

Cyclotron Réunion Océan Indien (CYROI)

Etude d'impact environnemental Fonctionnement normal



Références : Rapport ARIA/2023.117

Documents associés : -

Type de document : Rapport d'études

Avancement du document : Version 1

Accessibilité : Restreinte

ARIA Technologies	Titre : Etude d'impact environnemental						
N° rapport ARIA	2023.117						
N° action ARIA	23.214						
Nombre de pages	73	Nombre de figures	30	Nombre de tableaux	33	Nombre d'annexes	2
Auteur(s)	ARIA Technologies, Tamara FOURCOUAL Ingénieure d'études en qualité de l'air						
Sous-traitants	-						
Intérêt documentaire	Accessibilité		Confidentielle		Libre		
Oui		Non	ARIA Technologies		Restreinte		
Etat du document	Rédacteur Nom/Date			Relecteur Nom/Date			
Version V1	Tamara FOURCOUAL Le 18/12/2023			Anne-Sophie SAFFRE Le 22/12/2023			
DIFFUSION	Date	DESTINATAIRES				Nombre	
Diffusion informatique	22/12/2023	Cyclotron Réunion Océan Indien (CYROI)				1	

SOMMAIRE

1. CADRE DE L'ETUDE.....	6
2. INVENTAIRE DES EMISSIONS	7
2.1 Composés étudiés	7
2.2 Concentrations et flux à l'émission	7
3. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION	8
3.1 Populations	8
3.2 Etablissements Recevant du Public (ERP)	11
3.3 Usages autour du site.....	13
3.3.1 Occupation du sol	13
3.3.2 Usages agricoles	14
3.3.3 Recensement des points d'eau.....	15
4. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE	16
4.1 Données d'entrée	16
4.1.1 Domaine d'étude	16
4.1.2 Topographie.....	17
4.1.3 Météorologie	18
4.2 Détermination des concentrations dans l'air et des dépôts au sol.....	23
4.2.1 Présentation du logiciel de dispersion et paramétrages du modèle.....	23
4.2.2 Présentation des résultats.....	25
4.2.3 Concentrations en moyenne annuelle	27
4.2.4 Dépôts au sol	34
5. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE.....	41
5.1 Identification des dangers	41
5.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations.....	41
5.1.2 Relation Dose-Réponse.....	42
5.2 Schéma conceptuel d'exposition	42
5.2.1 Voies d'exposition	42
5.2.2 Schéma conceptuel d'exposition.....	43
5.3 Estimation des doses d'exposition	43
5.3.1 Scénario d'exposition	44
5.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation).....	45
5.3.3 Exposition par inhalation.....	48
5.4 Caractérisation des risques.....	49
5.4.1 Méthodologie	49
5.4.2 Evaluation des risques sanitaires.....	49
5.5 Incertitudes	53
5.5.1 Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique.....	53
5.5.2 Incertitudes relatives à l'évaluation des expositions	55
5.5.3 Validation de la non prise en compte de la voie par ingestion	55
6. CONCLUSION.....	59
ANNEXES	61
Annexe 1 : Description du modèle ARIA Impact	62
Annexe 2 : Méthodologie de calcul des doses par ingestion.....	68

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des sources et émissions	7
Tableau 2 : évolution de la population par commune (INSEE 2022 sur la base des données 2020)	8
Tableau 3 : population par commune (INSEE 2022 sur la base des données 2020)	8
Tableau 4 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent.....	19
Tableau 5 : statistiques relatives à la pluviométrie.....	21
Tableau 6 : paramètres de calcul des dépôts pour chacune des espèces étudiées.....	25
Tableau 7 : concentrations en moyenne annuelle au point le plus exposé et aux points cibles	28
Tableau 8 : dépôts totaux moyens au sol annuels	35
Tableau 9 : scénarios d'exposition retenus	44
Tableau 10 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe par irradiation	46
Tableau 11 : dose d'exposition par irradiation (mSv/an)	47
Tableau 14 : volumes d'air inhalés	48
Tableau 15 : coefficient de dose efficace en Sv.Bq ⁻¹ (CD _{inh}).....	48
Tableau 16 : dose d'exposition par inhalation (mSv/an).....	49
Tableau 19 : doses efficaces totales (mSv/an)	50
Tableau 22 : scénario d'exposition par ingestion.....	56
Tableau 23 : paramètres relatifs aux différentes catégories d'âge (données INERIS)	56
Tableau 24 : fraction d'aliments auto-produits (données INERIS).....	57
Tableau 25 : facteurs de dose par ingestion (en Sv/Bq).....	57
Tableau 26 : dose d'exposition par ingestion (en mSv/an)	57
Tableau 27 : dose d'exposition par voie d'exposition (en mSv/an).....	58
Tableau 16 : rappel des scénarios d'exposition retenus	59
Tableau 28 : facteurs relatifs aux végétaux.....	70
Tableau 29 : facteurs de translocation.....	70
Tableau 30 : facteur de transfert racinaire en kgsol .kgfrais ⁻¹	71
Tableau 31 : Rations alimentaires journalières des animaux et ingestion de sol par inadvertance en kg.j ⁻¹	72
Tableau 32 : durée de consommation et de stockage des végétaux	72
Tableau 33 : facteur de transfert au produit animal en Bq.kgfrais ⁻¹ par Bqingéré.j ⁻¹	72

FIGURES

Figure 1 : localisation de la cheminée sur le site.....	7
Figure 2 : densité de la population sur la zone d'étude par maille de 200 mètres par 200 mètres (source : INSEE 2016)	9
Figure 3 : localisation des habitations les plus proches	10
Figure 4 : localisation des populations vulnérables et des équipements sportifs les plus proches.....	12
Figure 5 : occupation du sol (données CORINE Land Cover).....	13
Figure 6 : occupation agricole du sol (données RPG 2018).....	14
Figure 7 : bassins versants des deux cours d'eau principaux du secteur.....	15
Figure 8 : ouvrages souterrains exploités pour l'AEP	15
Figure 9 : carte du domaine d'étude	16
Figure 10 : topographie du domaine d'étude	17
Figure 11 : rose des vents générale par classes de vitesses – Station Saint Denis/Gillot	19
Figure 12 : répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique.....	20
Figure 13 : variation de la température sur l'année (période du 01/01/2018 au 31/12/2020)	21
Figure 14 : variation de la pluviométrie sur l'année (période du 01/01/2018 au 31/12/2020)	22
Figure 15 : rose des vents calculée à partir des échéances de pluie.....	22
Figure 16 : rose des vents calculée à partir des échéances sans pluie.....	22

Figure 17 : localisation des points cibles	26
Figure 18 : carte de concentration en moyenne annuelle en fluor 18 en Bq/m ³	29
Figure 19 : carte de concentration en moyenne annuelle en gallium 68 en Bq/m ³	30
Figure 20 : carte de concentration en moyenne annuelle en technétium 99 en Bq/m ³	31
Figure 21 : carte de concentration en moyenne annuelle en lutécium 177 en Bq/m ³	32
Figure 22 : carte de concentration en moyenne annuelle en zirconium 89 en Bq/m ³	33
Figure 23 : carte de dépôts en fluor 18 en Bq/m ² au bout d'un an	36
Figure 24 : carte de dépôts en gallium 68 en Bq/m ² au bout d'un an	37
Figure 25 : carte de dépôts en technétium 99m en Bq/m ² au bout d'un an	38
Figure 26 : carte de dépôts en lutécium 177 en Bq/m ² au bout d'un an	39
Figure 27 : carte de dépôts en zirconium 89 en Bq/m ² au bout d'un an	40
Figure 28 : dose efficace totale par radioélément (mSv/an).....	51
Figure 29 : répartition de la dose par type d'exposition (mSv/an)	51
Figure 30 : répartition de la dose par type d'exposition et par radioélément.....	52

1. CADRE DE L'ETUDE

Dans le cadre du renouvellement de son autorisation, le CYROI a demandé à ARIA Technologies de réaliser une étude de dispersion afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques en radioéléments sur les riverains présents autour du site, en fonctionnement normal.

Le présent rapport présente l'évaluation des risques sanitaires liés aux rejets en radioéléments dans l'atmosphère en fonctionnement normal du site :

- *en adaptant la méthodologie « Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires – Démarche intégrée pour la gestion des émissions des substances chimiques par les installations classées » publié par l'INERIS en septembre 2021 (2^{ème} édition) en application de la circulaire DGPR & DGS du 9 août 2013 ;*
- *sur la base des données disponibles dans l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultants de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.*

La démarche intégrée se déroule en quatre étapes :

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

2. INVENTAIRE DES EMISSIONS

2.1 COMPOSES ETUDIES

Les cinq composés suivants sont étudiés dans le cadre de ce rapport :

- Le fluor 18,
- le gallium 68,
- le technétium 99m,
- le lutétium 177,
- le zirconium 89.

2.2 CONCENTRATIONS ET FLUX A L'EMISSION

Les émissions à l'atmosphère se font par une cheminée. Les informations relatives aux sources et au flux d'émissions ont été transmises par CYROI. La Figure 1 présente la position de la cheminée sur le site.

Figure 1 : localisation de la cheminée sur le site



Le Tableau 1 présente les caractéristiques de la cheminée et les émissions associées.

Tableau 1 : Caractéristiques des sources et émissions

	Cheminée
Hauteur par rapport au sol (m)	15
Diamètre interne en sortie de cheminée (m)	1,05
Température des gaz (°C)	24,5
Débit sur gaz sec (Nm³/h)	18 030
Vitesse des gaz (m/s)	4,8
Nombre d'heures de fonctionnement (h/an)	2 310
Périodes de fonctionnement	De 3h à 14h du lundi au vendredi 42 semaines de production/an et 10 semaines OFF/an
Emissions en Fluor 18 (GBq/an)	135
Emissions en Gallium 68 (GBq/an)	0,5
Emissions en Technétium 99m (GBq/an)	12
Emissions en Lutétium 177 (GBq/an)	2
Emissions en Zirconium 89 (GBq/an)	0,5

3. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION

Le site se trouve sur la commune de Saint Denis de la Réunion dans le Parc Technologique du Nord de la Réunion Technor qui regroupe différents centres de recherche, une école d'ingénieurs, des entreprises innovantes.

3.1 POPULATIONS

Deux communes se trouvent sur le domaine d'étude : Saint Denis et Sainte Marie.

Les données de population proviennent des données INSEE géolocalisées sur des carreaux de 200 mètres par 200 mètres (année 2016, la plus récente disponible au moment de la rédaction du document).

Le Tableau 2 présente l'évolution de la population par commune et le Tableau 3 présente les données de population par catégorie d'âge par commune. La Figure 2 présente la densité de population dans la zone d'étude.

Tableau 2 : évolution de la population par commune (INSEE 2022 sur la base des données 2020¹)

Libellé géographique	Population en 1990	Population en 1999	Population en 2010	Population en 2017	Population en 2020
Saint-Denis	121 999	131 557	145 022	147 931	153 001
Sainte-Marie	20 158	26 582	29 951	33 839	34 350

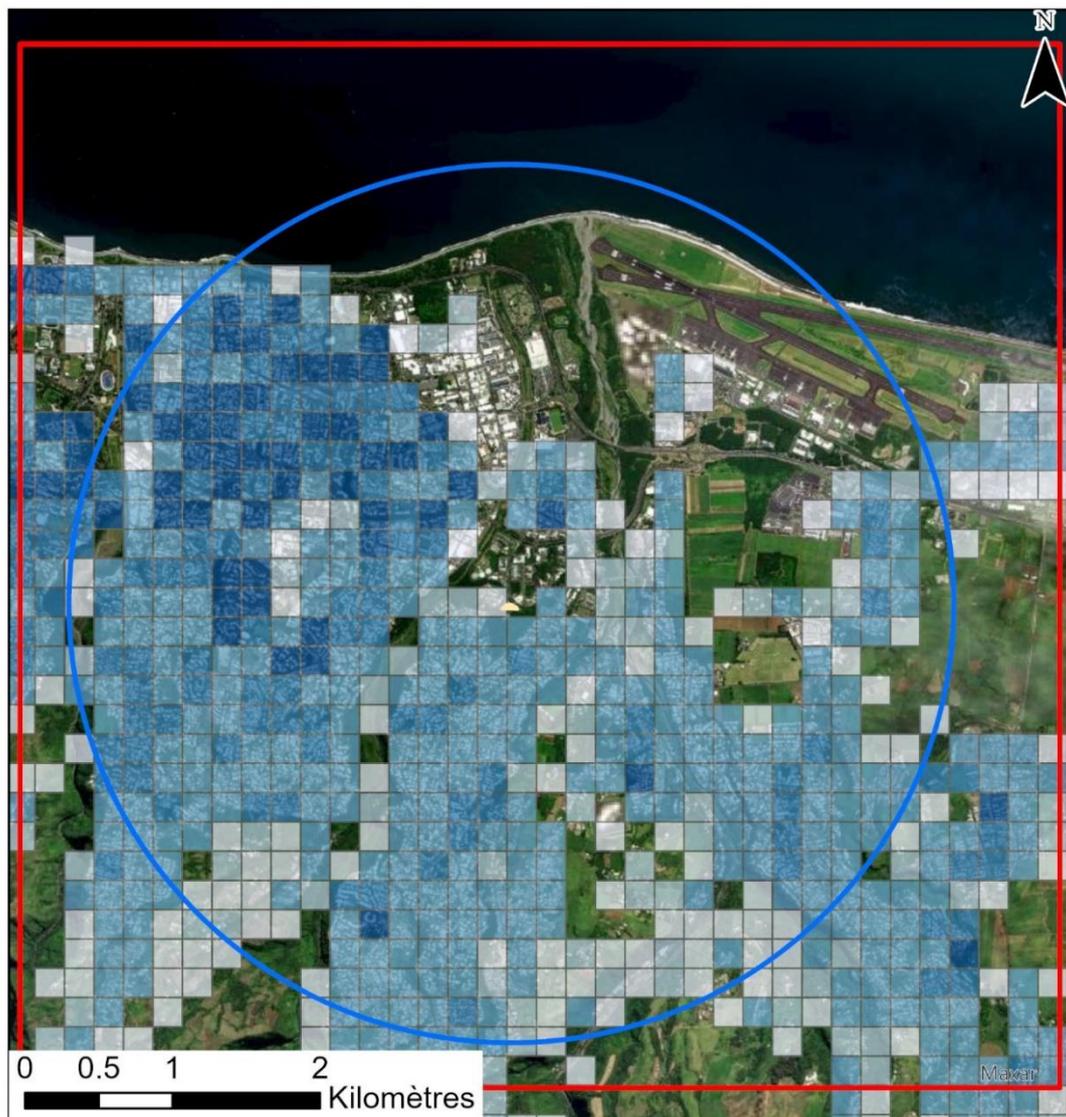
Tableau 3 : population par commune (INSEE 2022 sur la base des données 2020²)

Commune	Pop. 2020	Pop 0-14 ans	Pop 15-29 ans	Pop 30-44 ans	Pop 45-59 ans	Pop 60-74 ans	Pop 75-89 ans	Pop 90 ans ou plus
Saint-Denis	153 001	32 392	32 707	27 935	30 911	20 594	7 606	856
Sainte-Marie	34 350	7 785	6 769	6 840	7 407	4 215	1 235	99

¹ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6011075>, Populations légales 2019 Recensement de la population Régions, départements, arrondissements, cantons et communes, paru le 12/01/2022

² <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6456153?sommaire=6456166>, Évolution et structure de la population en 2019, paru le 27/06/2022

Figure 2 : densité de la population sur la zone d'étude par maille de 200 mètres par 200 mètres
(source : INSEE 2016)



Légende

- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI

**Densité de population
(hab/km²)**

- < 500
- 500 - 1 000
- 1 000 - 5 000
- 5 000 - 10 000
- > 10 000



Les habitations les plus proches se trouvent à environ 200 m au sud-est du site.

Figure 3 : localisation des habitations les plus proches



Légende

-  CYROI
-  Habitations



3.2 ETABLISSEMENTS RECEVANT DU PUBLIC (ERP)

Les Etablissements Recevant du Public (ERP) représentent « tous bâtiments ou locaux dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque, ou dans lesquels sont tenues des réunions ouvertes à tout venant ou sur invitation, payantes ou non. Sont considérées comme faisant partie du public toutes les personnes admises dans l'établissement à quelque titre que ce soit en plus du personnel ».

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.

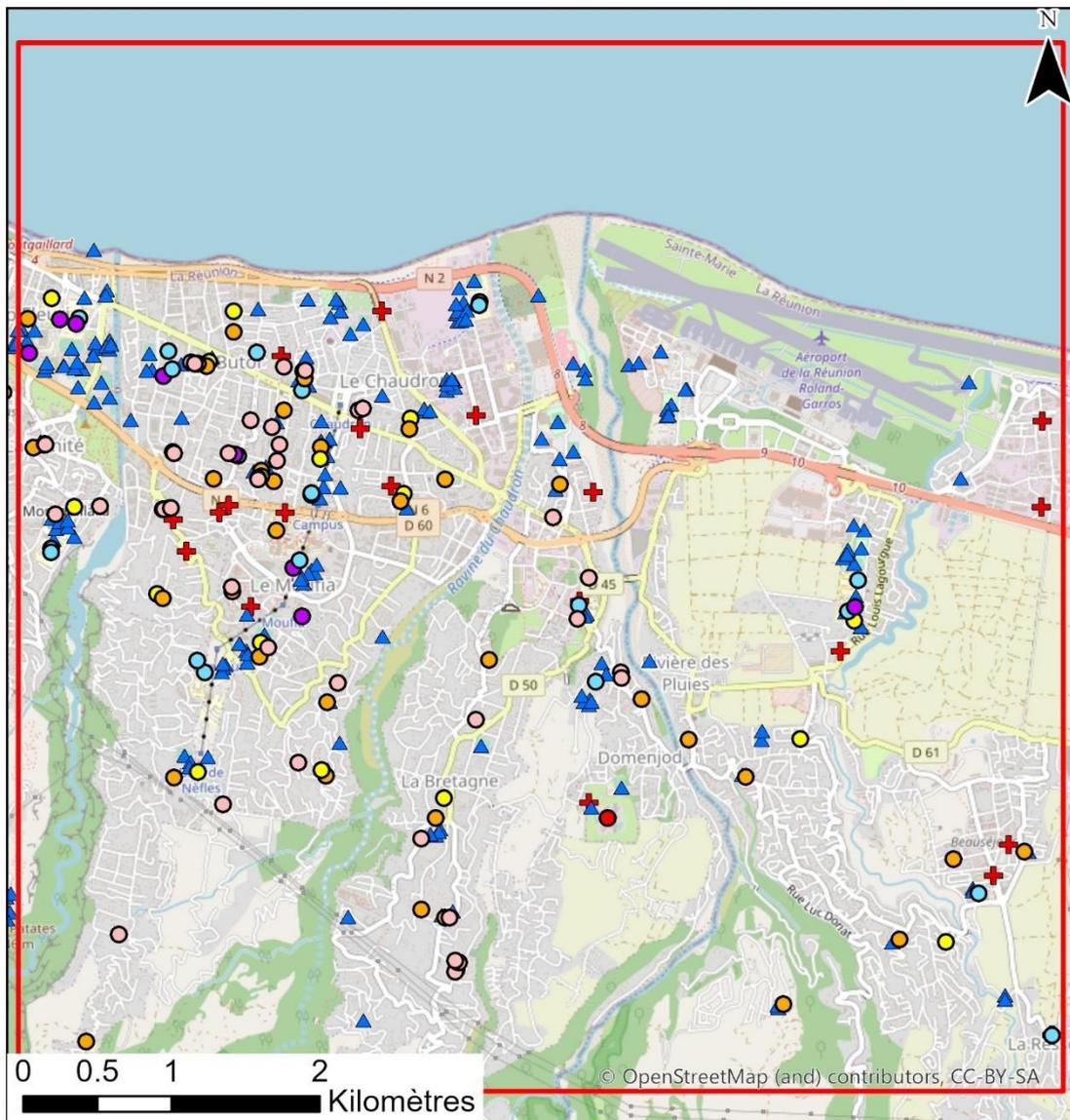
La Figure 10 localise ces établissements sensibles ainsi que les équipements sportifs extérieurs.

