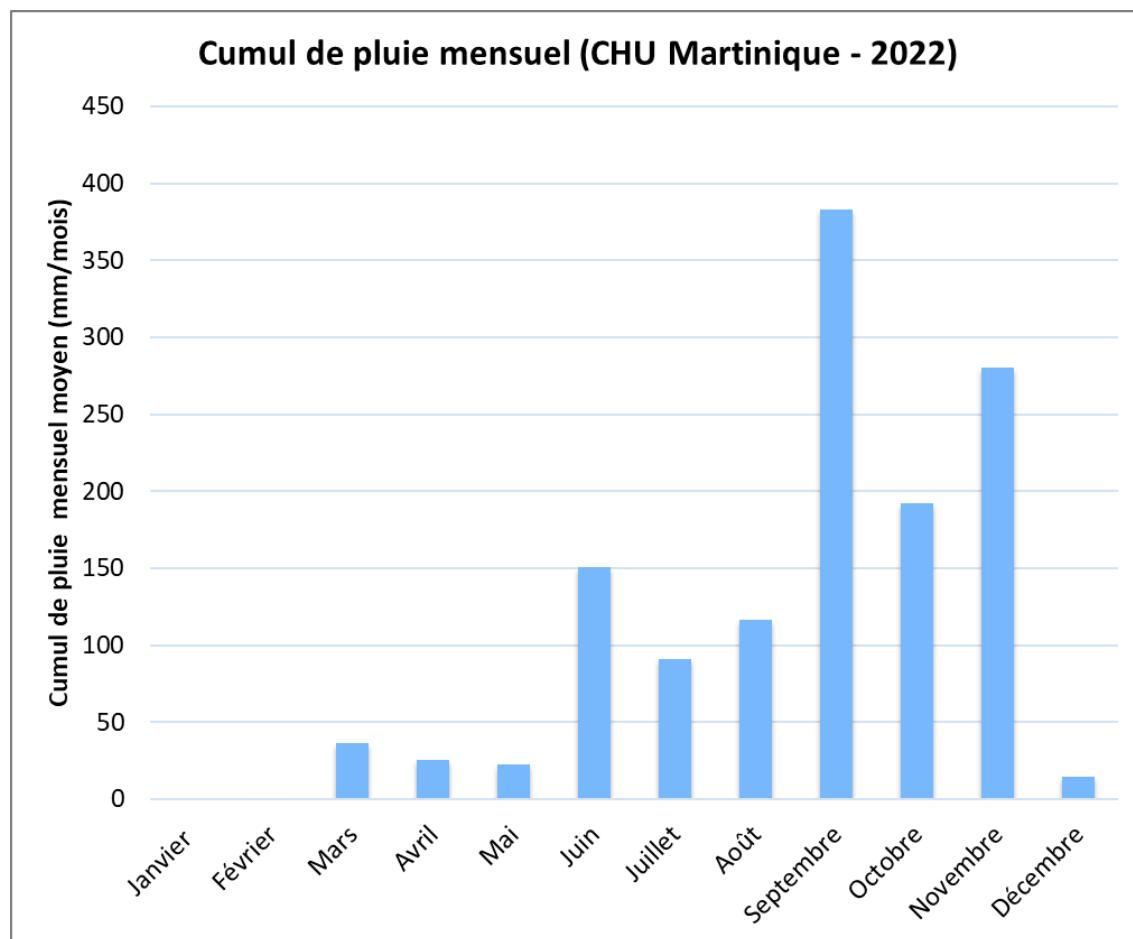
Dans le cadre de cette étude, les données de pluviométrie ont été retenues. Le cumul annuel des précipitations est présenté dans le Tableau 5. En 2022, il est tombé 1 313 mm de pluie.

Tableau 5 : statistiques relatives à la pluviométrie - Extraction au niveau du site - Période du 01/01/2020 au 31/12/2024

Année	Cumul annuel des précipitations (mm)
2020	1 611
2021	691
2022	1 313
2023	2 235
2024	2 054
Moyenne sur les 5 années	1 581

Le graphique suivant présente le cumul des pluies mensuel en 2022.

Figure 11 : variation moyenne mensuelle de la pluviométrie - Extraction au niveau du site - du 01/01/2022 au 31/12/2022



Les mois les plus pluvieux en 2022 au niveau du site ont été les mois de septembre, octobre et novembre.

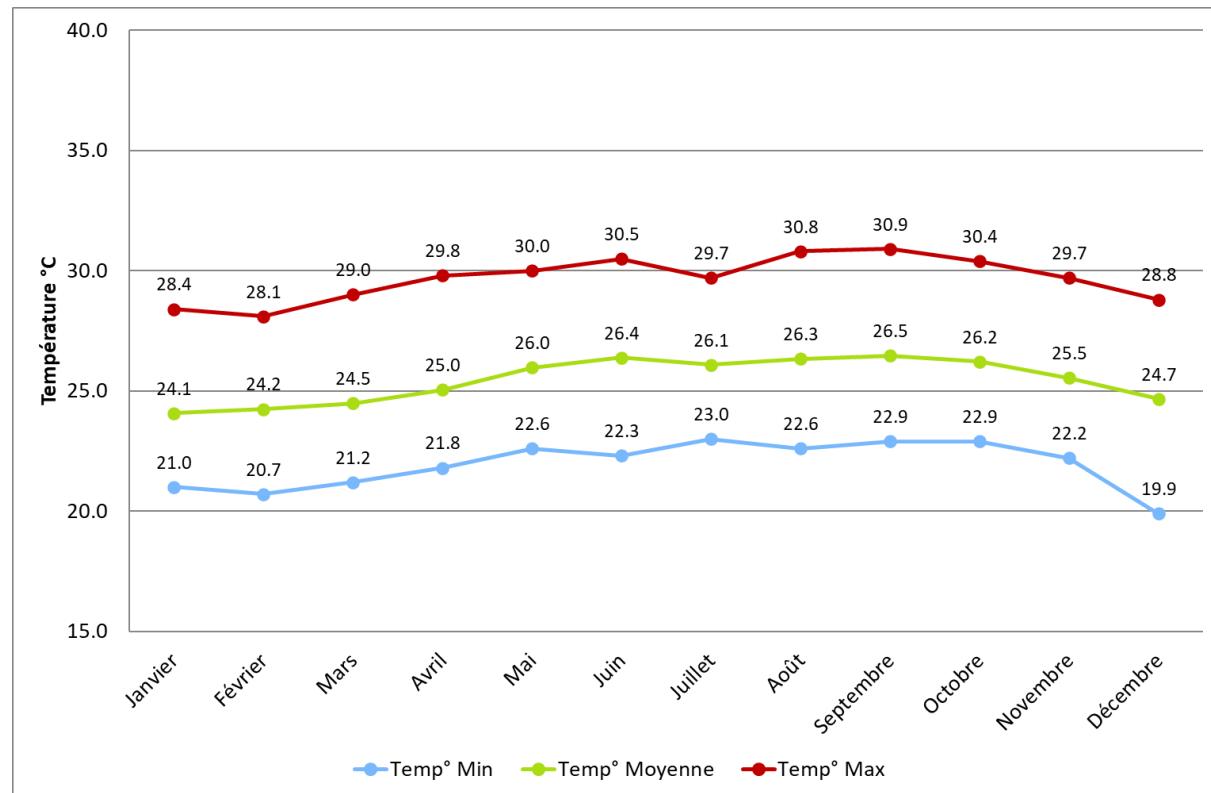
5.5.2.5 Température

La température de l'air, dernier paramètre intervenant dans le processus de dispersion des polluants, est en moyenne de 26,0°C sur les cinq dernières années et 25,5°C sur l'année 2022. La Figure 12 présente les variations moyennes mensuelles de la température minimale, moyenne et maximale en 2022.