La crèche la plus proche se trouve à environ 400 mètres à l'est du site. Elle accueille 60 enfants.

L'école la plus proche se trouve à environ 350 mètres au sud-ouest du site : l'école primaire publique de Grand Canal qui accueille 315 élèves.

Le collège le plus proche se trouve à environ 500 mètres à l'est du site : le collège Emile Hugot qui accueille 470 élèves.

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



Légende

- | | |
|---|---|
|  Domaine d'étude |  Crèches |
|  CYROI | Etablissements scolaires |
|  Etablissements
sanitaires et sociaux |  Ecoles maternelles |
|  Equipements sportifs
extérieurs |  Ecoles élémentaires |
|  Prisons |  Collèges |
| |  Lycées |

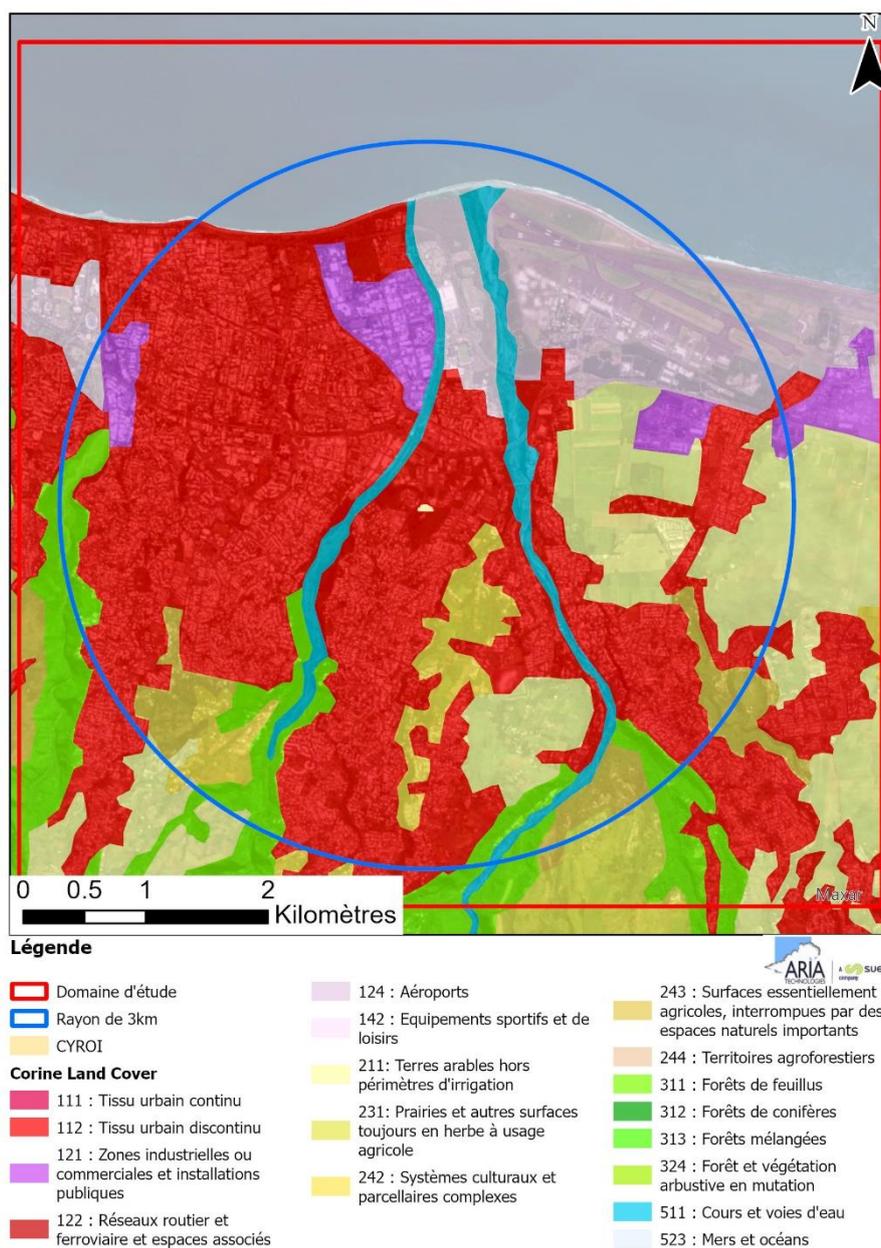


3.3 USAGES AUTOUR DU SITE

3.3.1 Occupation du sol

Le CYROI est situé au niveau du parc technologique, entourée de quelques zones de cultures et de prairies dans un rayon de 3 km autour du site. Ces principales zones sont localisées sur la Figure 5 (données issues de la base CORINE Land Cover 2018³).

Figure 5 : occupation du sol (données CORINE Land Cover)

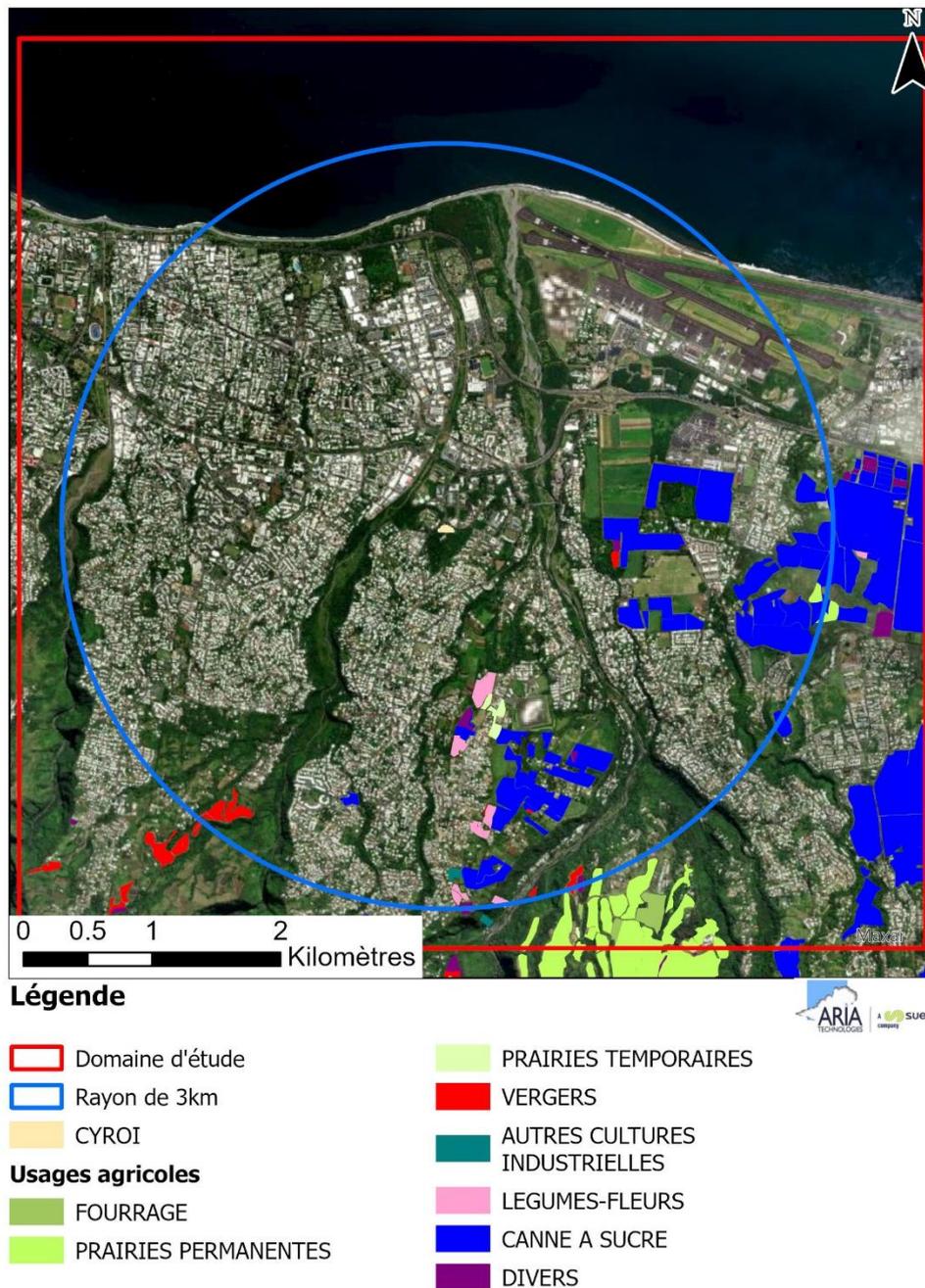


³ base de données géographique d'occupation des sols CORINE Land Cover, dite CLC, produite dans le cadre du programme européen de coordination de l'information sur l'environnement CORINE, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

3.3.2 Usages agricoles

La Figure 6 détaille le type d'utilisation des sols à usage agricole. Il s'agit principalement de cultures de cannes à sucre.

Figure 6 : occupation agricole du sol (données RPG 2018)

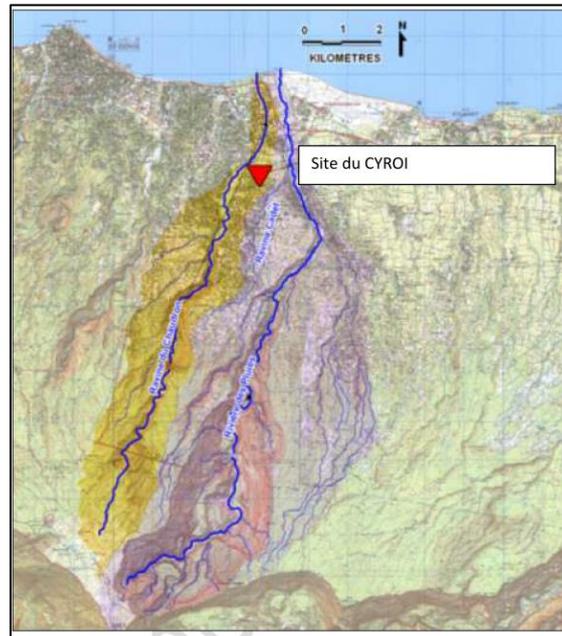


3.3.3 Recensement des points d'eau

Source : Projet d'extension du Cyclotron / Dossier d'information des services de l'ARS et de déclaration au titre des articles L.214-1 et suivants du Code de l'Environnement

Le CYROI est compris entre la masse d'eau FRLR02 appelée « Rivière des Pluies » et la masse d'eau superficielle FRLR01 appelée « Rivière Saint Denis », mais ne fait partie ni de l'une ni de l'autre. Les bassins versants des deux cours d'eau principaux du secteur sont représentés ci-dessous.

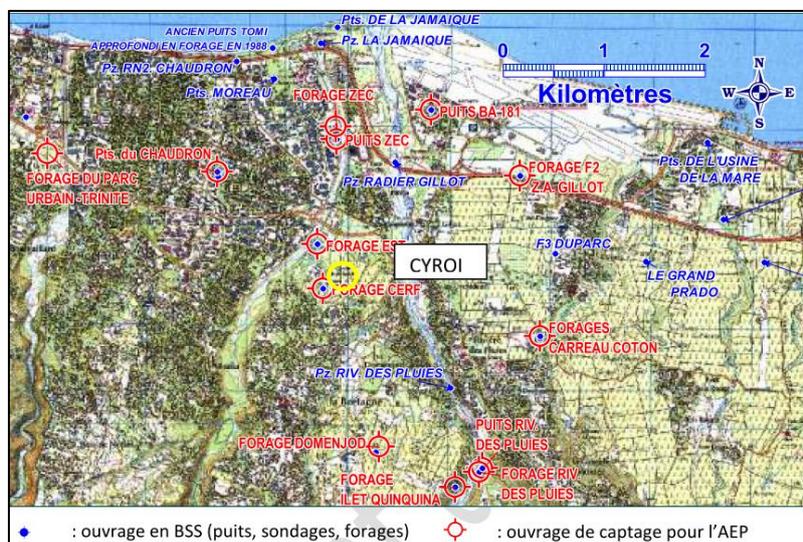
Figure 7 : bassins versants des deux cours d'eau principaux du secteur



Le site est inclus dans le bassin versant de la ravine du Chaudron, ravine non pérenne.

La ressource en eau souterraine de la nappe de Saint-Denis dans ce secteur est utilisée à des fins d'alimentation en eau potable, par la Ville de Saint-Denis. On note aussi l'usage de cette ressource par la commune de Sainte-Marie, en rive droite, au droit du forage Rivière des Pluies. A l'aval, les puits BA181, Forage F2 Gillot ne sont plus utilisés à ce jour, du fait de l'augmentation de la conductivité (contamination saline, F2 Gillot) et de risque de pollution (Puits BA181 rebouché).

Figure 8 : ouvrages souterrains exploités pour l'AEP



4. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Afin d'estimer les concentrations et dépôts dans l'environnement **attribuables aux installations du site**, une étude de dispersion a été réalisée.

4.1 DONNEES D'ENTREE

4.1.1 Domaine d'étude

Le domaine d'étude retenu est un carré de 10 km de côté centré sur le site du CYROI.

Figure 9 : carte du domaine d'étude



Légende

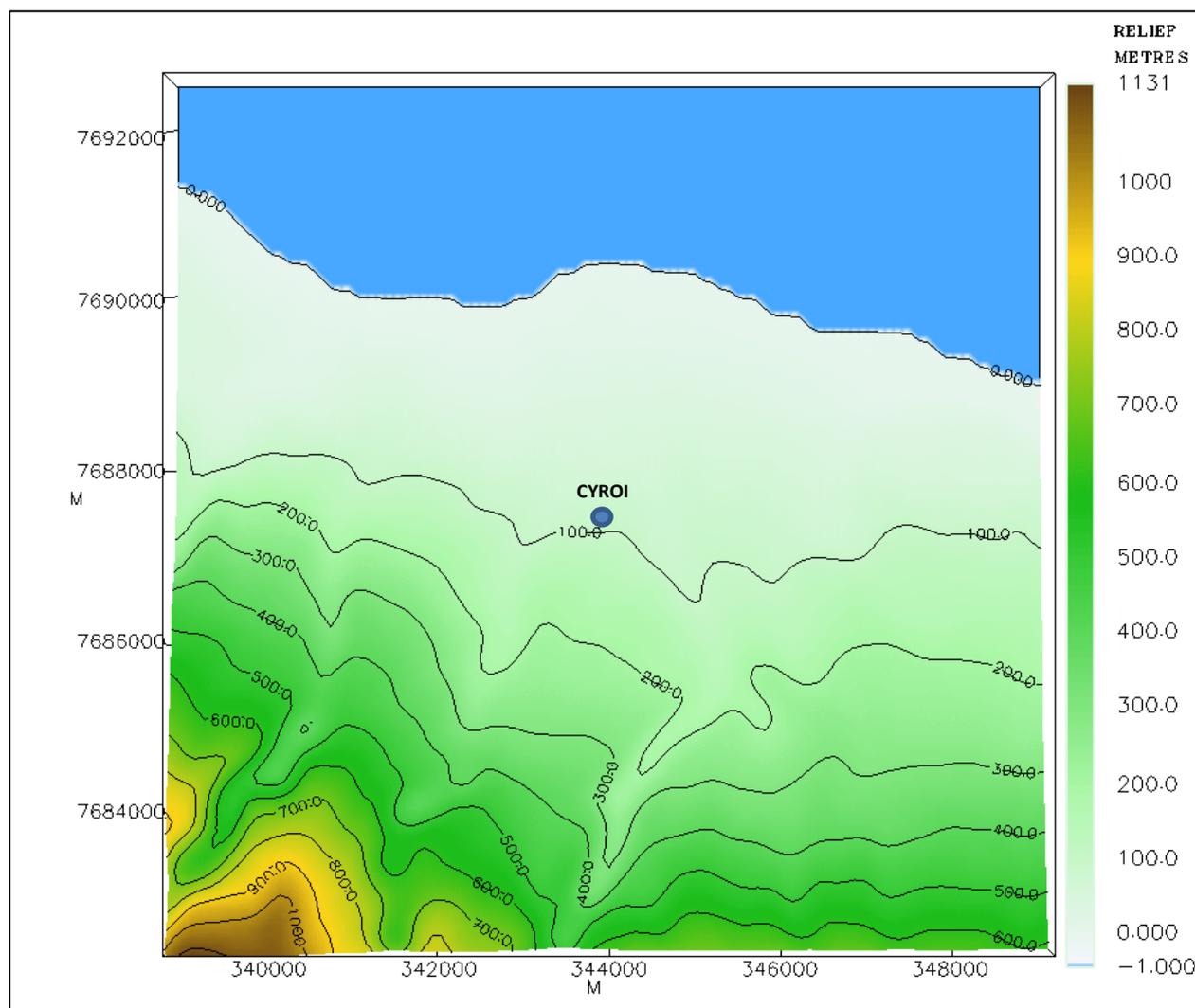
-  Domaine d'étude
-  CYROI



4.1.2 Topographie

La topographie est issue d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 75 mètres. La Figure 10 présente une vue 2D de la topographie sur le domaine d'étude. L'unité est le mètre NGF (Nivellement Général de la France). L'écart entre deux isolignes est de 100 mètres. Le relief du domaine d'étude varie entre -1 mètres à 118 mètres environ. En bleu apparaît l'océan.

Figure 10 : topographie du domaine d'étude



4.1.3 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.

4.1.3.1 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. Les stations « journalières » sont donc éliminées ;
- la pertinence des données météorologiques.

L'observatoire des pratiques de l'évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact de la Direction Générale de la Santé⁴ recommande d'utiliser au minimum trois années de données météorologiques en tri-horaire.

Selon les critères ci-dessus, les données météorologiques retenues pour la simulation de dispersion (vent, température, pluviométrie) proviennent des observations de la station Saint Denis/Gillot située à environ 2,5 km à l'est du site. Les données météorologiques utilisées sont des mesures horaires (1 mesure toutes les heures) sur la période du 01/01/2018 au 31/12/2020.

A noter que ces données météorologiques sont identiques à celles utilisées dans le précédent rapport (cf. rapport ARIA 2021.050_V2).

⁴ http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/etud_impact/sommaire.htm

4 - Etude de la dispersion atmosphérique

4.1.3.2 Analyse météorologique

4.1.3.2.1 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 cumulées d'apparition des vents en fonction de la direction d'où vient le vent.

La Figure 11 présente la rose des vents générale, par classes de vitesses, pour la station météorologique de Saint Denis/Gillot sur la période 01/01/2018 au 31/12/2020.

Figure 11 : rose des vents générale par classes de vitesses – Station Saint Denis/Gillot

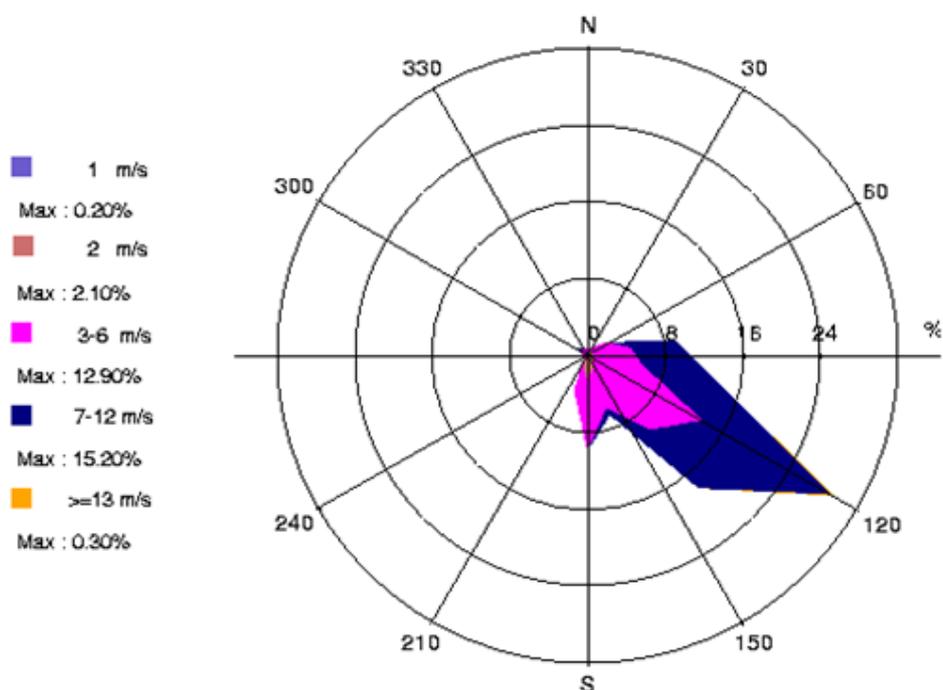


Tableau 4 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent

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 (%)	0.6	1.5	9.8	50.6	36.9	0.6

Sur la période retenue pour cette étude (du 01/01/2018 au 31/12/2020), les principaux résultats de cette analyse sont les suivants :

- la rose des vents générale présente deux directions :
 - une direction très majoritaire de vents de secteur sud-est (73,0 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 80° et 160° Nord) ;
 - une direction secondaire de secteur sud (13,6 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 170° et 200° Nord).
- les vents les plus fréquents (50,6 %) sont les vents de vitesse comprise entre 3 et 6 m/s.
- les vents ont une vitesse moyenne de 20,1 km/h (5,6 m/s).

- les vents forts (de vitesse supérieure à 7 m/s) sont également fréquents (37,5 % des occurrences) et proviennent exclusivement du secteur sud-est.
- les vents faibles (de vitesse inférieure à 2 m/s) sont très peu fréquents puisqu'ils représentent 2,1 % des observations, dont 0,6 % de vents calmes.

4.1.3.2.2 Stabilité atmosphérique

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

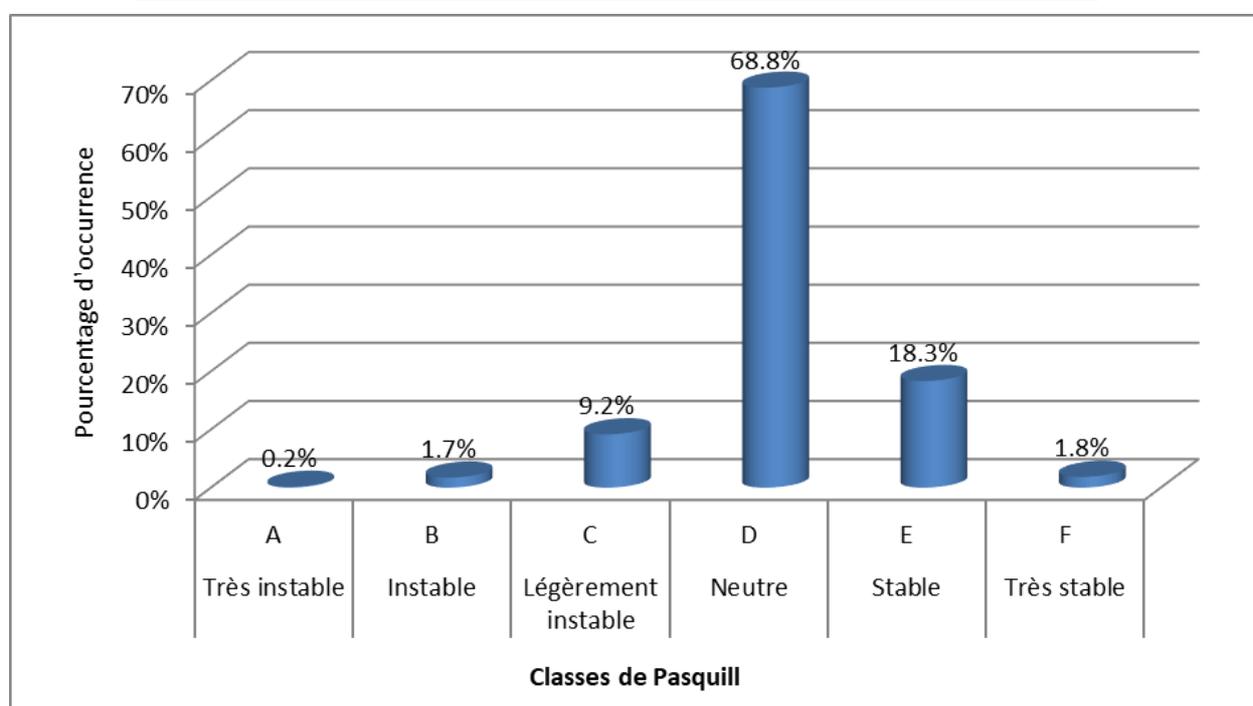
Elle est déterminée à partir des données de nébulosité et de vent qui conduit à distinguer six catégories de stabilité de l'atmosphère :

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

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

Le diagramme de la Figure 12 présente la répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique.

Figure 12 : répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique



La classe D de Pasquill est la plus fréquemment observée (68,8 %) sur le site, ce qui est favorable pour la dispersion atmosphérique. Les classes E et F (peu favorables au niveau de la dispersion) représentent 20,1 % des observations.

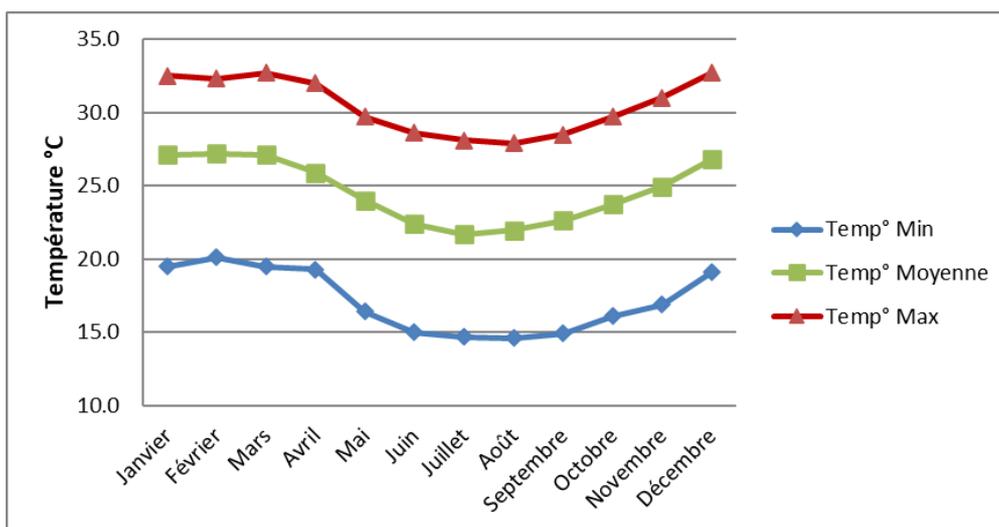
Les vents ont une vitesse moyenne d'environ 3,9 m/s en situation stable - donc pénalisante pour la dispersion des émissions -, tandis qu'en atmosphère neutre, elle est de 6,9 m/s.

4.1.3.3 Température

La température de l'air, autre paramètre intervenant dans le processus de dispersion des polluants, est en moyenne de 24,6°C sur la période 2018-2020.

La Figure 13 présente les variations moyennes mensuelles de la température minimale, moyenne et maximale sur la période du 01/01/2018 au 31/12/2020.

Figure 13 : variation de la température sur l'année (période du 01/01/2018 au 31/12/2020)



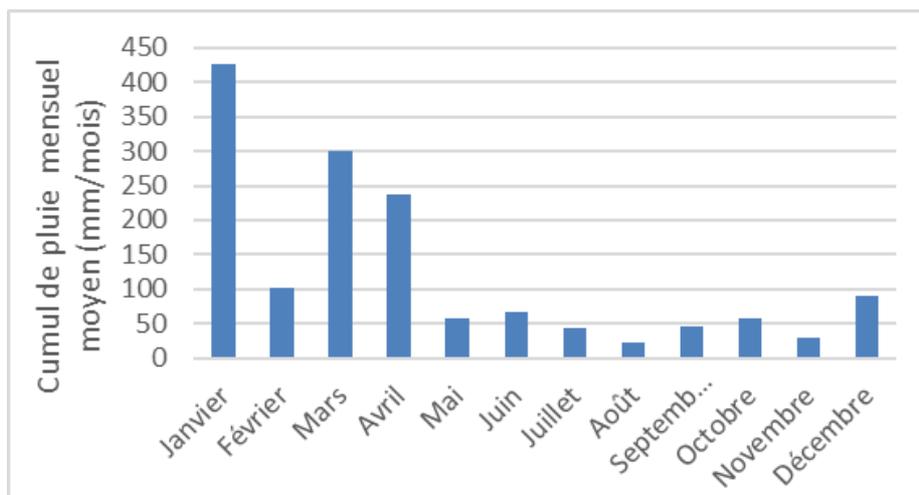
4.1.3.4 Pluviométrie

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenu compte des données de pluviométrie recueillies sur la station Saint Denis/Gillot.

Tableau 5 : statistiques relatives à la pluviométrie

	Pluviométrie annuelle (mm)
2018	2 391
2019	1 143
2020	908
Moyenne	1 481

Figure 14 : variation de la pluviométrie sur l'année (période du 01/01/2018 au 31/12/2020)



Notons qu'en moyenne sur la période étudiée (du 01/01/2018 au 31/12/2020), il est tombé environ 1 481 mm de pluie par an (cf. Figure 14). L'année 2018 a été particulièrement pluvieuse.

La rose des vents générale (cf. Figure 11) tient compte à la fois des journées avec pluie et sans pluie. Pour affiner l'interprétation, on peut séparer les deux types de journées et obtenir les roses des vents correspondantes (Figure 15 et Figure 16).

Sur les trois années considérées (01/01/2018 au 31/12/2020), il apparaît que :

- ❑ *Echéances avec pluie* : il pleut environ 8,2 % du temps (8,2 % des observations correspondent à des échéances avec de la pluie). L'analyse de la Figure 15 permet de constater que, dans ces conditions, les vents proviennent majoritairement de la direction sud-est.
- ❑ *Echéances sans pluie* : le reste du temps (91,8% des observations), les vents présentent les directions privilégiées de la rose des vents générale (cf. Figure 16).

Figure 15 : rose des vents calculée à partir des échéances de pluie

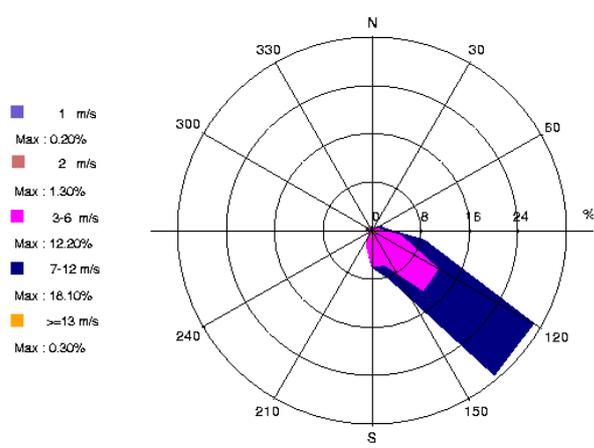
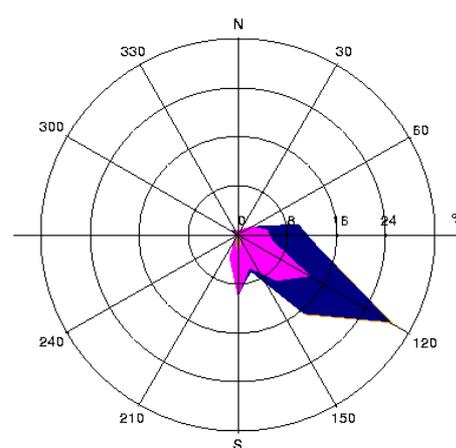


Figure 16 : rose des vents calculée à partir des échéances sans pluie



4.2 DETERMINATION DES CONCENTRATIONS DANS L'AIR ET DES DEPOTS AU SOL

4.2.1 Présentation du logiciel de dispersion et paramétrages du modèle

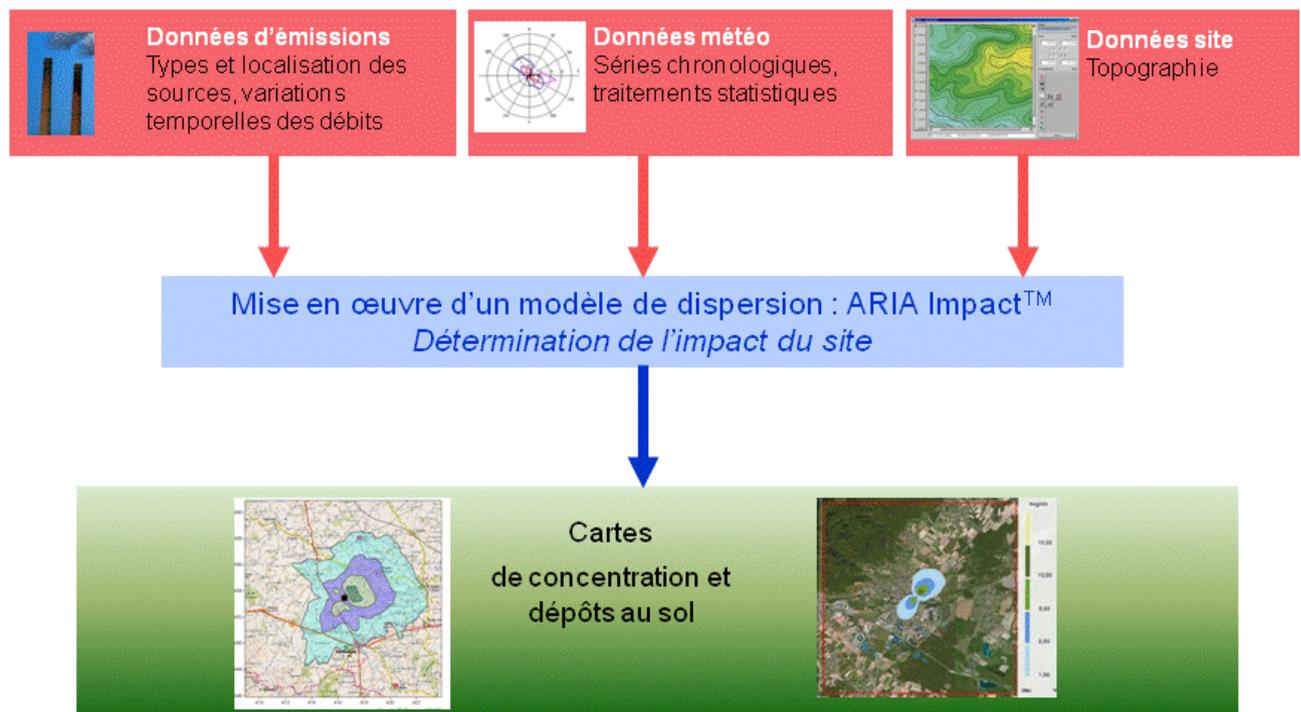
Le modèle utilisé pour cette analyse statistique est le logiciel ARIA Impact, version 1.8. Ce logiciel permet d'élaborer des statistiques météorologiques et de déterminer l'impact des émissions rejetées par une ou plusieurs sources ponctuelles, linéiques ou surfaciques. Il permet de simuler plusieurs années de fonctionnement en utilisant des chroniques météorologiques représentatives du site. En revanche, il ne permet pas de considérer les transformations photochimiques des polluants et de calculer les concentrations de polluant secondaires tel que l'ozone.

Sans être un modèle tridimensionnel, ARIA Impact peut prendre en compte la topographie de manière simplifiée.

Par ailleurs, ARIA Impact est un modèle gaussien qui répond aux prescriptions de l'INERIS pour la modélisation de la dispersion de la pollution atmosphérique des rejets des installations industrielles (cf. Annexe 2 du Guide méthodologique INERIS : « Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires – Démarche intégrée pour la gestion des émissions des substances chimiques par les installations classées » publié par l'INERIS en août 2013).

Une description détaillée du modèle est présentée en Annexe 1.

Le diagramme ci-dessous schématise la méthodologie.



4.2.1.1 Paramétrages du modèle de dispersion

Les hypothèses de calcul suivantes ont été prises en compte :

- une prise en compte de la topographie;
- un modèle de dispersion basé sur les écarts-types de Pasquill ;
- une surélévation du panache due à la vitesse d'éjection et à la température des fumées suivant la formulation de Holland ;
- une prise en compte des vents calmes ;
- le calcul des dépôts au sol liés à la chute gravitaire des particules et au lessivage du panache par la pluie (dépôts humides) ;
- une maille de calcul de 50 mètres ;
- les émissions présentées au paragraphe 2.2.

4.2.1.2 La formule de surhauteur 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, on peut prendre en compte une surhauteur du panache. En effet, les fumées de combustion vont s'élever au-dessus de la cheminée jusqu'à ce que leur vitesse ascensionnelle initiale et les effets de différence de densité (dus à la différence de température air/fumées) ne soient plus significatifs. ARIA Impact permet de prendre en compte la surhauteur d'origine thermique et d'origine dynamique.

Pour le calcul de la surhauteur, ARIA Impact contient les formules données par Briggs, Anfossi, Holland, Cude... Dans cette étude, nous avons retenu la formule de Holland comme lors des études de 2016 et 2021 (formulation la plus conservatrice selon les résultats de 2021).

4.2.1.3 La formule des écarts-type (modèle de dispersion)

La dispersion du polluant autour de sa trajectoire nécessite la connaissance des écarts-type. Les écarts-type sont les paramètres qui pilotent la diffusion du panache.

Dans cette étude, nous avons utilisé les écarts-type de Briggs (formulation conservatrice).

4.2.1.4 Reconstitution des profils verticaux

La surélévation du panache est calculée entre autres à partir de la vitesse du vent et de la température de l'air. Ces valeurs sont fournies dans la base de données météorologiques. Cependant, ces données correspondent à des mesures de station sol, c'est-à-dire qu'elles sont mesurées à environ 10 mètres du sol.

Pourtant, les valeurs de vitesse de vent et de température observées au sommet de la cheminée peuvent varier de manière importante suivant la hauteur de la cheminée : par exemple, plus la cheminée est haute, plus la vitesse du vent est élevée au niveau du débouché.

Afin de prendre en compte cette variation de vitesse de vent dans les calculs de la dispersion des polluants atmosphériques, le logiciel ARIA Impact peut calculer des profils verticaux de vent et de température en fonction des mesures au sol et de la turbulence atmosphérique, afin de connaître la vitesse du vent et la température au niveau du débouché de la cheminée

4.2.1.5 Calcul des dépôts au sol

Concernant les calculs de dépôts au sol, les calculs prennent en compte les dépôts sec et humide sur le sol conduisant à un appauvrissement du panache.