Tableau 6 : statistiques relatives à la pluviométrie - Extraction au niveau du site - Période du 01/01/2020 au 31/12/2024

Année	Moyenne de Température °C
2020	25,7
2021	25,6
2022	25,5
2023	26,0
2024	26,5
Moyenne	26,0

Figure 12 : variation moyenne mensuelle de la température - Extraction au niveau du site -
du 01/01/2022 au 31/12/2022



6. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

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

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, compte tenu du contexte urbain et de la présence de bâtiments autour du site, le logiciel **AirAdvanced Map® Expert** a été utilisé en mettant en œuvre le modèle 3D **PMSS** (Parallel Micro SWIFT-SPRAY). Contrairement aux modèles gaussiens, ce modèle permet de prendre en compte avec précision les champs météorologiques quels 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 modèle en Annexe 1) repose sur la mise en œuvre de :

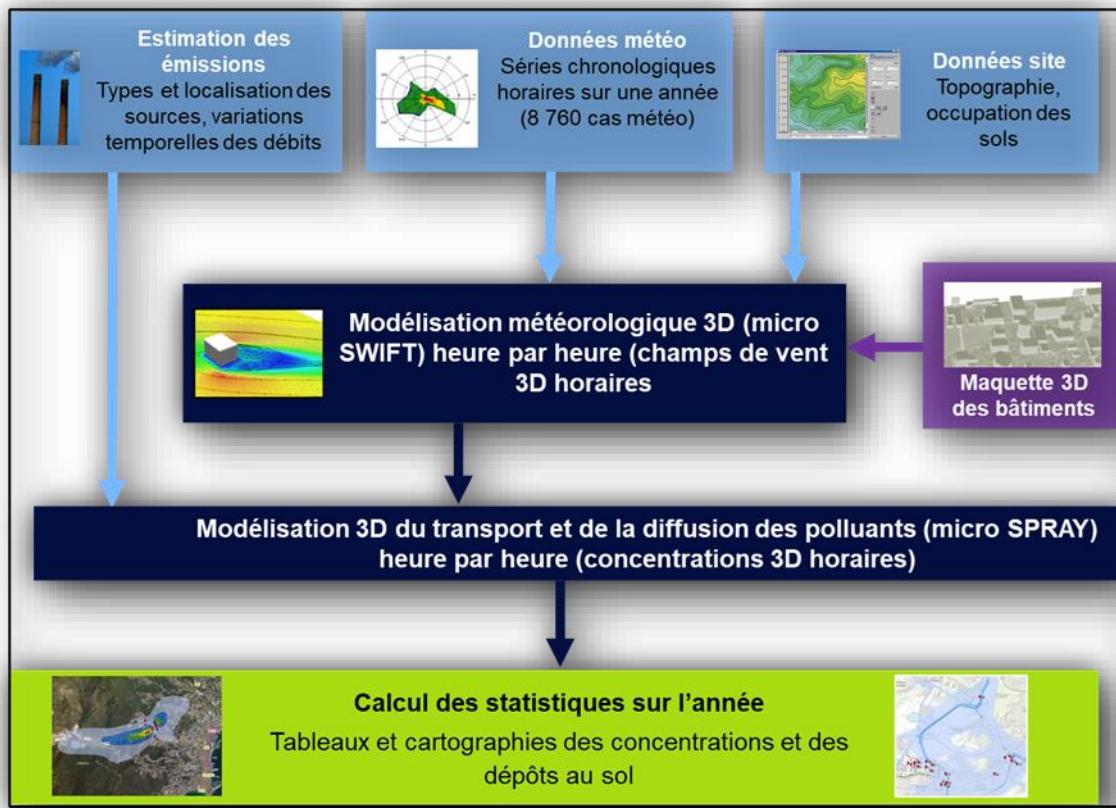
- SWIFT : modèle de calcul de champs tridimensionnels de vent et de température prenant notamment en compte l'influence du relief, de l'occupation des sols et des bâtiments. Il a été validé sur de nombreuses campagnes de mesures réalisées notamment par le US Department of Defense (Defense and Threat 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 :

- Étape 1 : constitution d'une base météorologique complète au pas horaire sur une année (année 2022, représentative des conditions de vents du domaine d'étude, cf. paragraphe 5.5.2) ;
- Étape 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 ;
- Étape 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 ;
- Étape 4 : calcul statistique des concentrations moyennes annuelles et des dépôts au sol à partir des résultats 3D horaires calculés sur l'année.

La Figure 13 présente la méthodologie mise en œuvre pour déterminer les concentrations dans l'air et dépôts au sol.

Figure 13 : méthodologie mise en œuvre

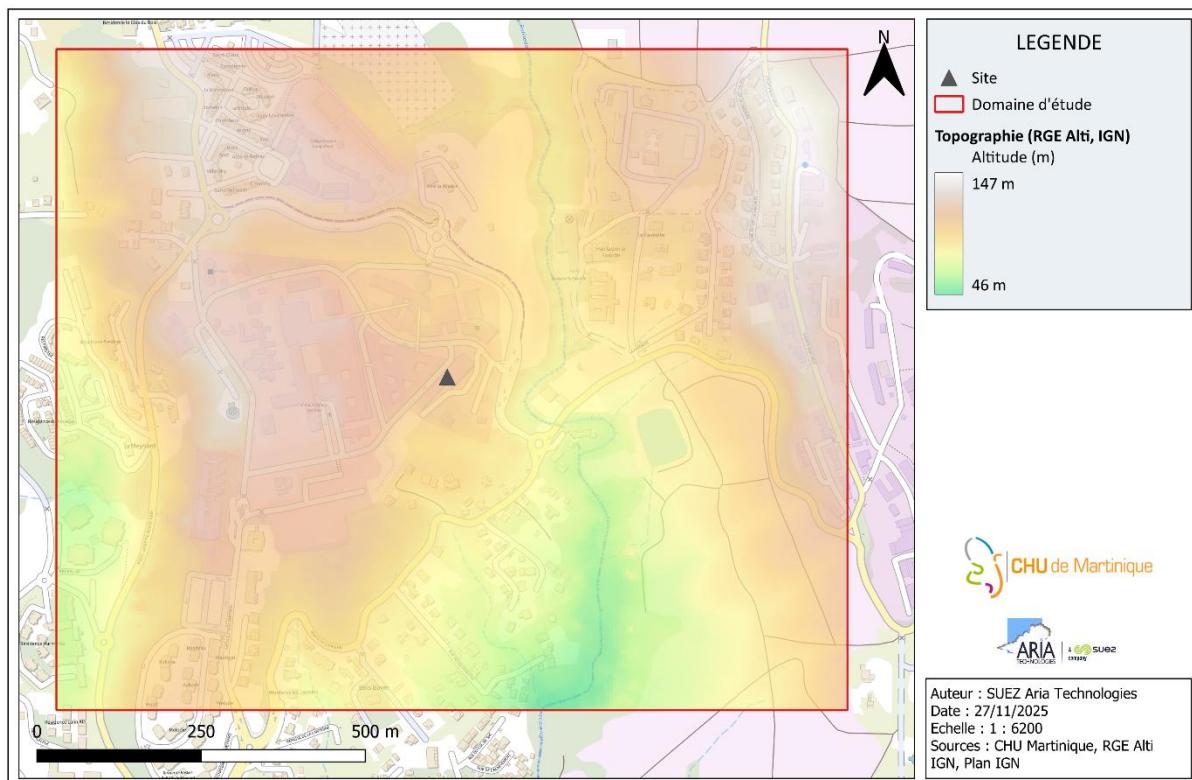


6.1 DONNÉES D'ENTRÉE

6.1.1 Topographie

La topographie est issue d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 5 mètres. La Figure 14 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 varie entre 46 mètres et 147 mètres.

Figure 14 : topographie du domaine d'étude

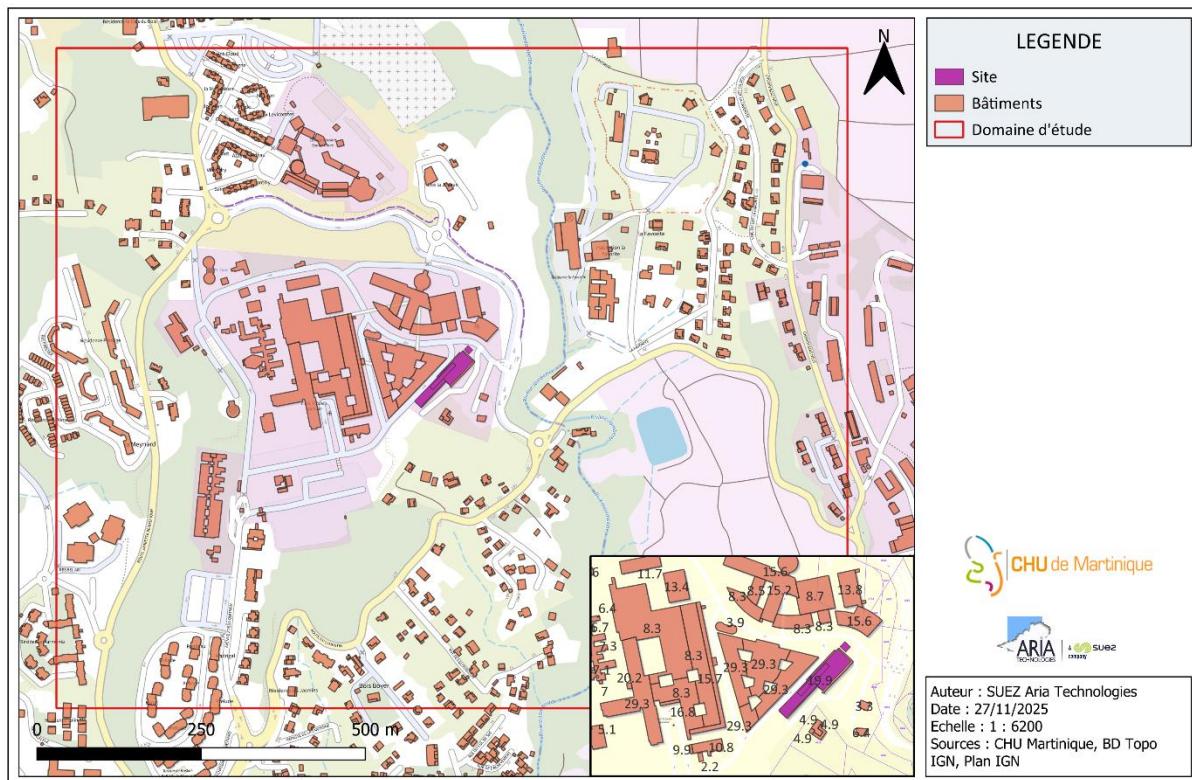


6.1.2 Obstacles

Les informations concernant les obstacles (bâti existant) sont issues de la BD Topo® (septembre 2025) de l'IGN. Les informations permettant de construire la maquette du projet ont été transmises par le CHU Martinique. À partir de ces données, un maillage tridimensionnel fin représentant le domaine d'étude et intégrant les obstacles a été réalisé.