- **Dépôts secs** : les particules très fines et les gaz se déposent sur les surfaces par divers processus biologiques, chimiques et physiques. Le paramètre qui influence les dépôts secs est la vitesse de dépôt, exprimée en m/s. Cette vitesse permet de tenir compte de la capacité du sol à retenir le polluant qui se dépose. Ces vitesses ont fait l'objet de plusieurs recherches et plusieurs références bibliographiques existent sur ces données.
- **Dépôts humides** : les dépôts humides correspondent aux dépôts de polluant au sol entraînés par la pluie. Les calculs de dispersion qui intègrent le lessivage par la pluie prennent en compte un coefficient de lessivage exprimé en s^{-1} , correspondant à la proportion du polluant qui est entraîné par la pluie pendant 1 seconde.

4.2.1.6 Caractéristiques des espèces

Le Tableau 6 résume les valeurs utilisées dans le cadre de cette étude pour le calcul des dépôts.

Tableau 6 : 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	Source
Fluor 18	Particulaire	5.10^{-3}	2.10^{-4}	1 μm	[1]
Gallium 68	Particulaire	5.10^{-3}	1.10^{-4}	1 μm	[1]
Technétium 99m	Particulaire	5.10^{-3}	1.10^{-4}	1 μm	[1]
Lutécium 177	Particulaire	5.10^{-3}	1.10^{-4}	1 μm	[1]
Zirconium 89	Particulaire	5.10^{-3}	1.10^{-4}	1 μm	[1]

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

4.2.2 Présentation des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de :

- concentration en moyenne annuelle exprimées en Bq/m^3 ;
- dépôts au sol pour les espèces particulaires exprimés en $Bq/m^2/s$.

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 cibles présentés sur la Figure 17.

Figure 17 : localisation des points cibles



Légende

-  CYROI
-  Source
-  Points cibles



N°	Dénomination	Distance à la source (m)
1	Université	115
2	Habitation 1 (habitation la plus proche au nord-est du site)	640
3	Habitation 2	660
4	Habitation 3	340
5	Habitation 4 (habitation la plus proche au sud-ouest du site)	300
6	Habitation 5	280
7	Habitation 6	190
8	Habitation 7 (habitation la plus proche au sud-est du site)	400
9	Habitation 8	855
10	Habitation 9	775
11	Ecole primaire de Grand Canal	375
12	Ecole maternelle des Badamiers	1 120
13	Ecole Primaire Primat	885
14	Micro-crèche Technopole	550
15	CIRAD	150
16	Habitation 10	275
17	Collège Emile Hugot	520

4.2.3 Concentrations en moyenne annuelle

Les résultats de concentrations moyennes annuelles fournissent les éléments nécessaires pour évaluer les risques par inhalation.

Le Tableau 7 présente les valeurs calculées en moyenne annuelle exprimée en Bq/m³ pour la configuration retenue au niveau des points cibles présentés précédemment (cf. Figure 17) et au niveau de la zone la plus exposée du domaine d'étude.

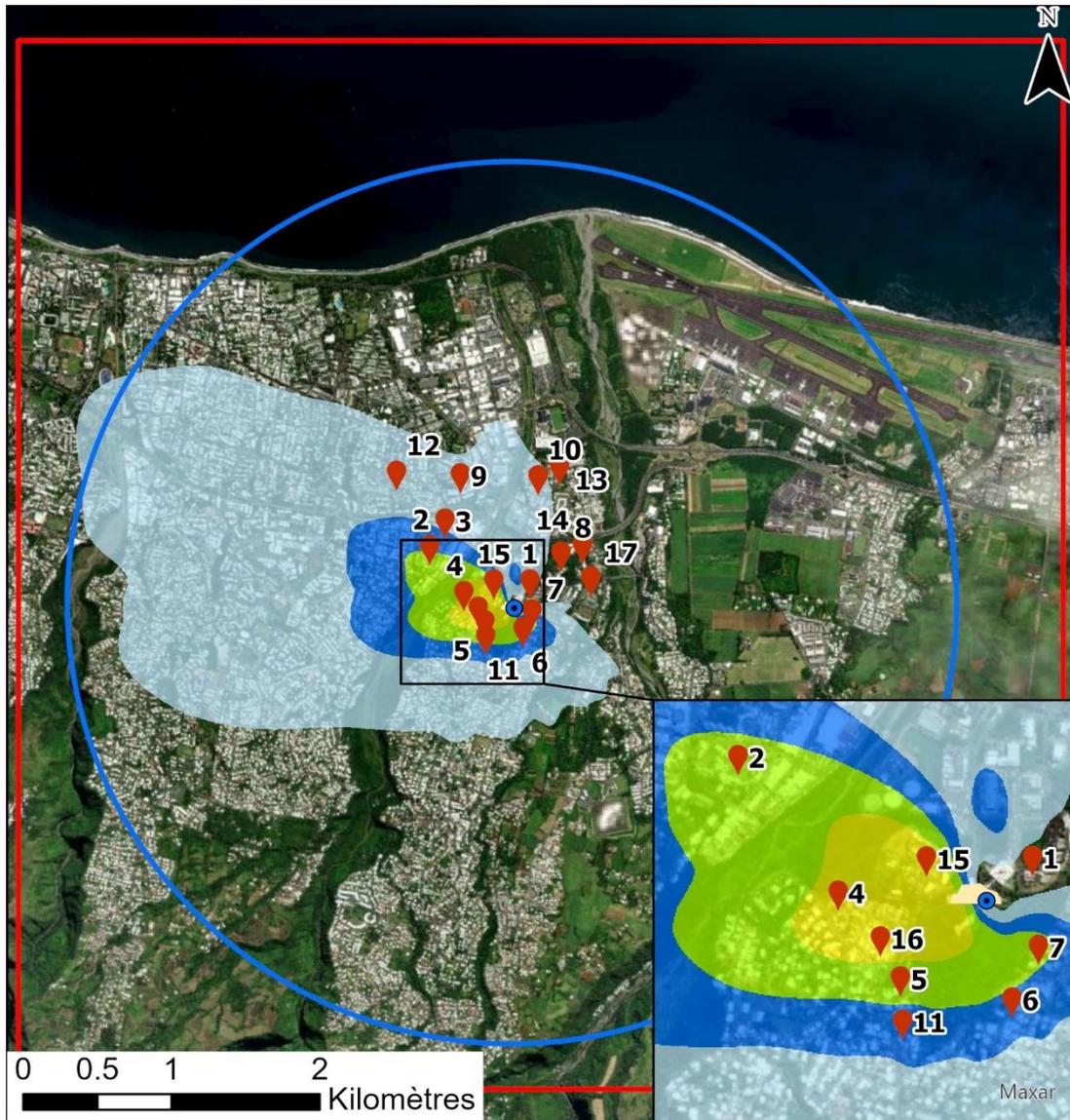
Les Figure 18 à Figure 22 présentent les cartes de concentrations en moyennes annuelles calculées au niveau du sol sur le domaine d'étude pour les 5 substances étudiées.

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 » sur la Figure 18 correspondent à des concentrations en fluor 18 comprises entre 0,001 et 0,005 Bq/m³. Les cartographies montrent que les concentrations les plus élevées sont situées à l'ouest du site, principalement au niveau de la zone industrielle, du CIRAD (point n°15) et des zones d'habitation (points n°4 et 16), et diminuent rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du site.

Tableau 7 : concentrations en moyenne annuelle au point le plus exposé et aux points cibles

N°	Zone	Concentrations en moyenne annuelle (Bq/m ³)				
		Gallium 68	Technétium 99m	Fluor 18	Lutécium 177	Zirconium 89
15	CIRAD	1.1E-04	2.5E-03	2.8E-02	4.2E-04	1.1E-04
17	Collège Emile Hugot	8.9E-07	2.2E-05	2.4E-04	3.8E-06	9.4E-07
14	Micro-crèche Technopole	1.0E-06	2.6E-05	2.7E-04	4.4E-06	1.1E-06
11	Ecole primaire de Grand Canal	2.6E-05	6.5E-04	7.2E-03	1.1E-04	2.7E-05
12	Ecole maternelle des Badamiers	9.5E-06	2.4E-04	2.6E-03	4.0E-05	1.0E-05
13	Ecole primaire Primat	2.5E-06	6.6E-05	6.9E-04	1.1E-05	2.8E-06
1	Université	5.0E-06	1.2E-04	1.4E-03	2.0E-05	5.1E-06
2	Habitation 1	4.6E-05	1.1E-03	1.2E-02	1.9E-04	4.7E-05
3	Habitation 2	2.0E-05	4.9E-04	5.5E-03	8.3E-05	2.1E-05
4	Habitation 3	1.2E-04	2.8E-03	3.2E-02	4.7E-04	1.2E-04
5	Habitation 4	4.9E-05	1.2E-03	1.3E-02	2.0E-04	5.0E-05
6	Habitation 5	2.7E-05	6.6E-04	7.3E-03	1.1E-04	2.8E-05
7	Habitation 6	3.7E-05	9.0E-04	1.0E-02	1.5E-04	3.8E-05
8	Habitation 7	1.7E-06	4.3E-05	4.5E-04	7.2E-06	1.8E-06
9	Habitation 8	5.6E-06	1.4E-04	1.6E-03	2.4E-05	6.1E-06
10	Habitation 9	4.4E-06	1.2E-04	1.2E-03	2.0E-05	4.9E-06
16	Habitation 10	1.0E-04	2.5E-03	2.7E-02	4.1E-04	1.0E-04
Zone la plus exposée		2.0E-04	4.9E-03	5.5E-02	8.2E-04	2.1E-04

Figure 18 : carte de concentration en moyenne annuelle en fluor 18 en Bq/m³



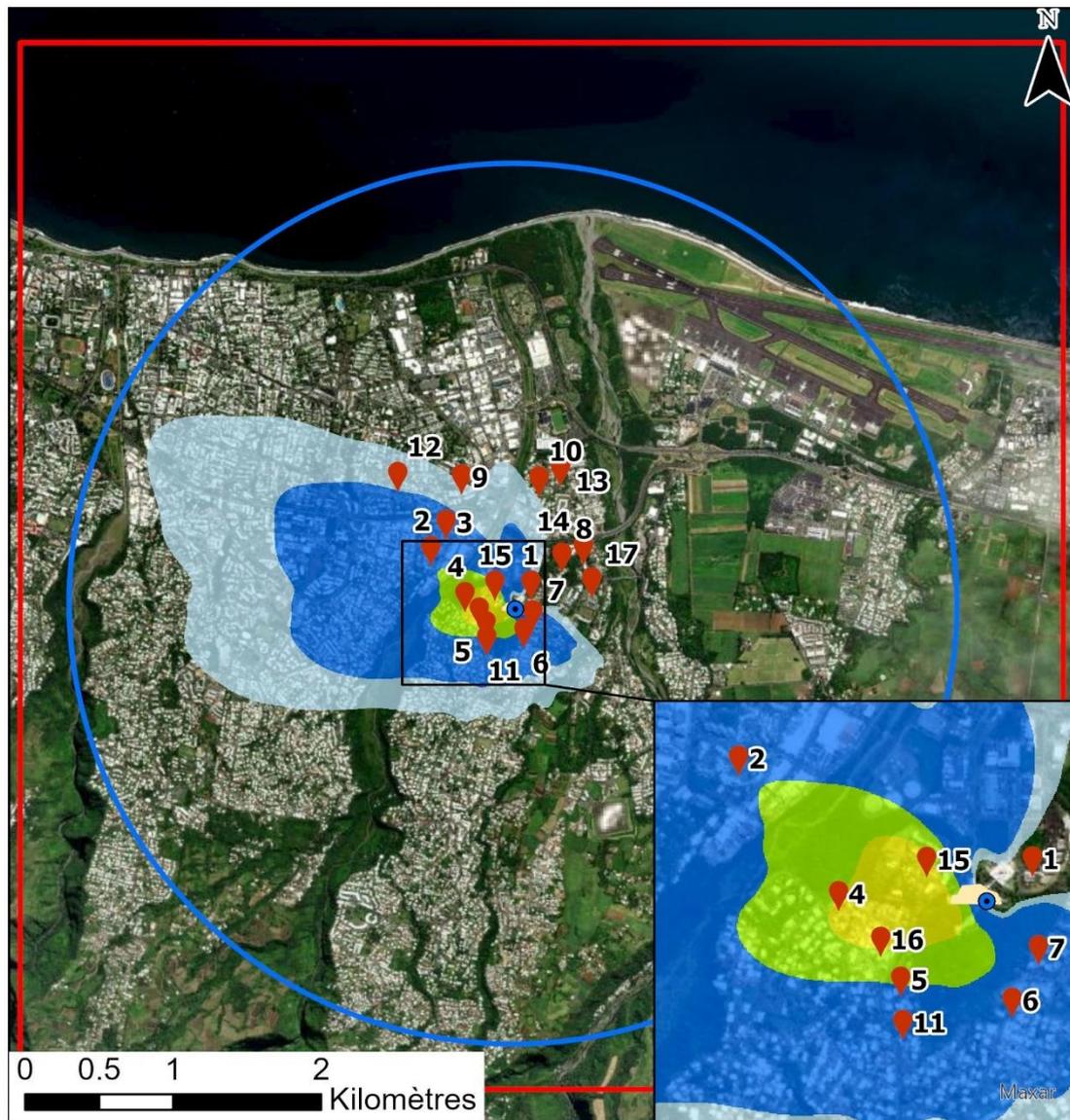
Légende

- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- Points cibles

Concentration en Fluor 18 en moyenne annuelle (Bq/m³)

- < 0.001
- 0.001 - 0.005
- 0.005 - 0.01
- 0.01 - 0.02
- > 0.02

Figure 19 : carte de concentration en moyenne annuelle en gallium 68 en Bq/m³



Légende

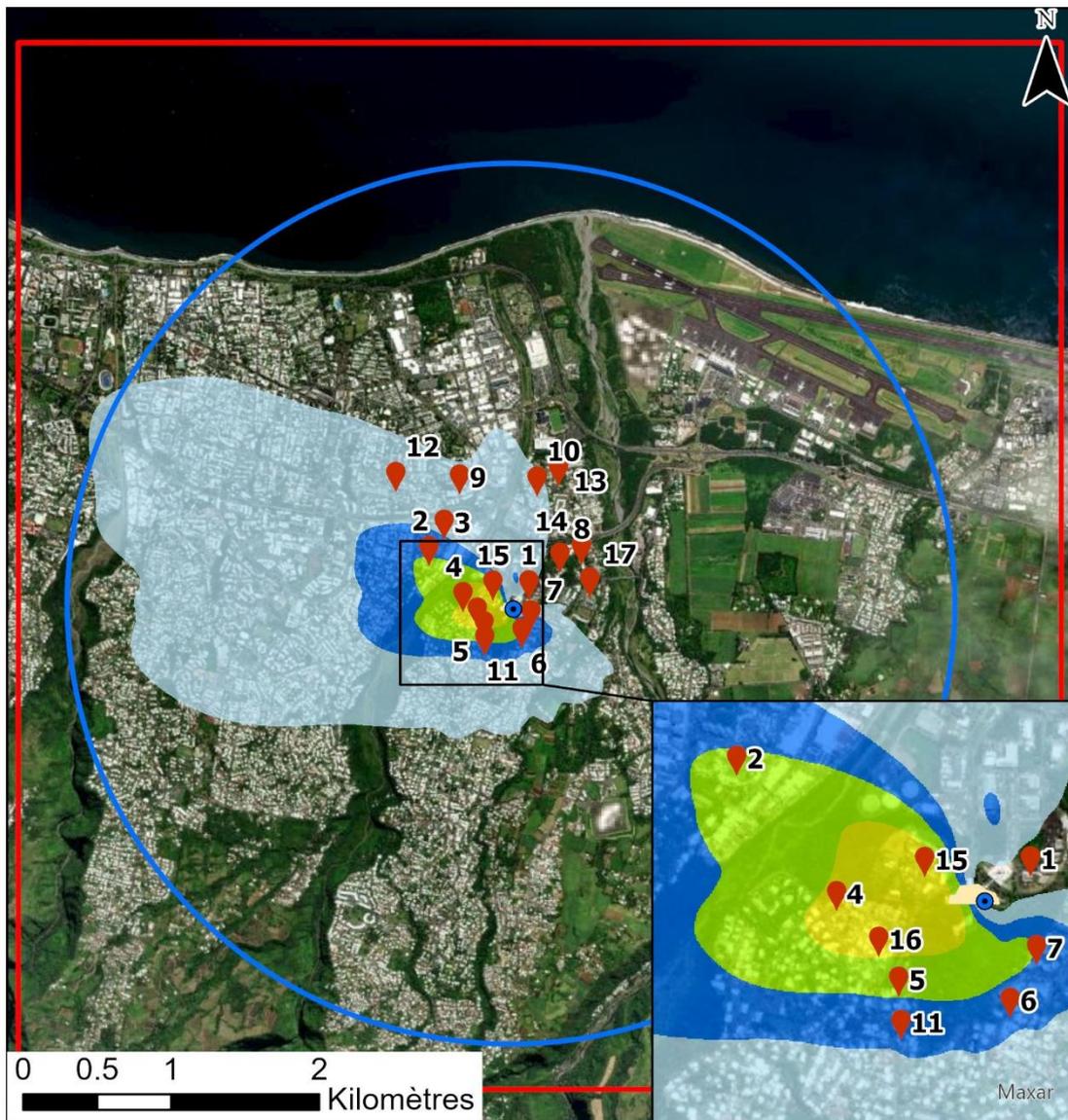
- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- Points cibles

Concentration en Gallium 68 en moyenne annuelle (Bq/m³)

- < 5e-06
- 5e-06 - 1e-05
- 1e-05 - 5e-05
- 5e-05 - 1e-04
- > 1e-04



Figure 20 : carte de concentration en moyenne annuelle en technétium 99 en Bq/m³



Légende

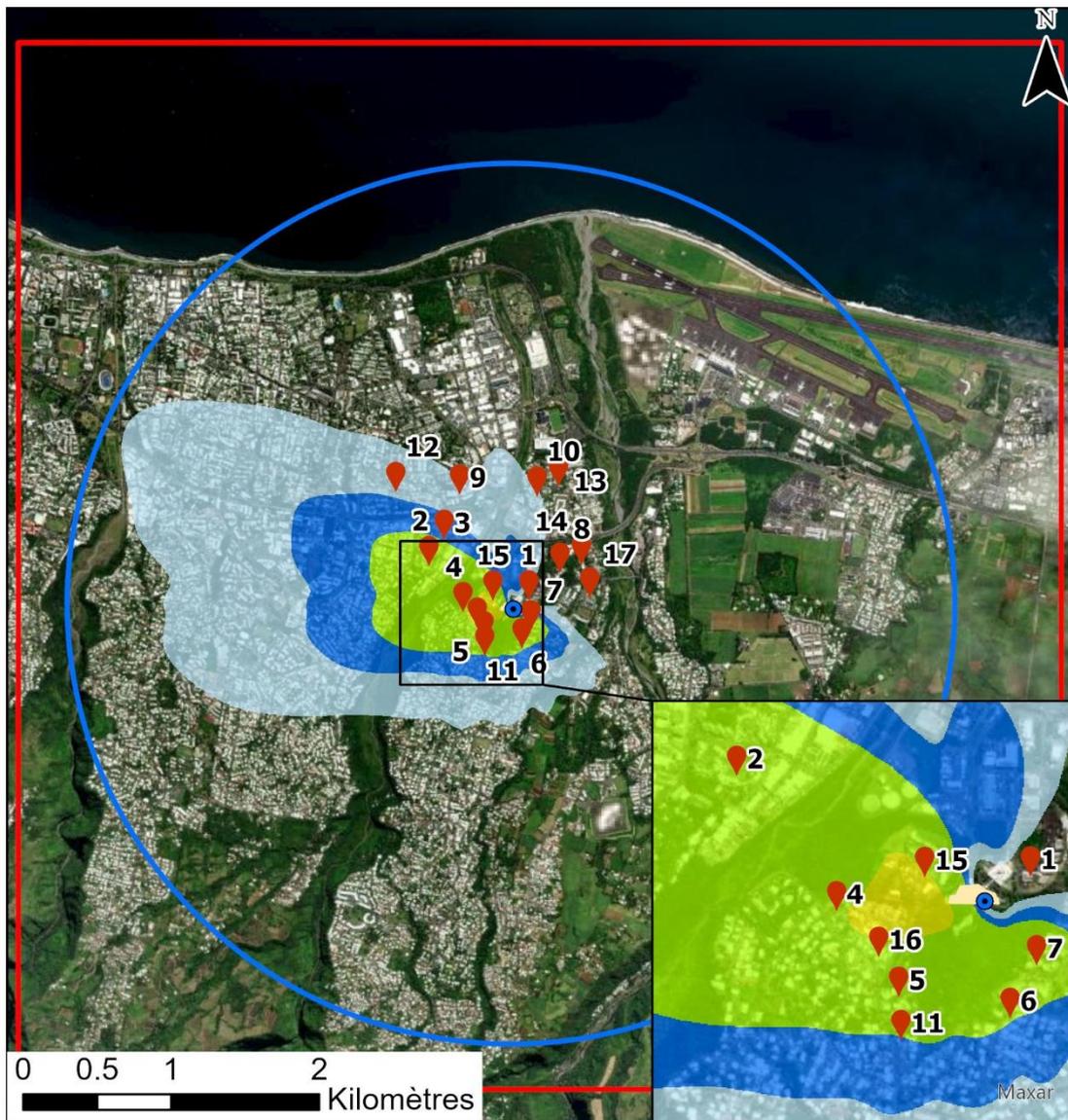
- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- Points cibles