La Figure 15 présente les obstacles de la zone d'étude.

Figure 15 : bâtiments sur la zone d'étude



6.1.3 Émissions

Les émissions prises en compte correspondent au terme source présenté dans le Tableau 1, paragraphe 4.

Conformément aux données fournies par le Client, le rejet a été pris en compte comme étant horizontal sur 3 faces (cf. paragraphe 4).

La vitesse d'éjection et la température sont considérées comme constantes pendant les phases de rejets (cf. paragraphe 4 pour les valeurs retenues).

6.1.4 Météorologie

Les données retenues correspondent aux données présentées au paragraphe 5.5 à savoir les données horaires de vent (vitesse et direction), température, nébulosité et pluie extraites au niveau du site sur l'année 2022 (1 mesure par heure sur la période du 01/01/2022 au 31/12/2022, soit 8 760 échéances horaires).

À partir de ces données, le modèle météorologique utilisé pour les simulations 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.

6.2 DÉTERMINATION DES CONCENTRATIONS DANS L'AIR

6.2.1 Paramétrages du modèle

6.2.1.1 Grille de calcul

Le but étant de modéliser les obstacles présents dans la zone d'étude et pouvant influer 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 25 niveaux verticaux dont 11 répartis dans la zone avec présence de bâtiments. La hauteur de maille la plus petite est de 2,5 mètres près du sol. Il s'agit d'un maillage structuré.

6.2.1.2 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 (dûs 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 (formulation de Holland).

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.

6.2.1.3 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 émises par pas de temps : 500 ;
- Durée de moyennage : 3 600 secondes.

Le Tableau 7 résume les valeurs utilisées dans le cadre de cette étude.

Tableau 7 : paramètres de calcul des dépôts pour chacune des espèces étudiées

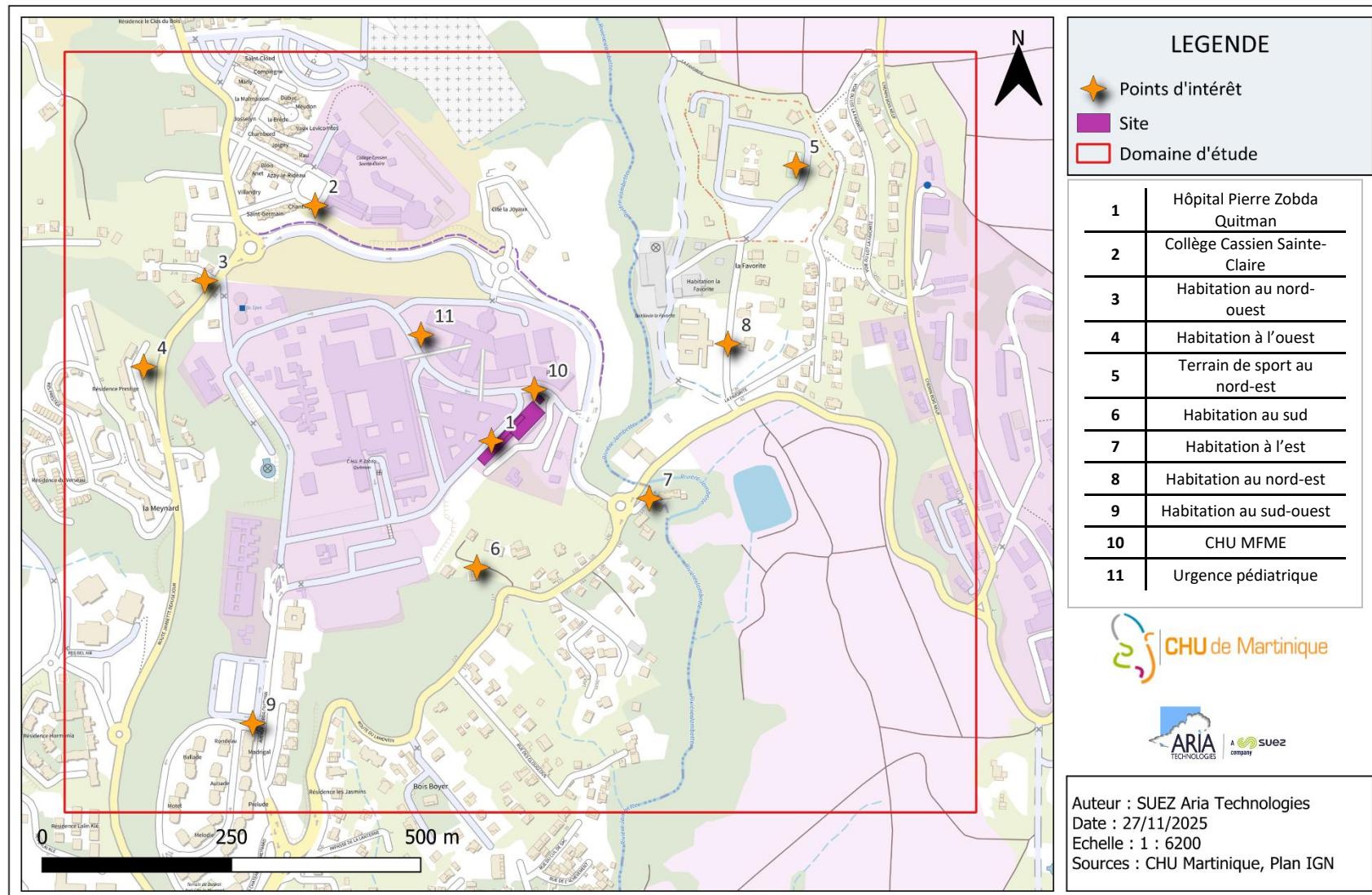
Polluant	Phase du polluant	Vitesse de dépôt sec (m/s)	Coefficient de lessivage (s ⁻¹)	Diamètre de particules (μm)	Demi-vie (s)	Source biblio.
Fluor-18	Particules	5.10 ⁻³	2.10 ⁻⁴	1	6 590	[1]
Argon 41	Particules	5.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴	1	6 590	[1]

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

6.2.2 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 16.

Figure 16 : localisation des points d'intérêt



6.2.3 Concentrations en moyenne annuelle

Le Tableau 8 présente les valeurs calculées en moyenne annuelle pour le Fluor-18 et l'Argon-41 exprimée en Bq/m³ au niveau des points d'intérêt présentés précédemment (cf. Figure 16) et de la zone la plus exposée du domaine d'étude.

Tableau 8 : concentrations en moyenne annuelle (Bq/m³)

Points d'intérêt		Concentrations en moyenne annuelle (Bq/m ³)	
		Fluor-18	Argon-41
1	Hôpital Pierre Zobda Quitman	1,0	1,1
2	Collège Cassien Sainte-Claire	3,0E-03	3,2E-03
3	Habitation au nord-ouest	1,6E-03	1,7E-03
4	Habitation à l'ouest	3,4E-02	3,5E-02
5	Terrain de sport au nord-est	1,6E-04	1,6E-04
6	Habitation au sud	2,4E-03	2,4E-03
7	Habitation à l'est	4,5E-03	4,6E-03
8	Habitation au nord-est	3,2E-04	3,2E-04
9	Habitation au sud-ouest	4,2E-03	4,3E-03
10	CHU MFME	1,1E-01	1,1E-01
11	Urgence pédiatrique	2,1E-02	2,2E-02
Point le plus exposé du domaine d'étude		10,7	11,1

Parmi les points d'intérêt retenus, le point correspondant à l'hôpital (point n°1) est le plus exposé.

Les Figure 17 et Figure 18 présentent la cartographie des concentrations en moyenne annuelle calculées au niveau du sol pour, respectivement, le Fluor-18 et l'Argon-41 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 Fluor-18 comprises entre 0,05 et 0,1 Bq/m³. Les cartographies montrent que les concentrations les plus élevées sont situées au nord-ouest à proximité du site. Les concentrations diminuent rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du site.

Figure 17 : concentrations au sol en moyenne annuelle en Fluor-18

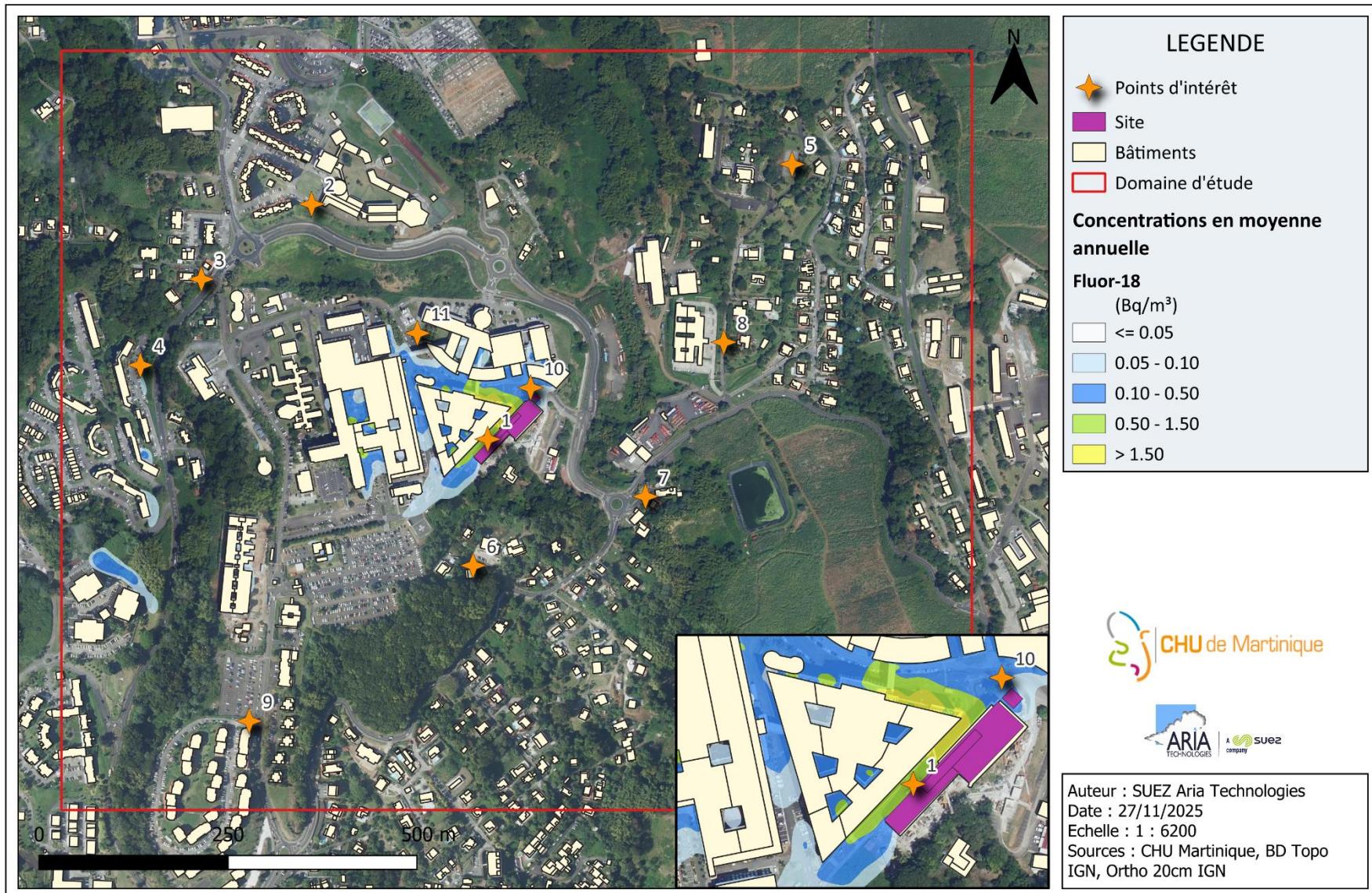
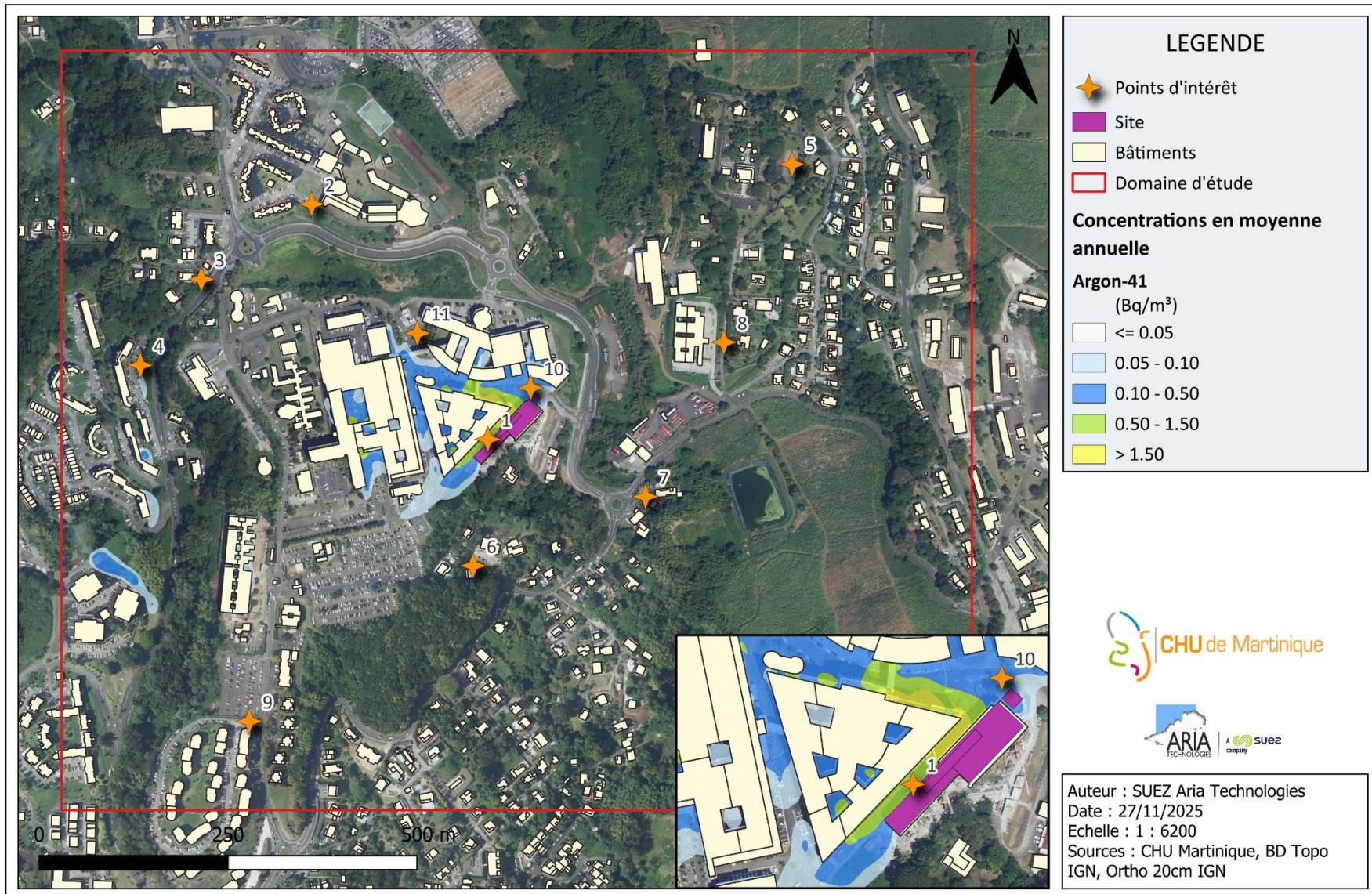


Figure 18 : concentrations au sol en moyenne annuelle en Argon-41



6.2.4 Dépôts au sol

Le Tableau 9 présente les valeurs de dépôts calculées en moyenne annuelle pour le Fluor-18 et pour l'Argon-41 exprimée en $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$ au niveau des points d'intérêt présentés précédemment (cf. Figure 16) et au niveau de la zone la plus exposée du domaine d'étude.

Tableau 9 : dépôts au sol moyens annuels ($\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$)

Points d'intérêt		Dépôts au sol ($\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$)	
		Fluor-18	Argon-41
1	Hôpital Pierre Zobda Quitman	7,3E-03	7,2E-03
2	Collège Cassien Sainte-Claire	6,5E-05	4,8E-05
3	Habitation au nord-ouest	6,1E-05	4,0E-05
4	Habitation à l'ouest	3,4E-04	3,1E-04
5	Terrain de sport au nord-est	1,6E-06	1,2E-06
6	Habitation au sud	2,2E-05	1,7E-05
7	Habitation à l'est	2,3E-05	2,3E-05
8	Habitation au nord-est	3,8E-06	2,9E-06
9	Habitation au sud-ouest	2,6E-05	2,4E-05
10	CHU MFME	1,4E-03	9,7E-04
11	Urgence pédiatrique	3,2E-04	2,4E-04
Point le plus exposé du domaine d'étude		1,6E-01	1,6E-01

Les Figure 19 et Figure 20 présentent les cartes des dépôts totaux moyens annuels sur le domaine d'étude pour, respectivement, le Fluor-18 et l'Argon-41, exprimés en $\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$.