Concentration en Technétium 99 en moyenne annuelle (Bq/m³)

- < 1e-04
- 1e-04 - 5e-04
- 5e-04 - 1e-03
- 1e-03 - 2e-03
- > 2e-03



Figure 21 : carte de concentration en moyenne annuelle en lutécium 177 en Bq/m³



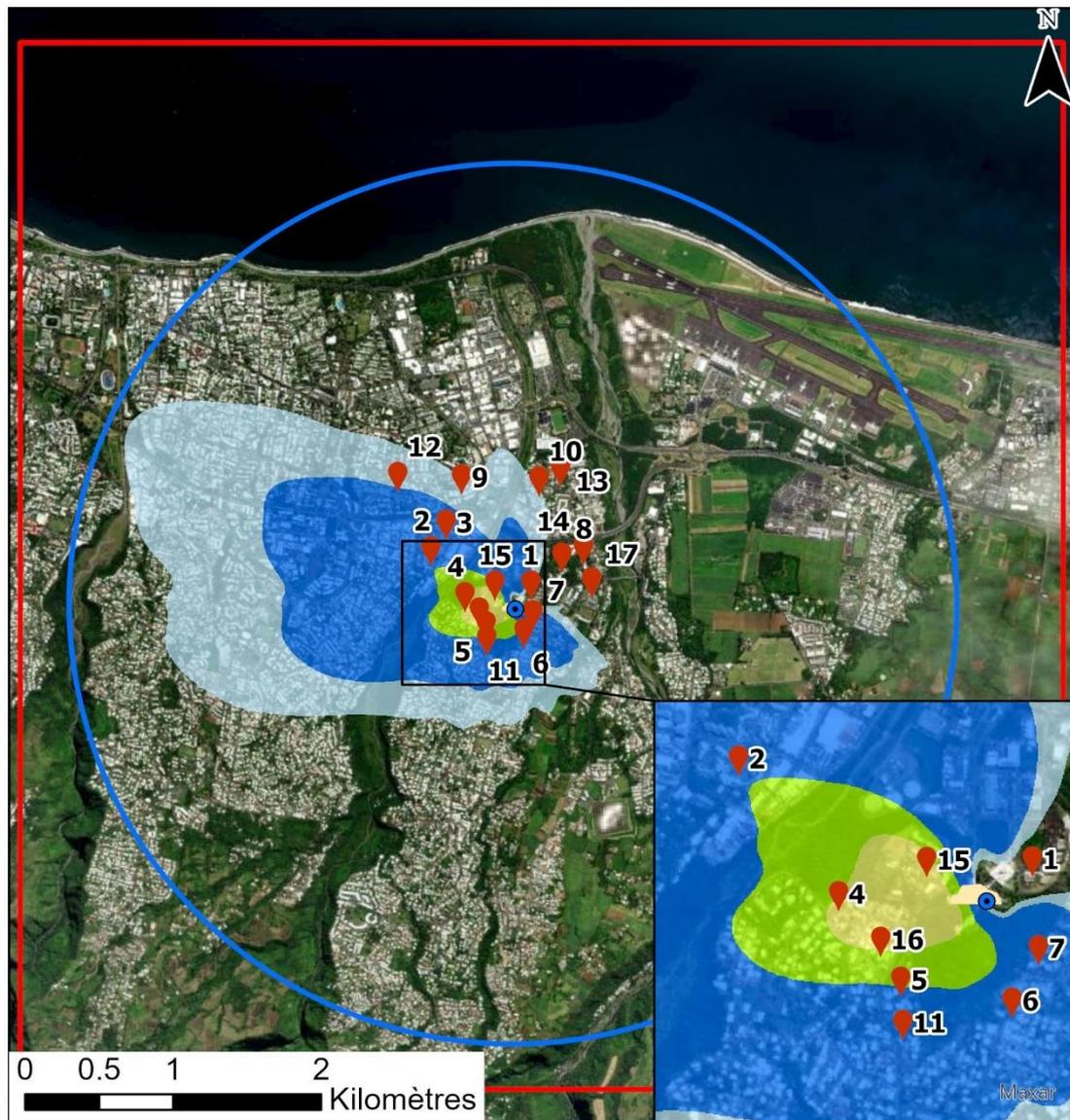
Légende

- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- Points cibles

Concentration en Lutécium 177 en moyenne annuelle (Bq/m³)

- < 2e-05
- 2e-05 - 5e-05
- 5e-05 - 1e-04
- 1e-04 - 5e-04
- > 5e-04

Figure 22 : carte de concentration en moyenne annuelle en zirconium 89 en Bq/m³



Légende

- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- Points cibles

Concentration en Zirconium 89 en moyenne annuelle (Bq/m³)

- < 5e-06
- 5e-06 - 1e-05
- 1e-05 - 5e-05
- 5e-05 - 1e-04
- > 1e-04



4.2.4 Dépôts au sol

Le Tableau 8 présente les résultats de dépôts au sol exprimés en Bq/m²/s et en Bq/m² cumulés sur une année au niveau des points cibles présentés précédemment.

Les à présentent la carte des dépôts sur le domaine d'étude pour les 5 substances exprimés en Bq/m²/s et en Bq/m² cumulés sur une année (unité indiquée comme Bq/m²/an sur les figures).

Les cartographies montrent que les dépôts les plus élevés sont situés en bordure des limites du site, et diminuent rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du site.

Les dépôts en Bq/m² cumulés sur une année ont été estimés par la formule suivante :

$$A = A_{dep} \times \frac{(1 - e^{-(\lambda_r) \times t})}{\lambda_r}$$

Avec :

A : activité déposée sur le sol sur l'année (Bq.m⁻².an⁻¹),

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

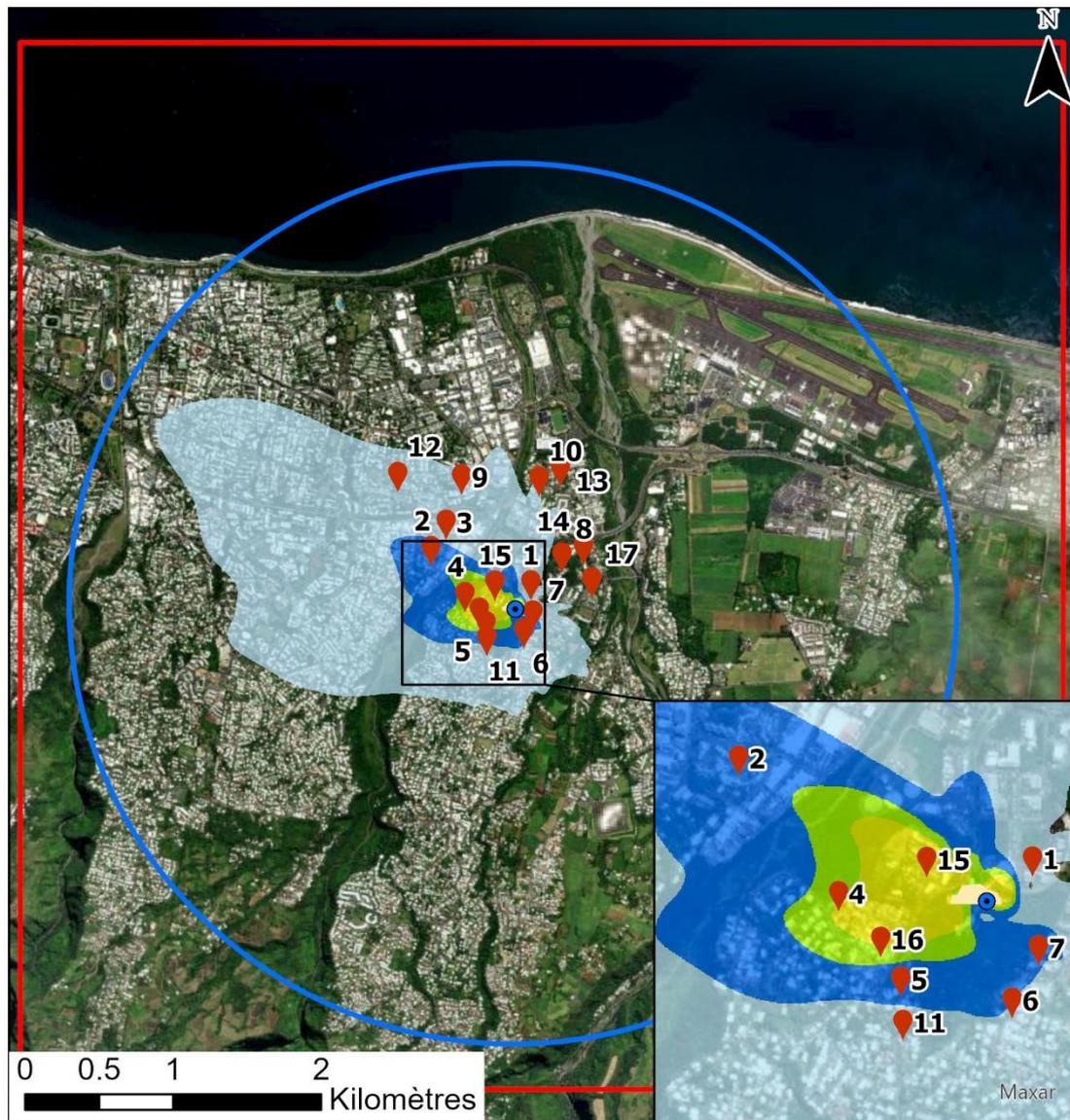
λ_r : constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s⁻¹)

t : temps d'accumulation en s (ici t = 1 an)

Tableau 8 : dépôts totaux moyens au sol annuels

Zone	Dépôts au sol en Bq/m ² /s					Dépôts au sol en Bq/m ² au bout d'un an				
	Gallium 68	Technétium 99m	Fluor 18	Lutécium 177	Zirconium 89	Gallium 68	Technétium 99m	Fluor 18	Lutécium 177	Zirconium 89
CIRAD	7.2E-07	1.7E-05	2.5E-04	2.9E-06	7.3E-07	4.2E-03	5.4E-01	2.4E+00	2.4E+00	3.0E-01
Collège Emile Hugot	6.4E-09	1.6E-07	2.2E-06	2.7E-08	6.7E-09	3.8E-05	5.0E-03	2.1E-02	2.2E-02	2.7E-03
Micro-crèche Technopole	1.5E-08	3.8E-07	6.3E-06	6.4E-08	1.6E-08	8.7E-05	1.2E-02	5.9E-02	5.4E-02	6.5E-03
Ecole primaire de Grand Canal	1.4E-07	3.4E-06	3.9E-05	5.8E-07	1.4E-07	8.0E-04	1.1E-01	3.7E-01	4.8E-01	5.9E-02
Ecole maternelle des Badamiers	5.9E-08	1.5E-06	1.9E-05	2.5E-07	6.3E-08	3.5E-04	4.7E-02	1.8E-01	2.1E-01	2.6E-02
Ecole Primaire Primat	2.2E-08	5.8E-07	7.8E-06	9.9E-08	2.5E-08	1.3E-04	1.8E-02	7.4E-02	8.3E-02	1.0E-02
UNIVERSITE	1.1E-07	2.6E-06	5.0E-05	4.3E-07	1.1E-07	6.3E-04	8.1E-02	4.8E-01	3.6E-01	4.4E-02
Habitation 1	2.8E-07	6.9E-06	8.8E-05	1.2E-06	2.9E-07	1.7E-03	2.2E-01	8.3E-01	9.8E-01	1.2E-01
Habitation 2	1.2E-07	3.0E-06	3.9E-05	5.0E-07	1.3E-07	7.1E-04	9.3E-02	3.7E-01	4.2E-01	5.1E-02
Habitation 3	6.2E-07	1.5E-05	1.8E-04	2.5E-06	6.3E-07	3.6E-03	4.7E-01	1.7E+00	2.1E+00	2.6E-01
Habitation 4	2.5E-07	6.2E-06	7.0E-05	1.0E-06	2.6E-07	1.5E-03	1.9E-01	6.6E-01	8.7E-01	1.1E-01
Habitation 5	1.4E-07	3.6E-06	4.1E-05	6.0E-07	1.5E-07	8.5E-04	1.1E-01	3.9E-01	5.0E-01	6.1E-02
Habitation 6	1.9E-07	4.7E-06	5.4E-05	7.9E-07	2.0E-07	1.1E-03	1.5E-01	5.2E-01	6.6E-01	8.0E-02
Habitation 7	1.7E-08	4.4E-07	6.8E-06	7.4E-08	1.8E-08	1.0E-04	1.4E-02	6.5E-02	6.2E-02	7.5E-03
Habitation 8	4.3E-08	1.1E-06	1.4E-05	1.9E-07	4.7E-08	2.5E-04	3.4E-02	1.3E-01	1.6E-01	1.9E-02
Habitation 9	3.0E-08	7.9E-07	9.7E-06	1.3E-07	3.3E-08	1.8E-04	2.5E-02	9.2E-02	1.1E-01	1.4E-02
Habitation 10	5.3E-07	1.3E-05	1.5E-04	2.2E-06	5.5E-07	3.1E-03	4.1E-01	1.4E+00	1.8E+00	2.2E-01
Zone la plus exposée	1.0E-06	2.5E-05	3.3E-04	4.2E-06	1.1E-06	6.1E-03	7.9E-01	3.1E+00	3.5E+00	4.3E-01

Figure 23 : carte de dépôts en fluor 18 en Bq/m² au bout d'un an



Légende

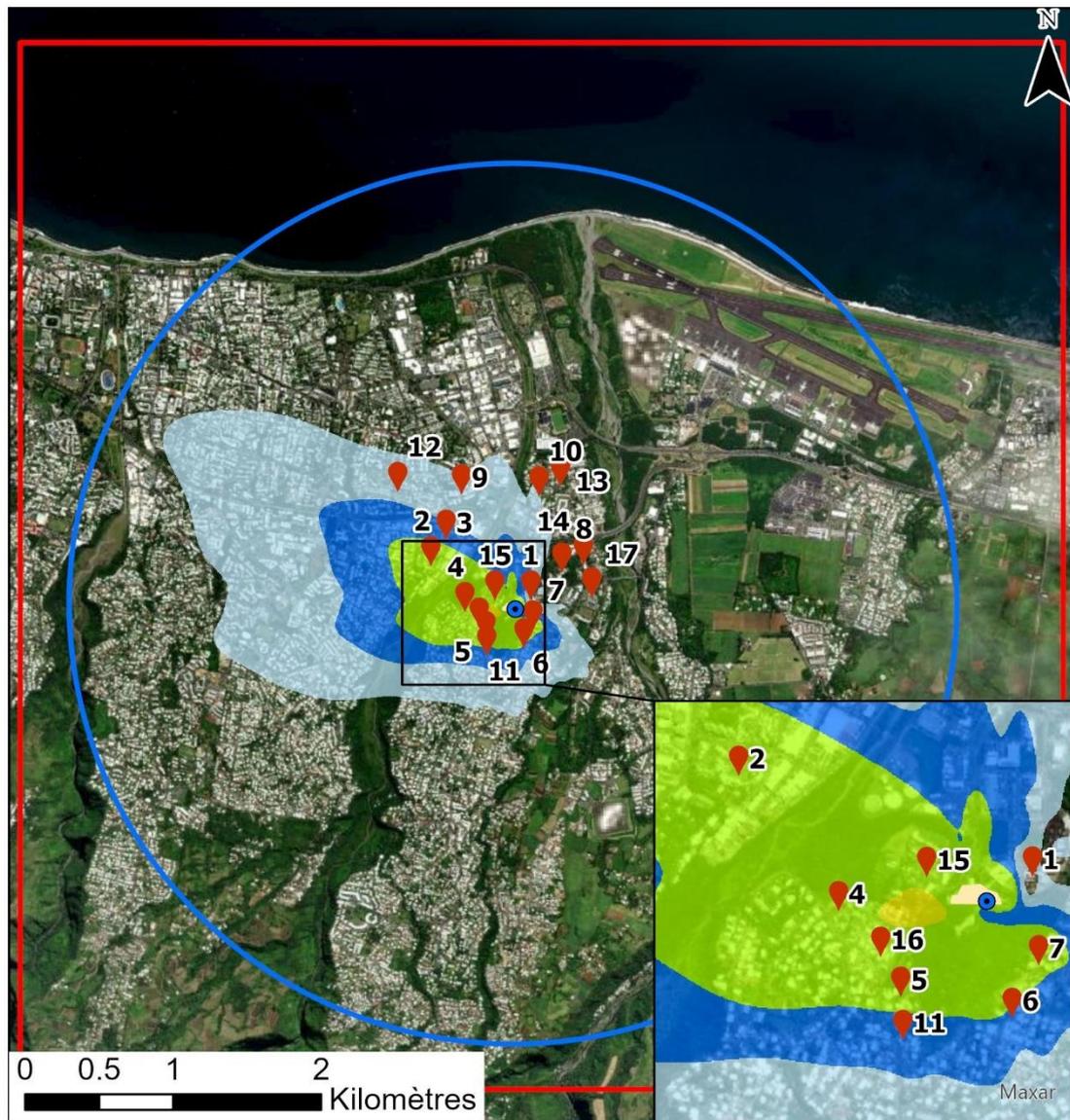
- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- Points cibles

Dépôts en Fluor 18 (Bq/m²/an)