Parmi les points d'intérêt retenus, le point correspondant à l'hôpital (point n°1) est le plus exposé.

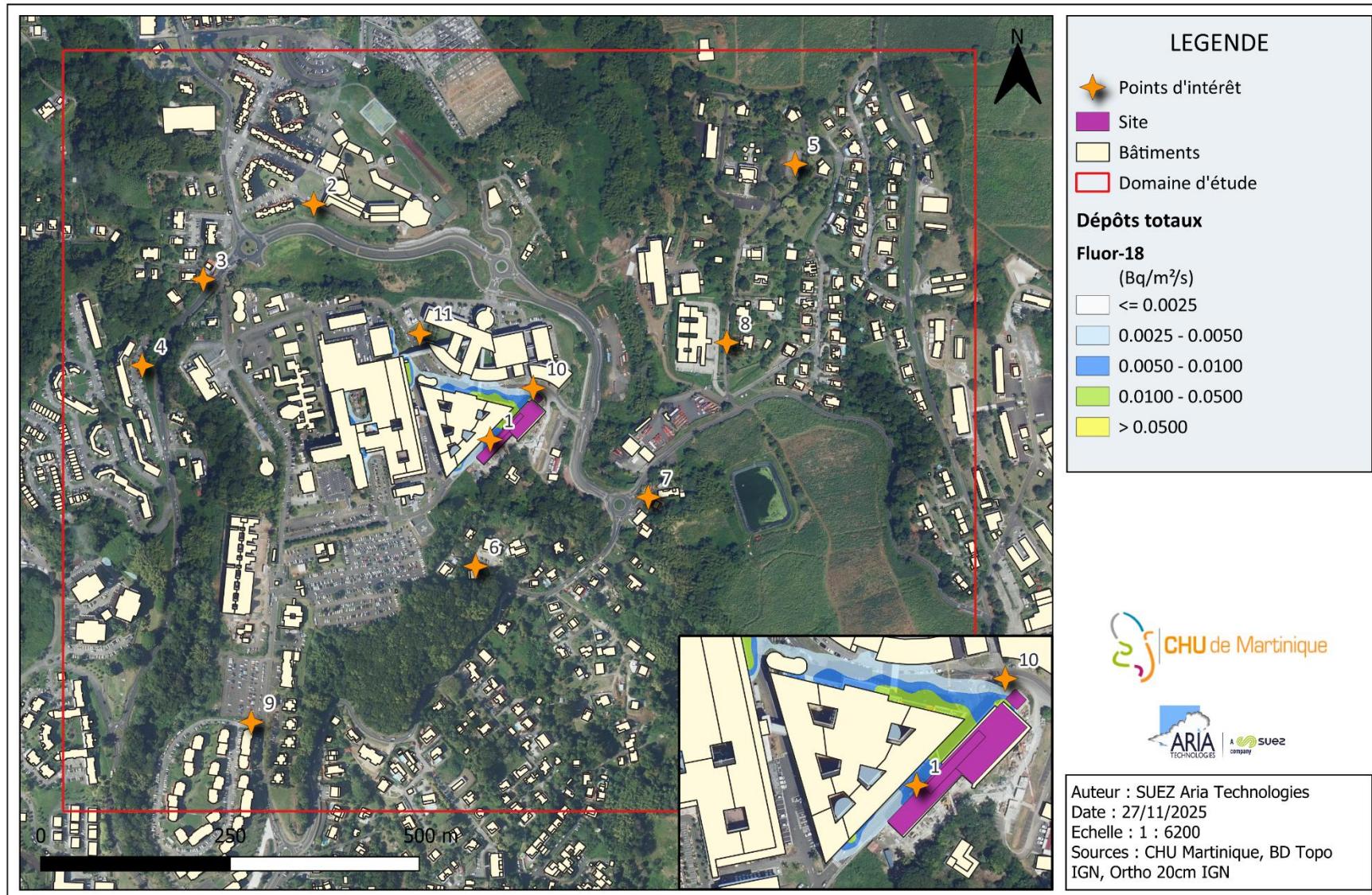
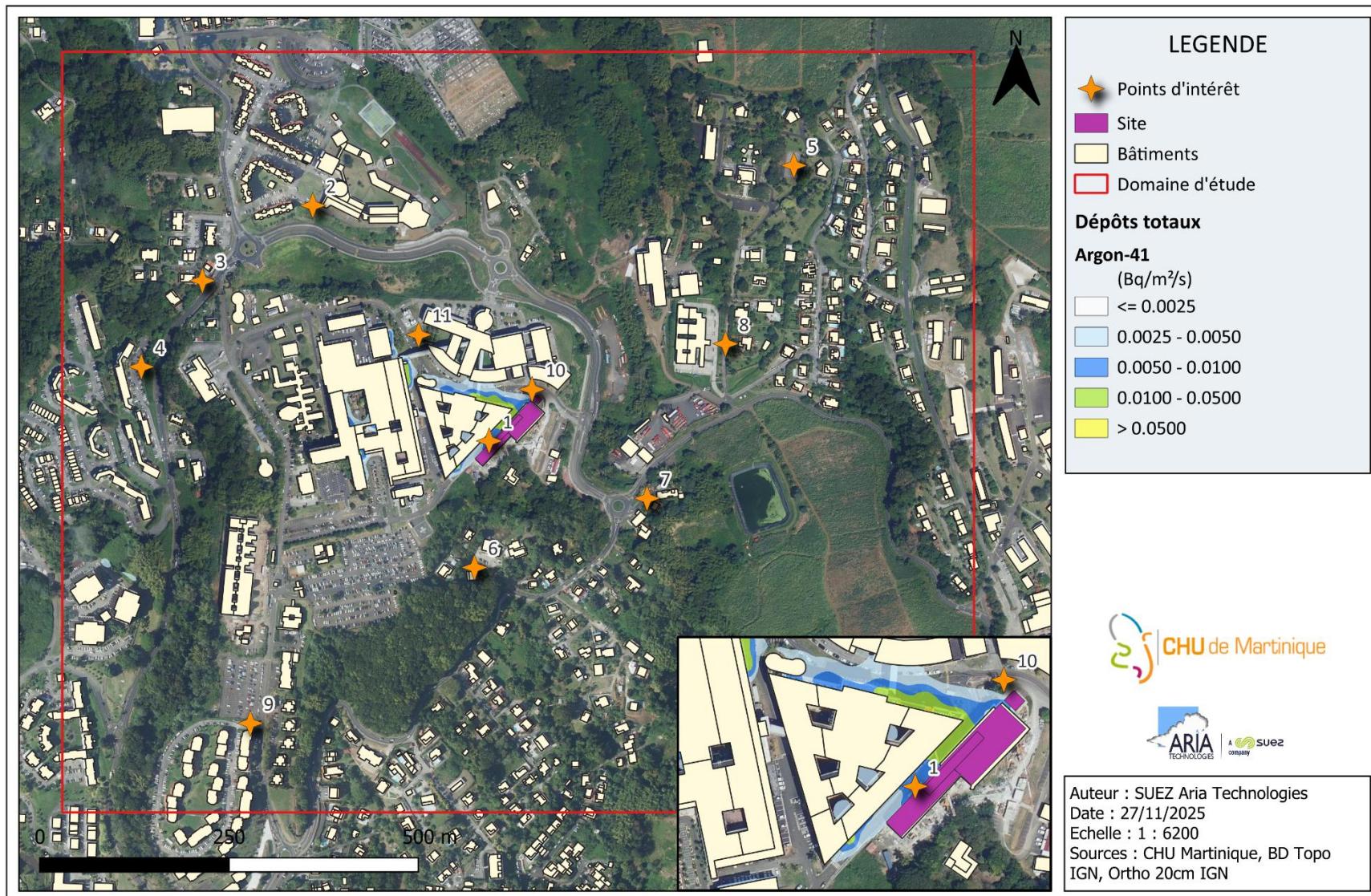
Figure 19 : dépôts totaux en Fluor-18 en $Bq/m^2/s$ 

Figure 20 : dépôts totaux en Argon-41 en $Bq/m^2/s$ 

7. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE

7.1 IDENTIFICATION DES DANGERS

7.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations

7.1.1.1 Effets sur la santé humaine⁹

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.

7.1.1.1.1 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 dose. Ce sont donc souvent dans le cas de situations accidentelles. Ils ne sont pas étudiés dans le cadre de la présente étude.

7.1.1.1.2 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.

7.1.1.2 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 :

9 Source : <https://www.asnr.fr/>

- 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.

7.1.2 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, définit des limites de doses individuelles annuelles cumulées admissibles. Pour le public, la limite de la dose efficace est fixée à 1 mSv/an. Pour les travailleurs, cette limite est fixée à 20 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.

7.2 SCHÉMA CONCEPTUEL D'EXPOSITION

7.2.1 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.

7.2.2 Schéma conceptuel d'exposition

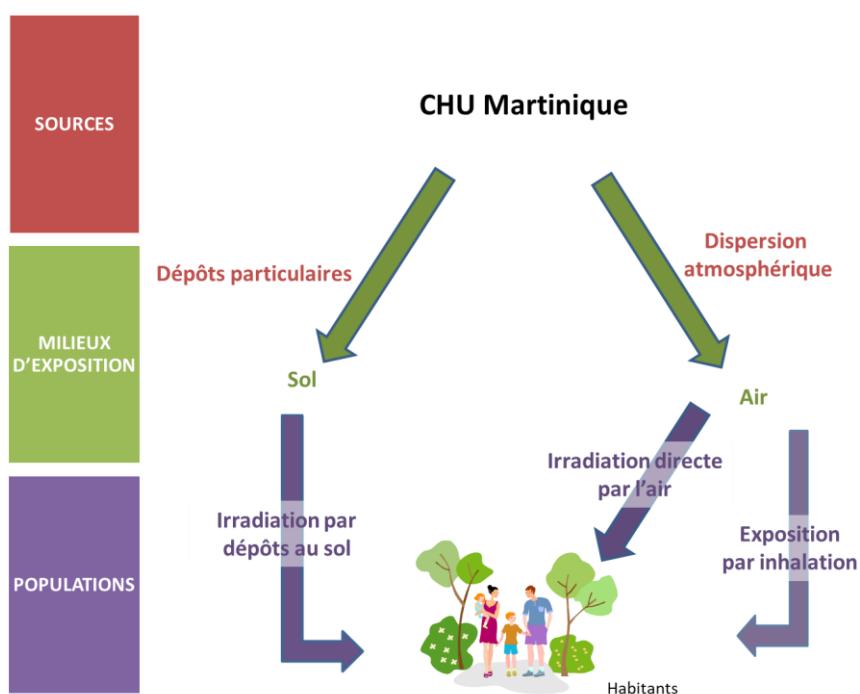
Le Fluor-18 et l'Argon-41 présentent tous deux une période radioactive courte (moins de 2 heures) : par conséquent, les phénomènes d'accumulation dans l'environnement et de transfert dans la chaîne alimentaire peuvent donc être considérés comme non significatifs. Par ailleurs, il n'existe pas de facteur de transfert dans les produits animaux pour ces radionucléides. L'exposition par consommation des végétaux et des produits animaux (exposition interne par ingestion) ne sera donc pas retenue dans la présente étude.

Les voies d'exposition retenues sont donc :

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

Le Schéma Conceptuel d'Exposition autour du site est présenté sur la Figure 21.

Figure 21 : schéma conceptuel d'exposition



7.3 ESTIMATION DES DOSES D'EXPOSITION

Sur la base du schéma conceptuel d'exposition, les voies d'exposition retenues sont :

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

7.3.1 Scénario d'exposition

Les scénarios retenus sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 10 : scénarios d'exposition retenus

SCENARIO	Écolier	Travailleur	Habitant majorant
Typologie	Établissement scolaire le plus exposé & Habitation la plus exposée	Lieu de travail le plus exposé & Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée
Individu	Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	Adulte (17 ans et plus)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans) Bébé (enfant de 1 à 2 ans)
Durée d'exposition	1 260 h/an (7 h/j, 5 j/7, 36 semaines/an) au niveau de l'établissement scolaire le plus exposé : point d'intérêt n°2 – Collège Cassien Sainte-Claire Le reste du temps au niveau de l'habitation la plus exposée : point d'intérêt n°4 – Habitation à l'ouest	2 000 h/an (10 h/j, 5 j/7, 40 semaines/an) au niveau du lieu de travail le plus exposé du domaine : point d'impact maximal situé en façade du CHU Le reste du temps au niveau de l'habitation la plus exposée : point d'intérêt n°4 – Habitation à l'ouest	8 760 h/an (toute l'année) au niveau de l'habitation la plus exposée : point d'intérêt n°4 – Habitation à l'ouest
Voies d'exposition	Irradiation (panache et dépôts) & Inhalation	Irradiation (panache et dépôts) & Inhalation	Irradiation (panache et dépôts) & Inhalation

À 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.

Pour l'exposition externe par les dépôts, l'accumulation des dépôts est intégrée classiquement sur un an, et également sur la vie entière (50 ans pour les adultes, et 70 ans pour les enfants quel que soit leur âge). Vue la période du Fluor-18 (< 2 heures), les impacts après 1 an, 50 ans et 70 ans de fonctionnement sont identiques. Seuls les résultats après 1 an d'exposition sont donc présentés dans la suite du document.

7.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation)

7.3.2.1 Méthodologie

L'irradiation a lieu :

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

7.3.2.1.1 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).

7.3.2.1.2 Exposition externe aux dépôts

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

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

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) ;

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) ; elle a été négligée dans cette étude. La formule se simplifie donc de la manière suivante :

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

7.3.2.2 Hypothèses

En l'absence de données dans l'arrêté du 16 novembre 2023, les valeurs des coefficients de dose efficace externe au panache sont issues du Federal Guidance 15 (FGR 15, 1999) et sont présentées dans le Tableau 11 et Tableau 12.

Tableau 11 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe – Argon-41

	Unités	Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Période radioactive	secondes		6 588	
Constante de décroissance radioactive (λ_r)	s^{-1}		1,05E-04	
Irradiation panache (CD_{pan})	(Sv/s)/(Bq/m ³)	7,64E-18	8,34E-18	9,05E-18
Irradiation dépôt (CD_{dep})	(Sv/s)/(Bq/m ²)	8,48E-16	9,23E-16	9,94E-16

Tableau 12 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe – Fluor-18

	Unités	Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Période radioactive	secondes		6 588	
Constante de décroissance radioactive (λ_r)	s^{-1}		1,05E-04	
Irradiation panache (CD_{pan})	(Sv/s)/(Bq/m ³)	4,40E-14	5,01E-14	5,55E-14
Irradiation dépôt (CD_{dep})	(Sv/s)/(Bq/m ²)	6,49E-16	7,02E-16	7,90E-16

Il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de cette voie d'exposition.

7.3.2.3 Calcul de la dose d'exposition externe

Le Tableau 13 présente les doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) pour les différents scénarios étudiés.

Rappelons que, compte-tenu des périodes radioactives du Fluor-18 et de l'Argon-41 (< 24 heures), les impacts après 1 an, 50 et 70 ans de fonctionnement sont identiques. Seuls les résultats après 1 an d'exposition sont donc présentés.

Quel que soit l'individu étudié, la dose d'exposition par irradiation est identique car l'exposition par irradiation ne dépend d'aucun paramètre physique lié à l'individu.

Tableau 13 : dose d'exposition par irradiation (panache + dépôts) (mSv/an)

Groupe de référence	Typologie	Cible	Dose externe (irradiation panache) mSv/an	Dose externe (irradiation dépôts) mSv/an	Dose externe totale par irradiation mSv/an
Scénario Ecole	Collège le plus exposé	Enfant (élève)	4,5E-05	1,3E-04	1,8E-04
Scénario travailleur	CHU	Adulte (travailleur)	3,4E-03	1,6E-02	2,0E-02
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	4,7E-05	1,5E-04	1,9E-04
		Enfant	5,4E-05	1,6E-04	2,1E-04
		Bébé	1,0E-04	3,0E-04	4,0E-04

7.3.3 Exposition interne par inhalation

Cette voie d'exposition résulte de l'activité inhalée.

7.3.3.1 Méthodologie

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

$$E_{inh} = A_{air} \times D_{resp} \times CD_{inh} \times F_{tp} \times t$$

Avec :

E_{inh} : dose efficace annuelle par inhalation (Sv.an⁻¹) ;

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

D_{resp} : débit respiratoire de l'individu (m³. h⁻¹) ;

CD_{inh} : coefficient de dose efficace par inhalation (Sv.Bq⁻¹) ;

F_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition interne par inhalation (s.d.) ;

t : durée d'exposition (en heures).

7.3.3.2 Hypothèses

Pour les doses efficaces internes par inhalation, les coefficients de dose utilisés proviennent de l'arrêté du 16 novembre 2023. Ces coefficients de dose correspondent à un diamètre de particules de 1 µm. Seul le Fluor-18 présente des coefficients de dose pour l'inhalation.

Les débits respiratoires considérés sont calculés à partir des volumes d'air inhalés quotidiennement indiqués dans la CIPR 66¹⁰.