- <math>< 0.1</math>
- 0.1 - 0.5
- 0.5 - 1
- 1 - 1.5
- > 1.5



Figure 24 : carte de dépôts en gallium 68 en Bq/m² au bout d'un an



Légende

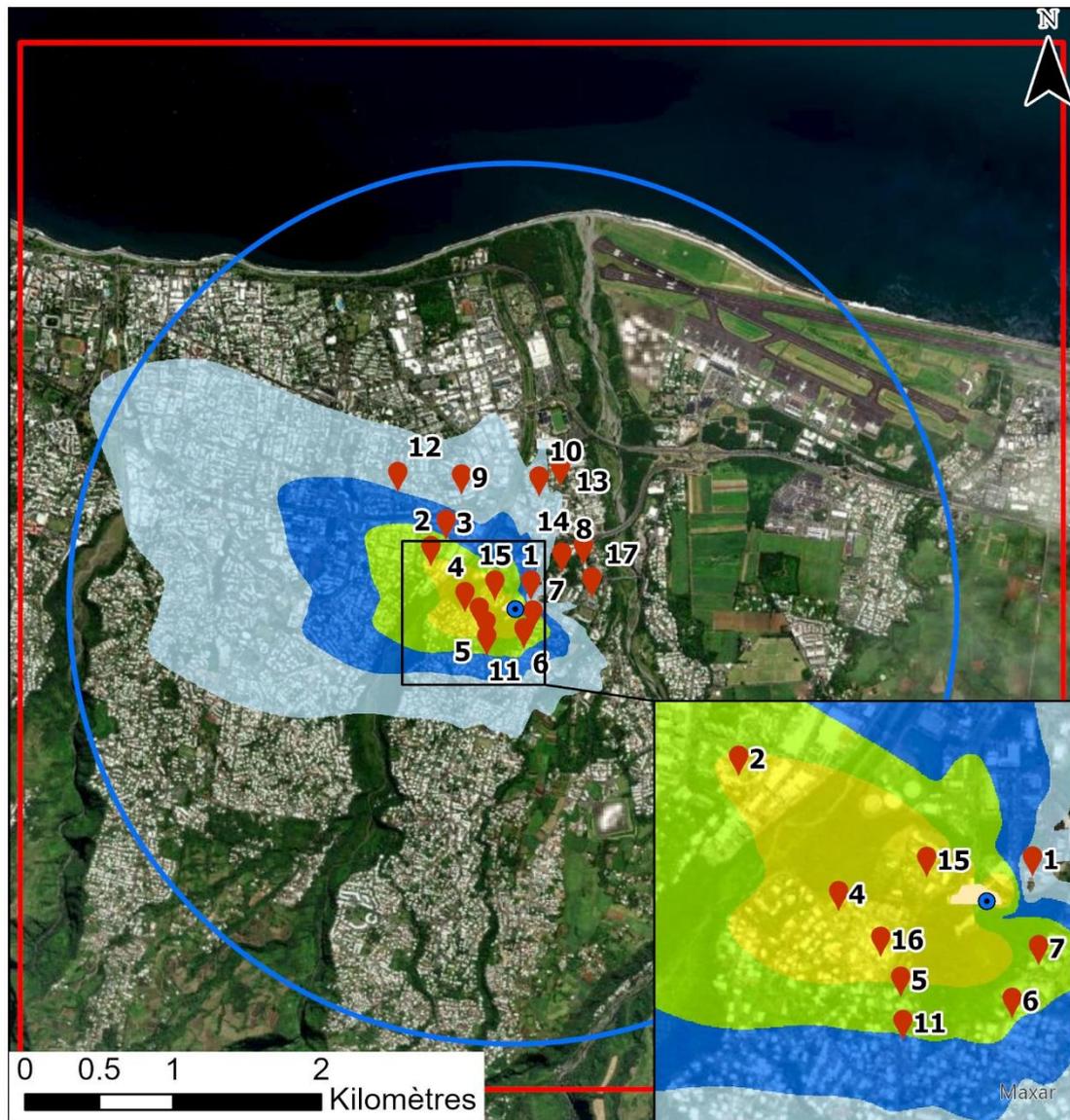
- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- 📍 Points cibles

Dépôts en Gallium 68 (Bq/m²/an)

- < 2e-04
- 2e-04 - 5e-04
- 5e-04 - 1e-03
- 1e-03 - 5e-03
- > 5e-03



Figure 25 : carte de dépôts en technétium 99m en Bq/m² au bout d'un an



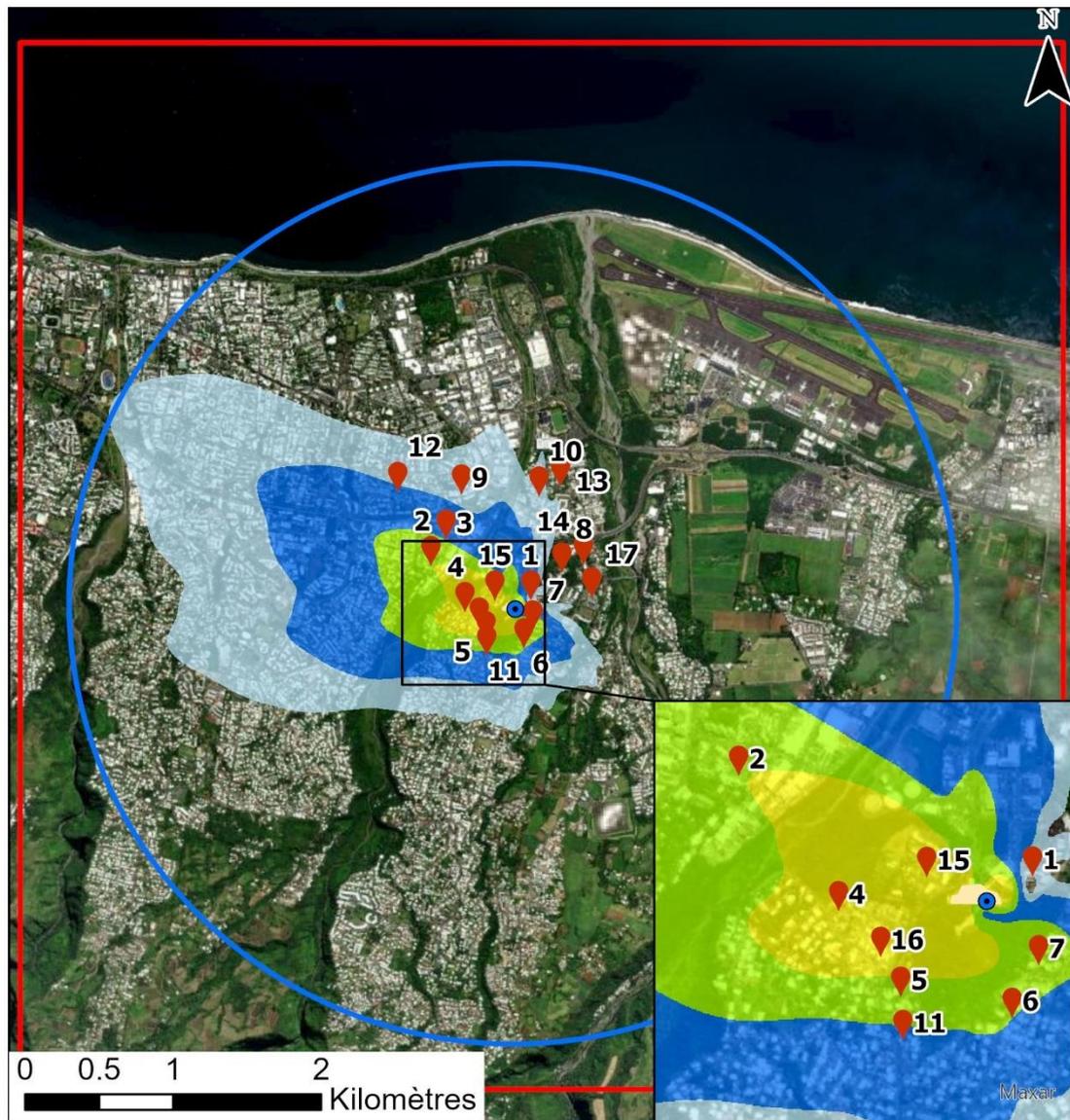
Légende

- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- 📍 Points cibles

Dépôts en Technétium 99 (Bq/m²/an)

- < 0.02
- 0.02 - 0.05
- 0.05 - 0.1
- 0.1 - 0.2
- > 0.2

Figure 26 : carte de dépôts en lutécium 177 en Bq/m² au bout d'un an



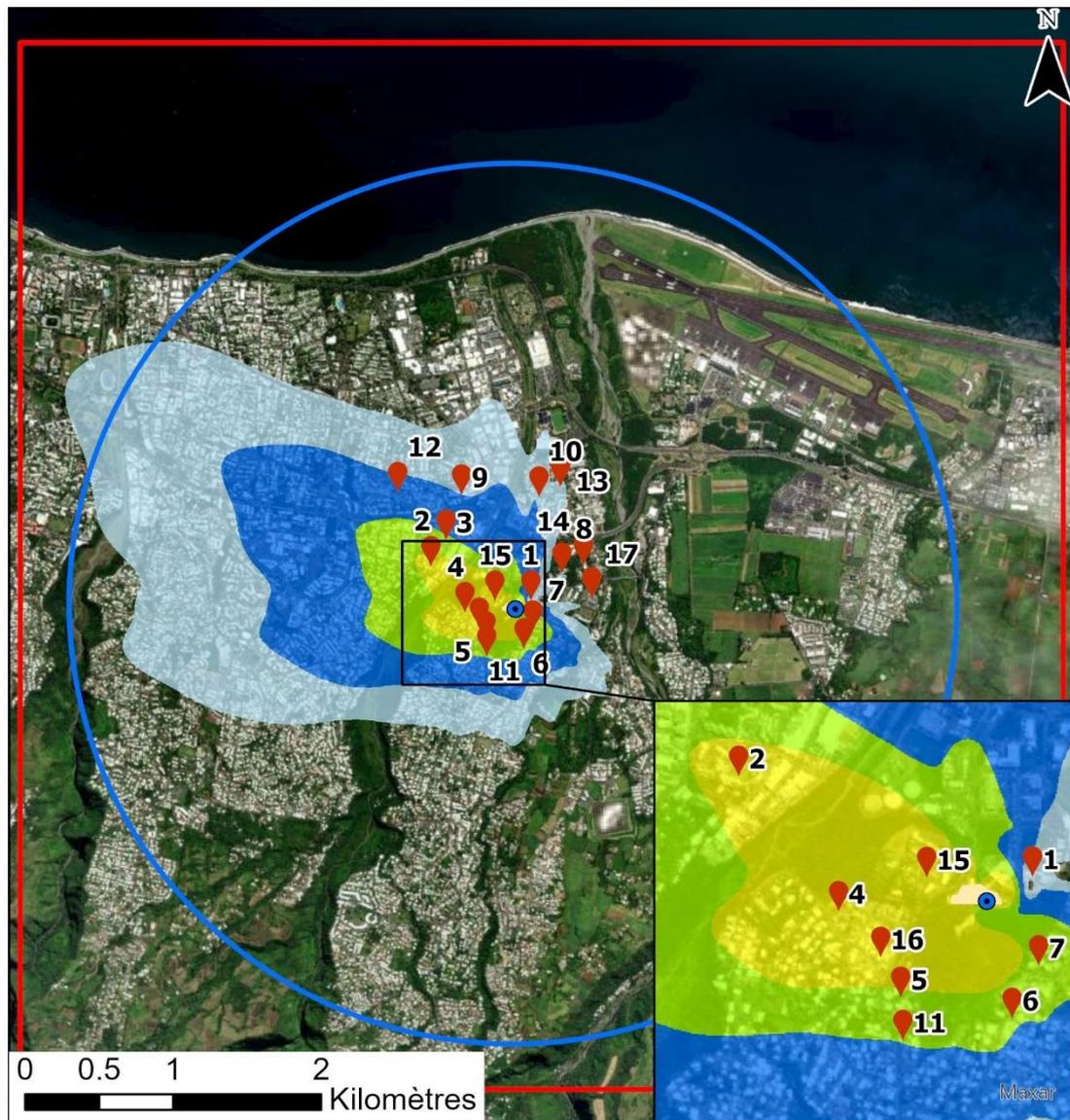
Légende

- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- ♥ Points cibles

Dépôts en Lutécium 177 (Bq/m²/an)

- < 0.1
- 0.1 - 0.2
- 0.2 - 0.5
- 0.5 - 1
- > 1

Figure 27 : carte de dépôts en zirconium 89 en Bq/m² au bout d'un an



Légende

- Domaine d'étude
- Rayon de 3km
- CYROI
- Source
- Points cibles

Dépôts en Zirconium 89 (Bq/m²/an)

- < 0.01
- 0.01 - 0.02
- 0.02 - 0.05
- 0.05 - 0.1
- > 0.1

5. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE

L'étude de dispersion a permis d'estimer les concentrations dans l'air et les dépôts au sol imputables au site. Ces résultats serviront dans le cadre de cette étude pour estimer les expositions des populations vivant autour du site.

5.1 IDENTIFICATION DES DANGERS

5.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations

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

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

Ils peuvent être classés en deux catégories :

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

5.1.1.1.1 Les effets déterministes

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

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

Généralement, les effets déterministes se produisent dans le cas d'une exposition unique à fort⁵. Ce sont donc souvent dans le cas de situations accidentelles. Ils ne sont pas étudiés dans le cadre de la présente étude.

5.1.1.1.2 Les effets à incidences aléatoires ou stochastiques.

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

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

⁵ [https://www.asn.fr/lexique/mot/\(lettre\)/95210/\(mot\)/D%C3%A9bit%20de%20dose](https://www.asn.fr/lexique/mot/(lettre)/95210/(mot)/D%C3%A9bit%20de%20dose)

5.1.1.2 Exposition des populations

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

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

Les voies de contamination possibles sont les suivantes :

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

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

5.1.2 Relation Dose-Réponse

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

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

5.2 SCHEMA CONCEPTUEL D'EXPOSITION

5.2.1 Voies d'exposition

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

- pendant le passage du panache
 - => exposition externe par irradiation
 - => exposition interne par inhalation
- par les dépôts sur le sol
 - => exposition externe par irradiation ;
- par l'ingestion de terre (enfants jouant au sol, personnes jardinant par exemple) exposée aux dépôts d'aérosols lors du passage du panache
 - => exposition interne par ingestion

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

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

5.2.2 Schéma conceptuel d'exposition

Le fluor 18, le gallium 68 et technétium 99m présentent des périodes radioactives courtes ; les phénomènes d'accumulation dans l'environnement et de transfert dans la chaîne alimentaire peuvent donc être considérés comme non significatifs.

Le lutécium 177 et le zirconium 89 présentent des périodes radioactives un peu plus longue. Cependant, pour ces radionucléides, la voie par ingestion est négligeable devant les autres voies d'exposition (cf. paragraphe 5.5.3 - Validation de la non prise en compte de la voie par ingestion). La voie par ingestion n'est donc pas retenue.

Les voies d'exposition retenues sont donc :

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

5.3 ESTIMATION DES DOSES D'EXPOSITION

Les voies d'exposition retenues sont donc :

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

5.3.1 Scénario d'exposition

Les scénarios retenus sont indiqués dans le tableau suivant. Il s'agit de la zone habitée la plus exposée, de l'école la plus exposée et de la zone « travailleur » la plus exposée (correspondant également à la zone la plus exposée du domaine d'étude).

Tableau 9 : scénarios d'exposition retenus

Scénario retenu	Groupe de référence	Typologie	Durée d'exposition	Temps d'exposition	Individu	Voies d'exposition
Ecole la plus exposée	Ecole primaire de Grand Canal	Ecole la plus exposée	1 an	1665 h (10h/jours 37 semaines/an et 4,5 jours/semaine)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	Exposition interne par inhalation du panache Exposition externe aux dépôts au sol
	Habitation la plus exposée (habitation 3)	Habitation la plus exposée		7095 h (le reste du temps)		
Travailleur	Zone la plus exposée (point max)	Entreprise la plus exposée		2000 h (10jours par jours x 200 j/an)	Adulte (17 ans et plus)	
	Habitation la plus exposée (habitation 3)	Habitation la plus exposée		6760 h/an (le reste du temps)		
Habitant majorant	Habitation la plus exposée (habitation 3)	Habitation la plus exposée		8 760 h/an (toute l'année)	Adulte (17 ans et plus) Bébé (enfant de 1 à 2 ans) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	

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

5.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation)

5.3.2.1 Méthodologie

L'irradiation a lieu :

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

5.3.2.1.1 Exposition externe au panache

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

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

Avec :

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

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

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

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

t : durée d'exposition (en secondes)

5.3.2.1.2 Exposition externe aux dépôts

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

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

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

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

5.3.2.2 Hypothèses

Les valeurs par défaut des coefficients de dose efficace externe au panache sont issues de la base ECRIN de l'IRSN (Federal Guidance 12 (FGR 12, 1993)), et sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe par irradiation

	Période Radioactive	Irradiation panache	Irradiation dépôt	Durée d'exposition
Unités	s	((Sv/s)/(Bq/m ³))	((Sv/s)/(Bq/m ²))	année
F-18	6 588 (1,83h)	4.90E-14	1.01E-15	1 année
Ga-68	4 068 (1,13h)	4.58E-14	9.41E-16	
Tc-99m	21 672 (6,02h)	5.89E-15	1.21E-16	
Lu-177	579 744 (6,71j)	1.62E-15	-*	
Zr-89	282 528 (3,27j)	5.68E-14	1.13E-15	

*Données inexistantes au moment de la rédaction du rapport

La fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache est prise égale à 1 par défaut. Il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de cette voie d'exposition. C'est une approche conservative.

5.3.2.3 Calcul de la dose d'exposition par irradiation

Le Tableau 11 présente les doses d'exposition par irradiation pour chaque scénario retenu (cf. Tableau 9).

A noter que, 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 11 : dose d'exposition par irradiation (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	Ecole la plus exposée	Travailleur	4.2E-05	5.5E-05	9.7E-05
		Enfant âgé de 10 ans	4.2E-05	5.5E-05	9.7E-05
Scénario travailleur	Entreprise la plus exposée (point le plus exposé du domaine d'étude)	Travailleur	5.8E-05	7.6E-05	1.3E-04
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	5.0E-05	6.4E-05	1.1E-04
		Enfant âgé de 10 ans	5.0E-05	4.6E-05	9.6E-05
		Enfant âgé de 1 à 2 ans	5.0E-05	4.6E-05	9.6E-05

5.3.3 Exposition par inhalation

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

5.3.3.1 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)

5.3.3.2 Hypothèses

Pour les doses efficaces internes par inhalation, les coefficients de dose utilisés proviennent de l'arrêté du 1er septembre 2003. Ces coefficients de dose correspondent à un diamètre de particules de 1 µm.

Les débits respiratoires considérés sont calculés à partir des volumes d'air inhalés quotidiennement indiqués dans la CIPR 66⁶.

Tableau 12 : volumes d'air inhalés

Cibles	Volumes d'air inhalés en m ³ /h (D_{resp})
Adulte	0,92
Enfant âgé de 10 ans	0,64
Enfant âgé de 1 à 2 ans	0,22
Travailleur	0,95
Travailleur de force ou sportif	1,12

Pour les doses efficaces internes par inhalation, les coefficients de dose utilisés proviennent de l'arrêté du 1er septembre 2003. Ces coefficients de dose correspondent à un diamètre de particules de 1 µm.

Tableau 13 : coefficient de dose efficace en Sv.Bq⁻¹ (CD_{inh})

Inhalation - Efficace (Sv/Bq)	Unités	Adulte	Enfant de 10 ans	Enfant de 1 à 2 ans
F-18	Sv/Bq	5.90E-11	1.00E-10	3.10E-10
Ga-68	Sv/Bq	4.90E-11	9.20E-11	3.10E-10
Tc-99m	Sv/Bq	1.90E-11	3.40E-11	9.90E-11
Lu-177	Sv/Bq	1.10E-09	1.60E-09	3.80E-09
Zr-89	Sv/Bq	5.20E-10	9.60E-10	2.80E-09

La fraction annuelle de temps où l'individu est immergé (F_{tp}) dans le panache est prise égale à 1 par défaut. Il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de cette voie d'exposition. C'est une hypothèse conservative.

⁶ Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Ann. ICRP 24 (1-3), 1994

5.3.3.3 Calcul de la dose d'exposition par inhalation

Le Tableau 14 présente les doses d'exposition par inhalation pour chaque scénario retenu (cf. Tableau 9).

Tableau 14 : dose d'exposition par inhalation (mSv/an)

Groupe de référence	Typologie	Cible	Dose totale annuel (mSv/an)
Scénario Ecole	Ecole la plus exposée	Travailleur	2.0E-05
		Enfant âgé de 10 ans	1.7E-05
Scénario travailleur	Entreprise la plus exposée (point le plus exposé du domaine d'étude)	Travailleur	2.4E-05
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	2.0E-05
		Enfant âgé de 10 ans	2.3E-05
		Enfant âgé de 1 à 2 ans	2.4E-05

5.4 CARACTERISATION DES RISQUES

La caractérisation des risques est la dernière étape de la démarche d'évaluation des risques sanitaires. Elle consiste à confronter les concentrations ou doses auxquelles les populations sont exposées et les valeurs toxicologiques de référence retenues.

5.4.1 Méthodologie

Il n'existe pas de Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour l'exposition aux rayonnements. L'évaluation des risques se fait en comparant l'exposition des personnes exposées vis-à-vis de la limite pour le public de 1 mSv par an).

L'objectif de l'évaluation de l'impact du rejet de substances radioactives en fonctionnement normal est de situer l'impact ajouté vis-à-vis de la limite réglementaire d'exposition pour le public (1 mSv par an) et des objectifs de sûreté pour les travailleurs. Cet impact ajouté pour le public est comparé à la dose moyenne annuelle en France (2,4 mSv). Les doses efficaces sont évaluées après 1 an et 50 ans de fonctionnement des installations ou encore pour la durée de vie prévue des installations si celles-ci sont bien définies a priori.

5.4.2 Evaluation des risques sanitaires

Le Tableau 15 synthétisent les résultats de doses efficaces d'exposition pour les différents scénarios d'exposition retenus.

L'impact sanitaire est essentiellement dû à l'exposition externe par irradiation. Quels que soient la zone étudiée et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions des radionucléides du CYROI (fluor 18, gallium 68 et technétium 99m, lutécium 177 et zirconium 89) sont très faibles vis-à-vis de la dose admissible en France (0.014% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

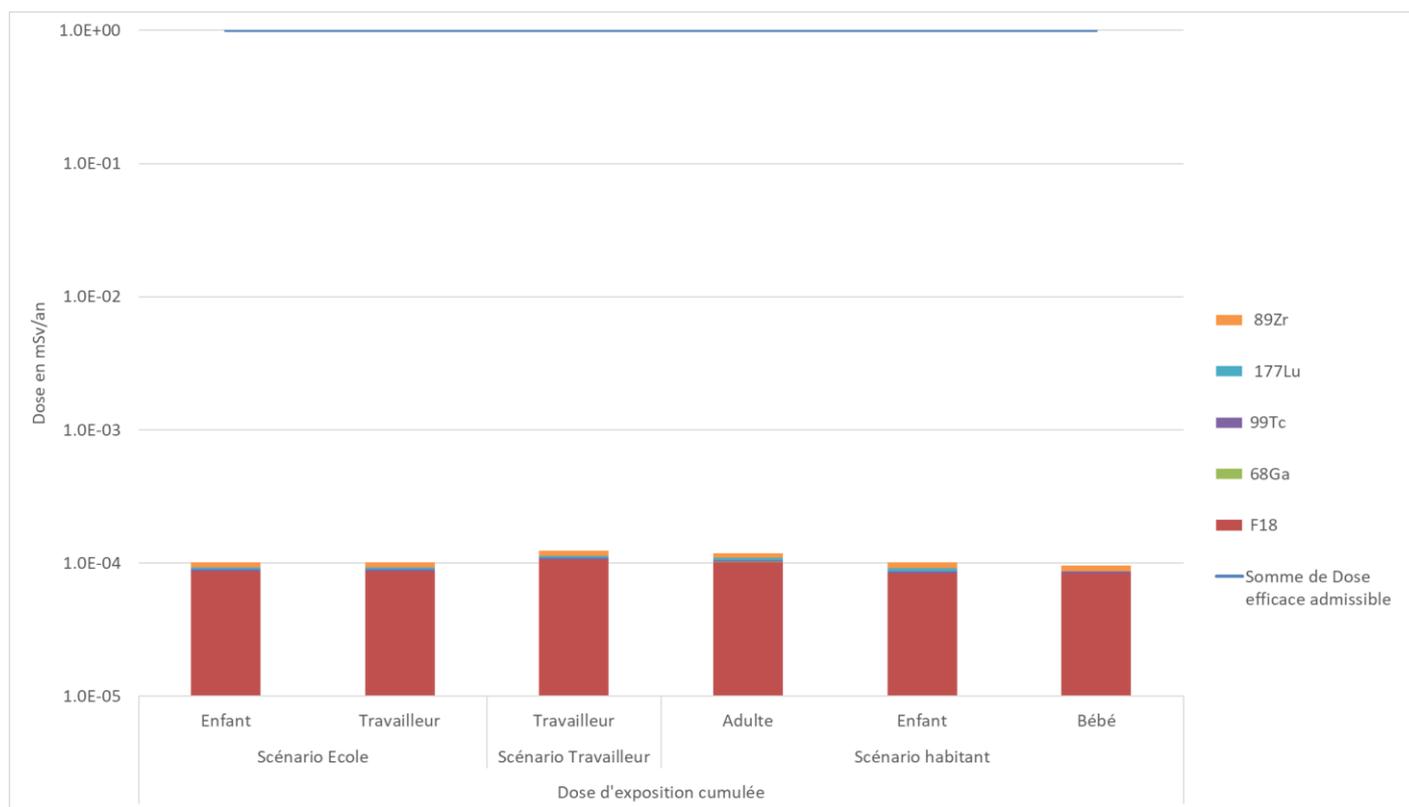
Tableau 15 : doses efficaces totales (mSv/an)

Groupe de référence	Typologie	Cible	Dose externe totale par irradiation (mSv/an)	Dose d'exposition par inhalation (mSv/an)	Dose totale annuel (mSv/an)	Dose efficace admissible en France (mSv/an)	Dose efficace moyenne annuelle en France (mSv/an)
Scénario Ecole	Ecole la plus exposée	Travailleur	9.7E-05	2.0E-05	1.2E-04	1	4,5*
		Enfant âgé de 10 ans	9.7E-05	1.7E-05	1.1E-04		
Scénario travailleur	Entreprise la plus exposée (point le plus exposé du domaine d'étude)	Adulte (travailleur non classé)	1.3E-04	2.4E-05	1.6E-04		
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	1.1E-04	2.0E-05	1.3E-04		
		Enfant âgé de 10 ans	9.6E-05	2.3E-05	1.2E-04		
		Enfant âgé de 1 à 2 ans	9.6E-05	2.4E-05	1.2E-04		

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

Comme le montre la Figure 28, la dose efficace totale annuelle est essentiellement associée au fluor 18 (85% de contribution).

Figure 28 : dose efficace totale par radioélément (mSv/an)



L'exposition externe par irradiation est la voie d'exposition principale (entre 84 et 88% de contribution selon le groupe de référence et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte)).

Figure 29 : répartition de la dose par type d'exposition (mSv/an)

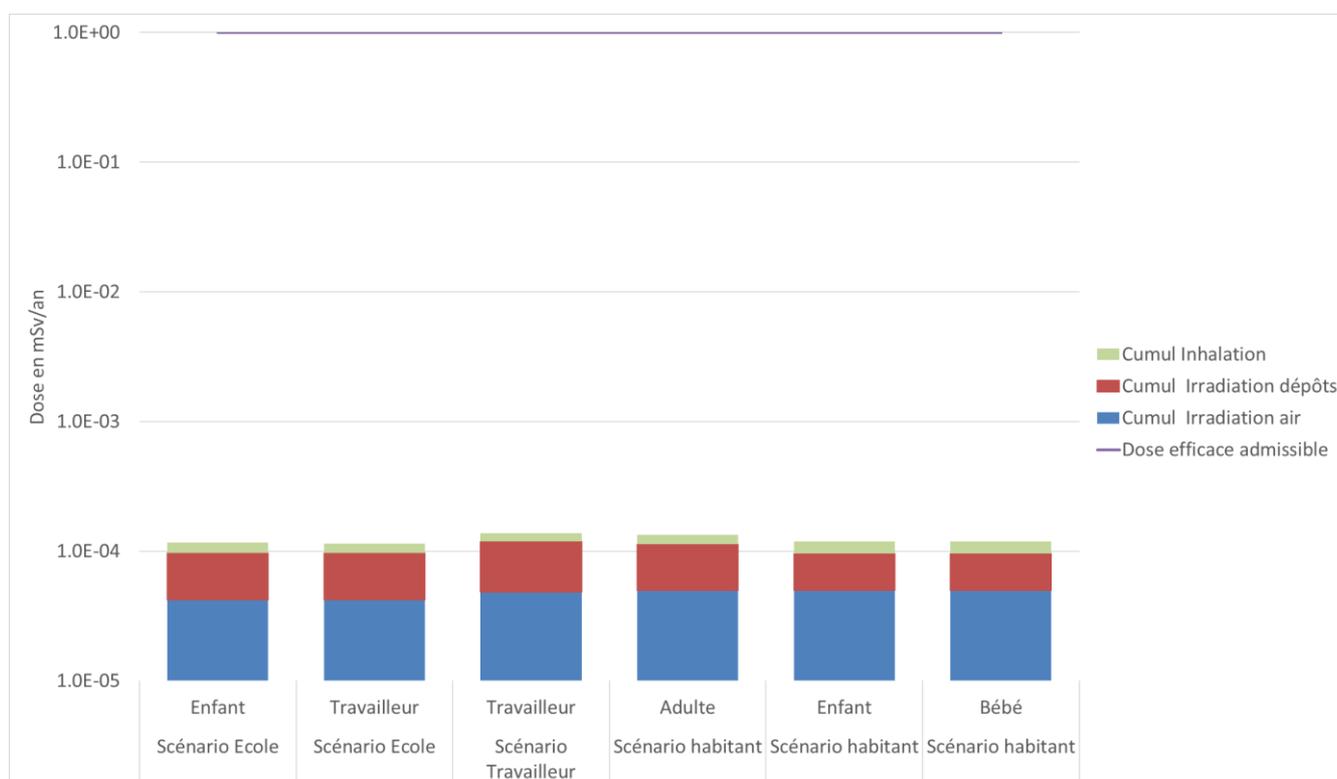
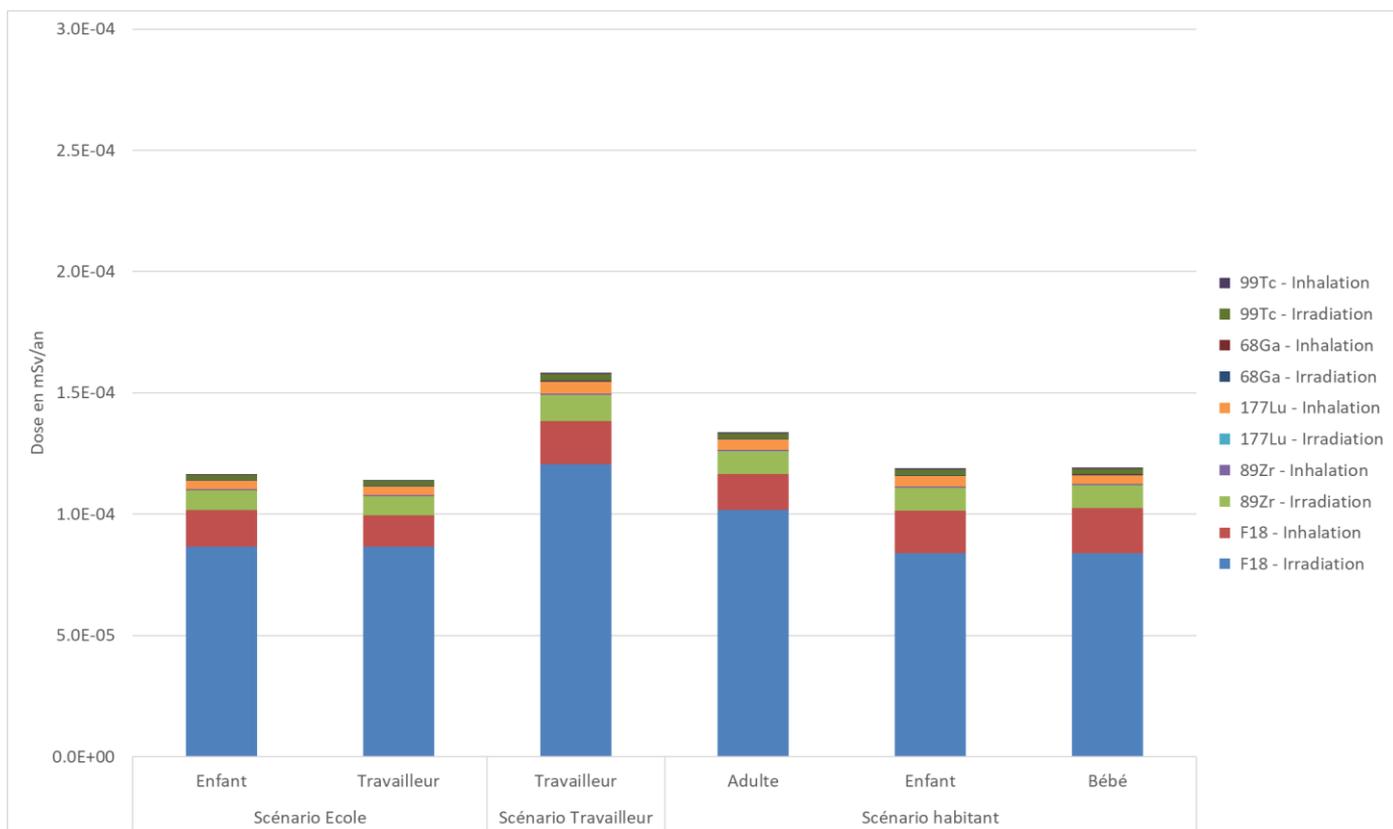


Figure 30 : répartition de la dose par type d'exposition et par radioélément



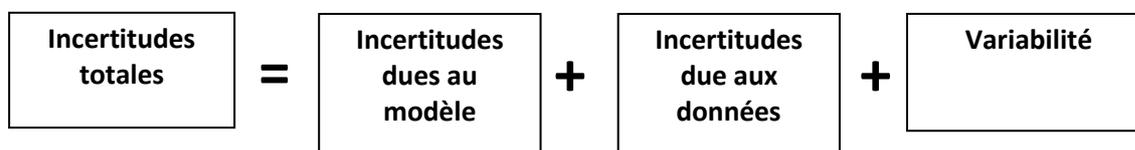
5.5 INCERTITUDES

Ce chapitre a pour objectif d'inventorier les incertitudes liées à la démarche d'évaluation des risques sanitaires ou aux hypothèses retenues dans les différentes étapes. Ces incertitudes s'ajoutent à celles liées à la modélisation de la dispersion atmosphérique, qui ne sont pas traitées dans ce chapitre.

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

5.5.1 Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique

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



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

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

5.5.1.1 Incertainces liées au modèle

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

Dans le cadre de cette étude, le modèle ARIA Impact retenu est un modèle très simple dont l'essentiel des paramètres a été présenté dans le paragraphe 4.2.1. Les options du modèle retenues pour cette étude sont ceux qui ont été utilisés pour les études de validation du modèle définies ci-dessus. Les limites d'utilisation du modèle ont été respectées.

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

5.5.1.2 Incertitudes liées aux données d'entrée

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

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

5.5.1.2.1 Incertitudes liées aux émissions

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.

5.5.1.2.2 Incertitudes liées aux mesures météorologiques

Les données météorologiques sont issues de la station Météo-France de l'aéroport de Gillot située à environ 2,5 km à l'est du site.

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

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

5.5.1.2.3 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 par l'utilisateur des paramètres du modèle, c'est-à-dire des options de calcul mais également de la génération du maillage de calcul peut être grande. Des études ont montré qu'à données identiques, le même modèle mis en œuvre par deux équipes différentes pouvait conduire à des résultats présentant des écarts importants.

Il a été choisi de conserver comme configuration la configuration Pasquill/Holland qui avaient donné les concentrations les plus élevés au niveau des points récepteurs lors de l'étude réalisée en 2016.

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

5.5.1.3 Incertitudes liées à la variabilité

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

5.5.2 Incertitudes relatives à l'évaluation des expositions

5.5.2.1 Facteurs de sous-estimation des risques

Exposition par voie cutanée non considérée

Exceptée pour l'eau tritiée, cette voie d'exposition n'est pas considérée pour les autres radioéléments. Elle est considérée comme négligeable.

5.5.2.2 Facteurs de surestimation des risques

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

Durée d'exposition

Elle dépend du scénario étudié :

- Pour les travailleurs non classés, elle a été prise égale à 2 000 h/an sur le lieu de travail (soit 200 j/an, 10h/j) et le reste du temps dans l'habitation la plus exposée (6 760 h/an) ;
- Pour les enfants allant à l'école, elle a été prise égale à 1 695 h/an à l'école (37 semaines/an, 10h/j, 4,5 j/semaine,) et le reste du temps dans l'habitation la plus exposée (7 095 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.

5.5.2.3 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).

5.5.3 Validation de la non prise en compte de la voie par ingestion

Dans la présente étude, il a été fait l'hypothèse que la voie par ingestion était négligeable devant les autres voies d'exposition.

Afin de valider cette hypothèse, nous avons estimé les doses pour cette voie d'exposition pour le scénario habitant majorant (seul scénario potentiellement concerné par l'ingestion via la consommation de végétaux et/ou de produits animaux produits sur place).

Tableau 16 : scénario d'exposition par ingestion

Groupe de référence	Habitation 3
Typologie	Habitation la plus exposée
Durée d'exposition	1 année d'exposition au bout de 50 ans d'exploitation
Temps d'exposition	24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an
Individu	groupe adulte (17 ans et plus), groupe enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans), groupe bébé (enfant de 1 à 2 ans).
Voies d'exposition	- Exposition interne par ingestion - Voies d'exposition prises en compte : ○ Ingestion de sols ○ Ingestion de végétaux ○ Ingestion de volailles et d'œufs

Pour la voie par ingestion, la dose efficace annuelle due à l'ingestion est obtenue selon la formule suivante :

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

Avec :

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

Les activités A_i dans l'aliment i sont calculées suivant les méthodologies présentées en Annexe 2.

Les Dose efficace par ingestion sont calculées en prenant comme hypothèses les valeurs de poids corporel, de consommations journalières et de taux d'autoconsommation préconisées par l'INERIS⁷ et utilisées dans le logiciel MODUL'ERS pour chaque catégorie d'âge étudié (cf. Tableau 17).