Tableau 14 : volumes d'air inhalés

Cibles	Volumes d'air inhalés en m ³ /h (D_{resp})	Coefficient de dose efficace en Fluor-18 en Sv.Bq ⁻¹ (CD_{inh})
Adulte	0,92	5,90E-11
Enfant âgé de 10 ans	0,64	1,00E-10
Enfant âgé de 1 à 2 ans	0,22	3,10E-10
Travailleur	0,95	5,90E-11

Rappelons qu'il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de cette voie d'exposition.

¹⁰ Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Ann. ICRP 24 (1-3), 1994.

7.3.3.3 Calcul de la dose d'exposition interne

Le Tableau 15 présente les doses d'exposition par inhalation pour chacun des scénarios.

Tableau 15 : doses d'exposition interne par inhalation

Groupe de référence	Typologie	Cible	Dose totale annuelle d'exposition par inhalation (mSv/an)
Scénario Ecole	Collège le plus exposé	Enfant (élève)	1,6E-05
Scénario travailleur	CHU	Adulte (travailleur)	1,2E-03
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	1,6E-05
		Enfant	1,9E-05
		Bébé	2,0E-05

7.4 EVALUATION DES RISQUES

7.4.1 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.

L'objectif de l'évaluation de l'impact de rejets 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 an). Cet impact ajouté pour le public est comparé à la dose moyenne annuelle en France (4,5 mSv).

7.4.2 Évaluation des risques sanitaires

Le Tableau 16 et la Figure 22 synthétisent les résultats de doses efficaces d'exposition pour les différents scénarios d'exposition retenus.

Le Figure 23 présente les doses efficaces d'exposition pour chacun des scénarios.

Tableau 16 : doses efficace totale (mSv/an)

Groupe de référence	Typologie	Cible	Dose externe totale par irradiation (mSv/an)	Dose d'exposition par inhalation (mSv/an)	Dose totale annuelle (mSv/an)	Dose efficace admissible en France (mSv/an)	Dose efficace moyenne annuelle en France (mSv/an)
Scénario Ecole	Collège le plus exposé	Enfant (élève)	1,8E-04	1,6E-05	1,9E-04		
Scénario travailleur	CHU	Adulte (travailleur)	2,0E-02	1,2E-03	2,1E-02		
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	1,9E-04	1,6E-05	2,1E-04	1	4,5*
		Enfant	2,1E-04	1,9E-05	2,3E-04		
		Bébé	4,0E-04	2,0E-05	4,3E-04		

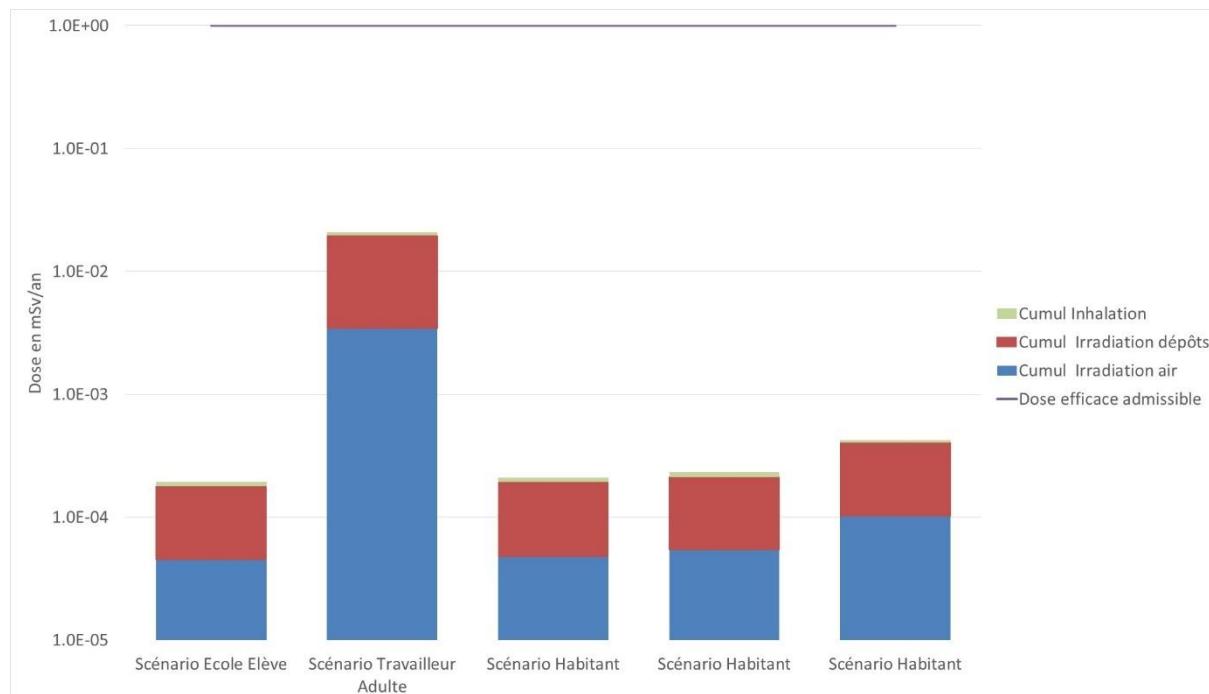
*2,9 mSv d'origine naturelle et 1,6 mSv d'origine artificielle

La Figure 22 représente la synthèse des doses efficaces totales en regard de la dose efficace admissible de 1 mSv/an.

L'impact sanitaire est essentiellement dû à l'exposition externe par irradiation (lors du passage du panache et à l'irradiation par les dépôts). En effet, la dose externe représente entre 92 et 95 % de contribution de la dose efficace totale.

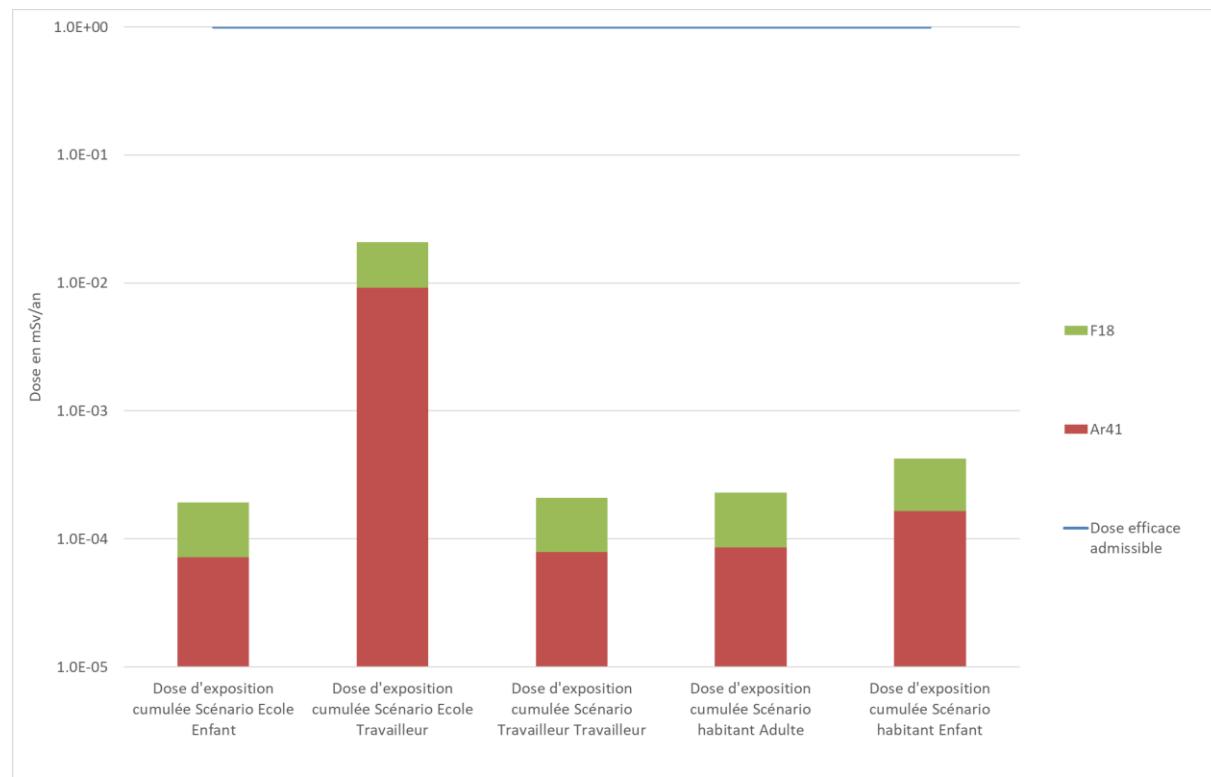
Quel que soit le scénario étudié et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions en radioéléments émis par l'installation est faible vis-à-vis de la dose admissible en France. En effet, la dose efficace totale maximale représente 2,1 % de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée, pour le scénario Travailleur.

Figure 22 : synthèse des doses efficaces totales



Comme le montre la Figure 23, la dose efficace totale annuelle est principalement associée à l'Argon-41.

Figure 23 : synthèse des doses efficaces totales par radioélément



8. 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.

8.1 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 :

$$\boxed{\text{Incertitudes totales}} = \boxed{\text{Incertitudes dues au modèle}} + \boxed{\text{Incertitudes due aux données}} + \boxed{\text{Variabilité}}$$

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 :

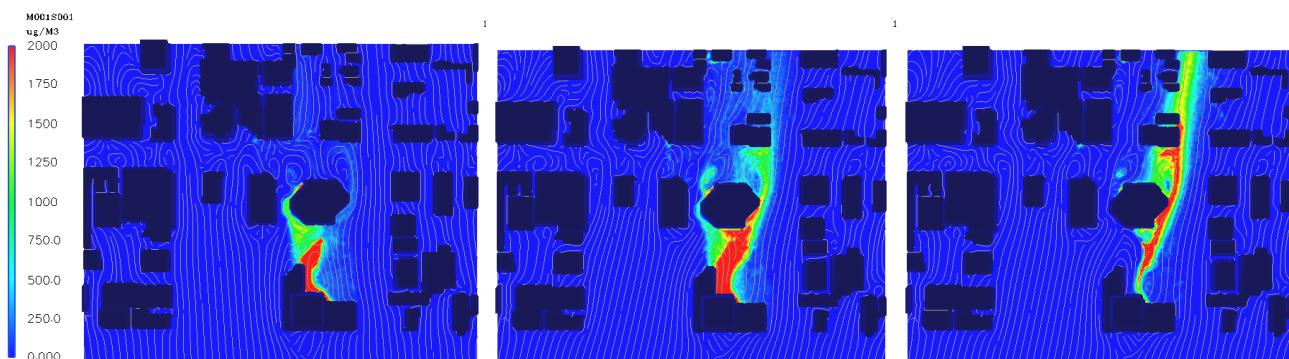
- La variabilité des résultats due aux fluctuations naturelles de la concentration dans l'atmosphère (turbulence aléatoire). Ce type d'incertitude sera présent dans n'importe quel modèle prenant en compte des phénomènes météorologiques ;
- Les erreurs sur les données d'entrées : émissions, données sur 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.

8.1.1 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 24 : 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.

8.1.2 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.

8.1.2.1 Incertitudes liées aux émissions

La concentration calculée par le modèle à une échéance donnée est directement proportionnelle aux flux émis par l'installation pour chaque polluant. Les approximations faites au niveau des émissions ont donc un impact direct sur les concentrations et dépôts calculés.

8.1.2.2 Incertitudes liées aux mesures météorologiques

Les données météorologiques retenues pour la simulation de dispersion proviennent des simulations météorologiques mondiales de meteomatics¹¹. Elles correspondent à une extraction des données au niveau du site.

Compte-tenu de la présence d'obstacles importants à proximité du point de rejet, une reconstitution tridimensionnelle de l'écoulement du vent a été réalisée afin de bien prendre en compte l'influence des obstacles sur la dispersion du panache.

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 issues de l'extraction sont des données surface. La modélisation 3D extrapole la donnée verticalement en utilisant un modèle mathématique théorique.

¹¹ www.meteomatics.com

8.1.2.3 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 de l'utilisateur des paramètres du modèle, (options de calculs, génération du maillage, etc) 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.

8.1.3 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.

8.2 INCERTITUDES RELATIVES À L'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES

8.2.1 Facteurs de surestimation des risques

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

Durée d'exposition

Elle dépend du scénario étudié :

- Pour les travailleurs, elle a été prise égale à 2 000 h/an sur le lieu de travail (soit 200 j/an, 10 h/j) et le reste du temps dans l'habitation la plus exposée (6 760 h/an) ;
- Pour les élèves allant au collège, elle a été prise égale à 1 620 h/an au lycée (soit 36 s/an, 5 j/semaine et 9 h/j) et le reste du temps dans l'habitation la plus exposée (7 140 h/an) ;
- 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, 7j/7, 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.

8.2.2 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).

9. CONCLUSION

Dans le cadre de l'étude d'impact du cyclotron situé à Fort-de-France, le CHU Martinique a consulté SUEZ Aria Technologies pour mettre à jour l'étude d'impact radiologique liée aux radionucléides rejetés par le site en fonctionnement normal.

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 Fluor-18 et de l'Argon-41 sur les travailleurs et riverains présents autour du site.

Compte-tenu des propriétés du fluor 18 et de l'Argon-41, les voies d'exposition retenues sont :

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

Compte tenu des enjeux autour du site, plusieurs scénarios d'exposition ont été étudiés :

Tableau 17 : rappel des scénarios d'exposition retenus

SCENARIO	Écolier	Travailleur	Habitant majorant
Typologie	Établissement scolaire le plus exposé & Habitation la plus exposée	Lieu de travail le plus exposé & Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée
Individu	Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	Adulte (17 ans et plus)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans) Bébé (enfant de 1 à 2 ans)
Durée d'exposition	1 260 h/an (7 h/j, 5 j/7, 36 semaines/an) au niveau de l'établissement scolaire le plus exposé : point d'intérêt n°2 – Collège Cassien Sainte-Claire Le reste du temps au niveau de l'habitation la plus exposée : point d'intérêt n°4 – Habitation à l'ouest	2 000 h/an (10 h/j, 5 j/7, 40 semaines/an) au niveau du lieu de travail le plus exposé du domaine : point d'impact maximal situé en façade du CHU Le reste du temps au niveau de l'habitation la plus exposée : point d'intérêt n°4 – Habitation à l'ouest	8 760 h/an (toute l'année) au niveau de l'habitation la plus exposée : point d'intérêt n°4 – Habitation à l'ouest

SCENARIO	Écolier	Travailleur	Habitant majorant
Typologie	Établissement scolaire le plus exposé & Habitation la plus exposée	Lieu de travail le plus exposé & Habitation la plus exposée	Habitation la plus exposée
Individu	Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	Adulte (17 ans et plus)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans) Bébé (enfant de 1 à 2 ans)
Voies d'exposition	Irradiation (panache et dépôts) & Inhalation	Irradiation (panache et dépôts) & Inhalation	Irradiation (panache et dépôts) & Inhalation

Le Tableau 18 rappelle les doses efficaces totales calculées et la contribution du site pour chacun des scénarios.

Tableau 18 : rappel des doses efficaces totales calculées

Groupe de référence	Typologie	Cible	Dose externe totale par irradiation (mSv/an)	Dose d'exposition par inhalation (mSv/an)	Dose totale annuelle (mSv/an)	Dose efficace admissible en France (mSv/an)	Dose efficace moyenne annuelle en France (mSv/an)
Scénario Ecole	Collège le plus exposé	Enfant (élève)	1,8E-04	1,6E-05	1,9E-04		
Scénario travailleur	CHU	Adulte (travailleur)	2,0E-02	1,2E-03	2,1E-02		
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	1,9E-04	1,6E-05	2,1E-04	1	4,5*
		Enfant	2,1E-04	1,9E-05	2,3E-04		
		Bébé	4,0E-04	2,0E-05	4,3E-04		

L'impact sanitaire est essentiellement dû à l'exposition externe par irradiation (lors du passage du panache et à l'irradiation par les dépôts). En effet, la dose externe représente en moyenne 92 à 95 % de la dose efficace totale.

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 en radioéléments émis par l'installation est très faible vis-à-vis de la dose admissible en France. En effet, la dose efficace totale maximale représente 2,1 % de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée, pour le scénario Travailleur Majorant.

En conclusion, quels que soient le scénario et le profil étudié (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions de radionucléides des rejets du CHU en fonctionnement normal est faible vis-à-vis de la dose admissible en France.

ANNEXES

Annexe 1 : Description du logiciel MSS

Descriptif du modèle Micro SWIFT

1. Le domaine

Le domaine horizontal est un rectangle (L_x , L_y) dans le système de projection plane choisi (ex.: Lambert, UTM). Les dimensions L_x et L_y 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 $Z_{Gij} = ZG(X_i, Y_j)$, 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 (K_z).

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 ABBRUZZO (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)

Description 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 :

$$\sigma_{u'_x}, \sigma_{u'_y}, \sigma_{u'_z}, \overline{u'^3_z}$$

$$\overline{u'_x u'_y}, \overline{u'_x u'_z}, \overline{u'_y u'_z}$$

$$T_{L_{u'_x}}, T_{L_{u'_y}}, T_{L_{u'_z}}$$

dans le cas des schémas de Thomson 1984 ou bien :

$$\sigma_{u'_x}, \sigma_{u'_y}, \sigma_{u'_z}, \overline{u'^3_z}$$

$$T_{L_{u'_x}}, T_{L_{u'_y}}, T_{L_{u'_z}}$$

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 coordonnée 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_o , 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 dépeuplement 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 $100 \times 80 \text{ km}^2$. 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 $20 \times 23 \text{ km}^2$. 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 Dicember 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.