Tableau 17 : paramètres relatifs aux différentes catégories d'âge (données INERIS)

	Classe 2 : de 1 à 3 ans	Classe 4 : de 6 à 11 ans	Classe 7 : les plus de 18 ans
Poids (kg)	12.4	28.7	70.4

⁷ Rapport INERIS-DRC-14-141968-11173C (juin 2017) – Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS

Consommation de terre			
Quantité de terre ingérée (mg/j)	50	50	20
Consommation de légumes et fruits			
Quantité de fruit ingérée (g/j)	53	90	160
Quantité de tubercules ingérée (g/j)	52	46	58
Quantité de légume racine ingérée (g/j)	26	7	12
Quantité de légume feuille ingérée (g/j)	22	10	24
Quantité de légume fruit ingérée (g/j)	40	64	110
Consommation de produits d'origine animale			
Quantité de viande de volaille ingérée (g/j)	1.1	1.7	3.2
Quantité d'œufs ingérée (g/j)	11.0	10.0	15.0

Tableau 18 : fraction d'aliments auto-produits (données INERIS)

Catégories d'aliments	Fraction d'aliments auto-produits pour la population moyenne
	Fraction d'aliments auto-produits
Sol	1
Fruits	0.20
Tubercules	0.45
Légume racine	0.45
Légume feuille	0.50
Légume fruit	0.55
Viande de volaille	0.11
Œufs	0.15

Les valeurs par défaut des coefficients de dose efficace par ingestion sont issues de la base ECRIN de l'IRSN (Federal Guidance 12 (FGR 12, 1993))⁸, et sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 19 : facteurs de dose par ingestion (en Sv/Bq)

	Zr-89	Ga-68	Tc- 99m	Lu-177	F-18
Bébé	4.50E-09	6.7E-10	1.30E-10	3.9E-09	3E-10
Enfant	1.60E-09	2E-10	4.30E-11	1.2E-09	9.1E-11
Adule	7.90E-10	1E-10	2.20E-11	5.3E-10	4.9E-11

Le tableau ci-dessous présente les résultats pour la voie par ingestion pour chaque radionucléide étudié.

Tableau 20 : dose d'exposition par ingestion (en mSV/an)

	Zr-89	Ga-68	Tc- 99m	Lu-177	F-18
Bébé	1.8E-07	3.4E-12	8.4E-11	7.2E-09	7.0E-10
Enfant	1.6E-08	4.4E-13	1.2E-11	9.6E-10	9.1E-11
Adule	7.1E-09	3.6E-14	1.0E-12	6.9E-11	8.0E-12

⁸ A noter que les publications CIPR 71 et 72 préconisent de prendre la solubilité M pour une exposition publique qui a été retenue dans cette étude.

Tableau 21 : dose d'exposition par voie d'exposition (en mSv/an)

	Unités	Zone habitée la plus exposée		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Dose externe (irradiation panache et dépôts)	mSv/an	1.1E-04	9.6E-05	9.6E-05
Dose interne par inhalation	mSv/an	2.0E-05	2.3E-05	2.4E-05
Dose interne par ingestion	mSv/an	7.2E-09	1.7E-08	1.8E-07
Dose efficace totale	mSv/an	1.3E04	1.2E-04	1.2E-04
Dose efficace admissible en France	<i>mSv/an</i>	1		
Dose efficace moyenne annuelle en France	<i>mSv/an</i>	4,5*		

La voie par ingestion est donc négligeable par rapport aux autres voies d'exposition.

6. CONCLUSION

Dans le cadre du renouvellement de son autorisation, le CYROI effectue une demande d'augmentation de l'autorisation des rejets atmosphériques du site.

Dans ce contexte, ARIA Technologies a réalisé une étude de dispersion et une estimation des doses d'expositions afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques en fluor 18, gallium 68, technétium 99, lutécium 177 et zirconium 89 sur les riverains du site.

Compte-tenu des propriétés des substances émises et des données disponibles dans la littérature, les voies d'exposition retenues sont :

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

La voie par ingestion n'a pas été prise en compte (négligeable devant les autres voies d'exposition).

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

Tableau 22 : rappel des scénarios d'exposition retenus

Scénario retenu	Groupe de référence	Typologie	Durée d'exposition	Temps d'exposition	Individu	Voies d'exposition
Ecole la plus exposée	Ecole primaire de Grand Canal	Ecole la plus exposée	1 an	1665 h (10h/jours 37 semaines/an et 4,5 jours/semaine)	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	Exposition interne par inhalation du panache Exposition externe aux dépôts au sol
	Habitation la plus exposée (habitation 3)	Habitation la plus exposée		7095 h (le reste du temps)		
Travailleur	Zone la plus exposée (point max)	Entreprise la plus exposée		2000 h (10jours par jours x 200 j/an)	Adulte (17 ans et plus)	
	Habitation la plus exposée (habitation 3)	Habitation la plus exposée		6760 h/an (le reste du temps)		
Habitant majorant	Habitation la plus exposée (habitation 3)	Habitation la plus exposée		8 760 h/an (toute l'année)	Adulte (17 ans et plus) Bébé (enfant de 1 à 2 ans) Enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans)	

Les doses d'exposition pour les différents scénarios d'exposition sont présentées dans le tableau ci-dessous.

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	Ecole la plus exposée	Travailleur	9.7E-05	2.0E-05	1.2E-04	1	4,5*
		Enfant âgé de 10 ans	9.7E-05	1.7E-05	1.1E-04		
Scénario travailleur	Entreprise la plus exposée (point le plus exposé du domaine d'étude)	Travailleur	1.3E-04	2.4E-05	1.6E-04		
Scénario habitant majorant	Zone habitée la plus exposée	Adulte	1.1E-04	2.0E-05	1.3E-04		
		Enfant âgé de 10 ans	9.6E-05	2.3E-05	1.2E-04		
		Enfant âgé de 1 à 2 ans	9.6E-05	2.4E-05	1.2E-04		

La dose efficace totale annuelle est essentiellement associée au fluor 18 (environ 85% de contribution), la contribution des deux autres radioéléments (gallium 68 technétium 99m, lutécium 177 et zirconium 89) est négligeable.

L'exposition externe par irradiation est la voie d'exposition principale (entre 84 et 88% de contribution selon le groupe de référence et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte)).

Quel que soit le groupe de référence et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions du site en fonctionnement normal est très faible vis-à-vis de la dose admissible en France (0,014% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

ANNEXES

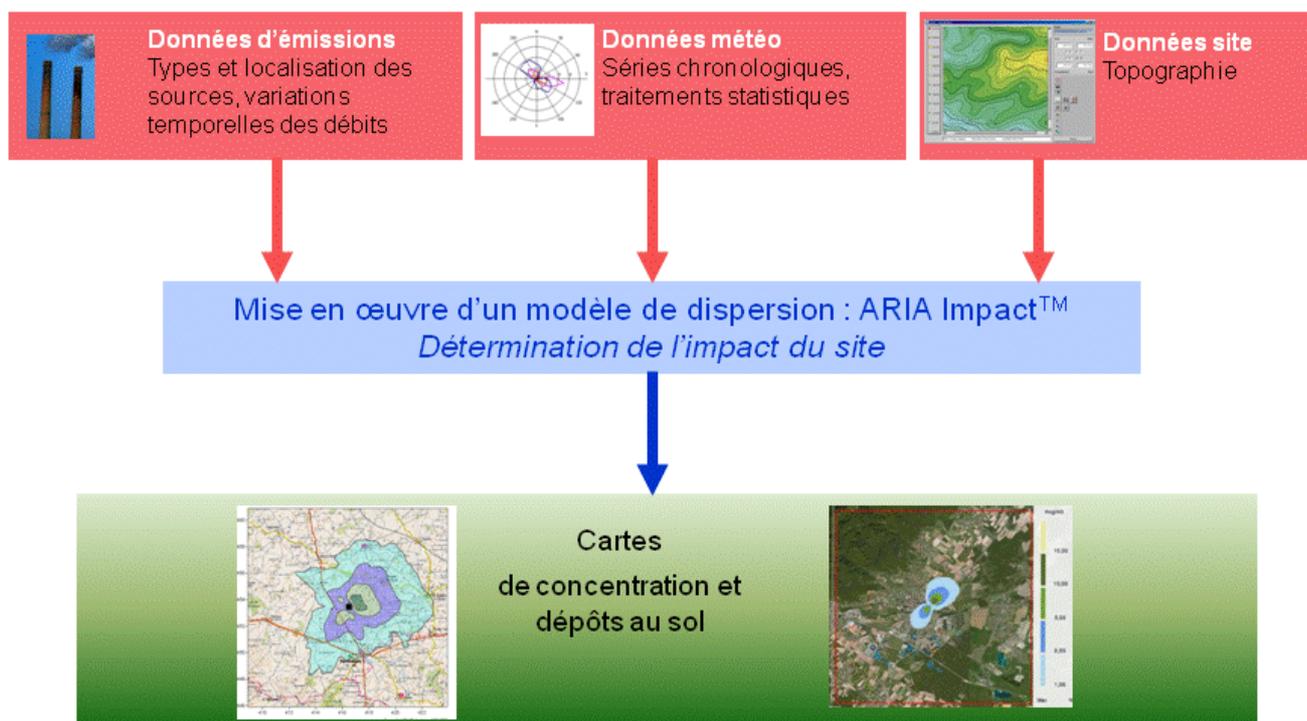
Annexe 1 : Description du modèle ARIA Impact

ARIA Impact™ est un modèle de type "gaussien", conforme aux recommandations de l'E.P.A.⁹. ARIA Impact **répond également aux prescriptions de l'INERIS** pour la modélisation de la dispersion de la pollution atmosphérique des rejets des installations industrielles (cf. Annexe 2 du Guide méthodologique INERIS : Evaluation des Risques Sanitaires liés aux substances chimiques dans l'Etude d'Impact des ICPE). C'est un logiciel de modélisation de la pollution atmosphérique qui permet de répondre à l'ensemble des éléments demandés par la législation française sur la qualité de l'air et européenne, et de fournir les éléments indispensables à :

- l'évaluation des risques sanitaires d'une installation industrielle (moyenne annuelle, centiles, dépôts),
- l'évaluation de l'impact olfactif (concentration d'odeurs, fréquences de dépassement de seuil),
- l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'air d'un aménagement routier (moyenne annuelle, centiles).

ARIA Impact™ permet d'étudier **l'impact à long terme** d'une installation en reconstruisant l'impact statistique des émissions à partir d'une chronique météorologique réelle de plusieurs années. Cette approche donne, sur de longues périodes, des résultats cohérents avec les observations des réseaux de la surveillance de la qualité de l'air pour des distances supérieures à 100 mètres.

Le schéma ci-dessous présente la démarche qui est mise en œuvre dans les études d'impact :



⁹ Agence de l'environnement américain (Environment Protection Agency).

Fonctionnalités techniques

Logiciel multi-espèces et multi-sources

ARIA Impact™ permet de modéliser la dispersion de :

- de **polluants gazeux** (NOx, SO₂...) : dispersion passive pure sans vitesse de chute ;
- de **polluants particulaires** (PM10, métaux lourds, dioxines...) : dispersion passive et prise en compte des effets gravitaires en fonction de la granulométrie. Les poussières sont représentées sur un nombre arbitraire de classes de taille : si la granulométrie des émissions est connue, des calculs détaillés peuvent être effectués.
- des **odeurs** : mélange de molécules odorantes dont la composition est inconnue, exprimée en unité d'odeur ;
- de **polluants radioactifs**.

Plusieurs types de sources et de polluants peuvent être pris en compte en même temps dans une même modélisation :

- Des **sources ponctuelles** industrielles (incinérateur, centrale thermique...),
- Des **sources diffuses** ou volumiques (atelier de peinture, carrières...),
- Des **sources linéiques** (trafic automobile).

Choix de la météorologie adaptée à la complexité de l'étude

Plusieurs types de modélisation sont possibles avec le logiciel ARIA Impact™ :

- **Modélisation pour une situation particulière** : il s'agit de modéliser la dispersion des polluants atmosphériques pour une situation météorologique fixée par l'utilisateur (modélisation pour une vitesse de vent et une direction de vent données). Ce mode de calcul peut être utilisé par exemple pour étudier un cas de dysfonctionnement associé à une situation météorologique défavorable, une phase de démarrage, ou encore pour comparer des scénarios d'émissions entre eux.
- **Modélisation statistique depuis une rose des vents** : il s'agit de modéliser la dispersion des polluants atmosphériques en prenant en compte les fréquences d'occurrence d'une rose des vents général. Il est alors possible de calculer des moyennes annuelles, le centile 100 ou des fréquences de dépassement de seuil. Ce mode de calcul est bien adapté pour les polluants gazeux et si la marche de production et d'émissions est constante sur l'année.
- **Modélisation statistique à partir d'une base météorologique complète** : il s'agit de modéliser la dispersion des polluants atmosphériques en prenant en compte une base complète de données météorologiques. Dans ce cas, un calcul académique est réalisé pour chaque échéance météorologique de la base de données. Il est alors possible de calculer des moyennes annuelles, des centiles (98, 99.5 etc...) ou des fréquences de dépassement de seuil. Les statistiques sont donc réalisées à partir de la modélisation de chaque séquence météorologique horaire sur plusieurs années (8760 situations météo sur une année) ce qui permet de bien tenir compte des variations diurnes et saisonnières des concentrations.

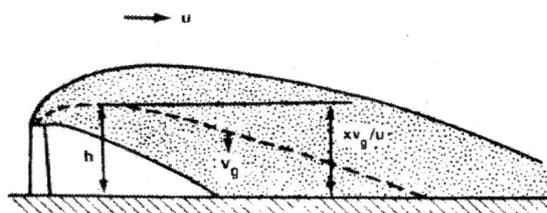
Variation temporelle des émissions

ARIA Impact™ permet de prendre en compte les variations temporelles des émissions. Les émissions peuvent varier en fonction de l'heure, du jour et du mois de l'année. Il est également possible

d'intégrer des périodes de fonctionnement particulières (arrêt technique, panne de fonctionnement du système de traitement des gaz...).

Dépôts au sol

ARIA Impact™ peut prendre en compte la chute de particules par effet gravitaire. Dans ce cas, la vitesse de chute est automatiquement calculée en fonction de la granulométrie et de la densité des particules, faisant varier l'axe d'inclinaison du panache. De plus, la vitesse de dépôt sec définie dans les caractéristiques des espèces permet de calculer les **dépôts secs**.



ARIA Impact™ permet également de prendre en compte le lessivage du panache par la pluie. Cette fonction permet de calculer les **dépôts humides** en plus des dépôts secs.

Dispersion par vents calmes

La prise en compte des vents calmes dans les calculs de dispersion implique l'utilisation d'un modèle plus performant (modèle 3D à bouffées gaussiennes). ARIA Impact™ intègre en standard un algorithme spécifique permettant de calculer l'impact des sources dans le cas de vents calmes, contrairement aux modèles gaussiens classiques.

Un vent est considéré calme lorsque la vitesse du vent est inférieure à 1 m/s.

Reconstitution de profils verticaux météorologiques

Dans le cas de cheminée, la surélévation du panache est calculée entre autres à partir de la vitesse du vent et de la température de l'air. Ces valeurs sont fournies dans la base de données météorologique. Cependant, ces données correspondent la plupart du temps à des mesures de station sol, c'est-à-dire qu'elles sont mesurées à environ 10 mètres du sol. Pourtant, les valeurs de vitesse de vent et de température observées au sommet de la cheminée peuvent varier de manière importante suivant la hauteur de celle-ci : par exemple, plus la cheminée est haute, plus la vitesse du vent est élevée au niveau du débouché.

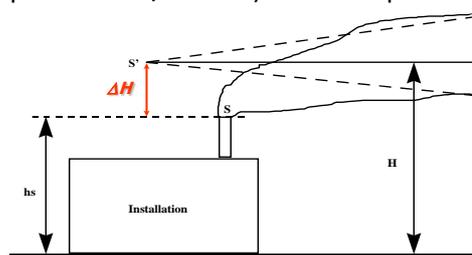
Afin de prendre en compte cette variation de vitesse de vent dans les calculs de la dispersion des polluants atmosphériques, le logiciel ARIA Impact™ peut calculer des profils verticaux de vent en fonction des mesures de vent au sol, de la turbulence atmosphérique et de l'occupation des sols, afin de connaître la vitesse du vent au niveau du débouché de la cheminée.

Prise en compte de la couche de mélange

ARIA Impact™ peut calculer la hauteur de couche de mélange à partir des données météorologiques horaires disponibles. Cette hauteur de mélange est alors prise en compte dans le calcul de dispersion par réflexion des panaches sur la couche de mélange.

Surélévation de panache issu de cheminée

Dans le cas de cheminée, lorsque les rejets sont chauds ou que la vitesse d'éjection des fumées est importante, on peut prendre en compte une surélévation du panache. En effet, les fumées de combustion vont s'élever au-dessus de la cheminée jusqu'à ce que leur vitesse ascensionnelle initiale et les effets de différence de densité (dus à la différence de température air/fumées) ne soient plus significatifs. Tout se passe comme si l'émission des rejets se faisait à une hauteur réelle d'émission (hauteur de la cheminée) augmentée de la surhauteur due aux conditions d'éjection. ARIA Impact™ prend en compte les effets de la surélévation des fumées de cheminée. Plusieurs formulations permettant de calculer la surélévation des fumées sont



codées dans ARIA Impact afin d'adapter la formule la plus adéquate au cas d'étude (Formule de Holland, Formule de Briggs, Formule de Concawe...).

Conversion des NOx en NO et NO₂

Dans le cas de la modélisation des émissions liées au trafic automobile, ARIA Impact™ contient un algorithme simple permettant de calculer les concentrations en NO et NO₂ à partir des concentrations en NOx, à l'aide de la formule de conversion de Middleton.

Prise en compte simplifiée de la topographie

ARIA Impact™ permet de prendre en compte de manière simplifiée les topographies peu marquées. Un algorithme simple permettant de prendre en compte le relief, sans faire appel à des calculs de vents tridimensionnels, peut être activé dans le module de calcul. Cet algorithme permet de rapprocher du relief l'axe du panache pour des atmosphères stables.

Envois de poussières

ARIA Impact™ contient un module spécifique pour le calcul des envolées de poussières fines, dans le cas d'un **stockage de poussières exposé au vent**.

Cette option permet d'estimer la quantité de poussières émises par une source surfacique en fonction de la rafale de vent, puis de modéliser la dispersion de ces poussières. Il peut s'agir par exemple d'un tas de charbon dont, par vent fort, les poussières fines vont s'envoler. Le calcul de la quantité émise de poussières passe par l'estimation du potentiel d'érosion du stockage, puis des facteurs d'émission fonction de la rafale de vent.

Résultats

Grandeurs calculées

ARIA Impact™ permet de calculer les grandeurs suivantes :

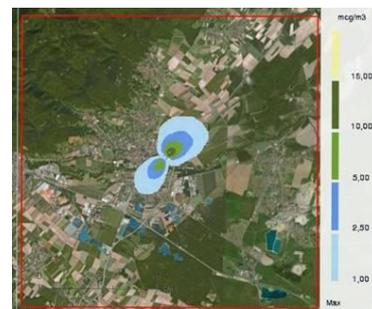
- **moyennes mensuelles et/ou annuelles** de polluant autour du site, en concentrations et dépôts au sol,
- **fréquences de dépassement de seuils** en moyennes journalières ou horaires (normes françaises et européennes),
- **centiles 98, 99.8, 100** ou autres valeurs de centiles sur une base de calcul prédéfinie (horaire, journalière, 8 heures...).

Les résultats de concentrations peuvent être exprimés en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ng/m^3 , pg/m^3 ou fg/m^3 pour les polluants classiques, en uo/m^3 pour les odeurs et en Bq/m^3 pour les polluants radioactifs.

Cartographies

Les résultats obtenus avec ARIA Impact™ peuvent être présentés sous forme cartographique au format image, mais aussi en des formats numériques **compatibles** avec la plupart des **Systèmes d'Informations Géographiques** tels que Mapinfo, ArcView ou SURFER.

Un export des résultats vers **Google Earth** permet également de visualiser les résultats sur une photo aérienne directement avec le logiciel Google Earth.



Validation du logiciel ARIA Impact™

L'association RECORD (Recherche coopérative sur les déchets et l'environnement) a demandé à l'Ecole Centrale de Lyon une étude sur les logiciels de modélisation utilisés dans le cadre des études d'impact air pour des industriels. Dans le cadre de cette étude, des comparaisons du modèle ARIA Impact™ ont été réalisées sur les cas-tests de l'outil européen d'évaluation « Model Validation kit ». Cet outil est utilisé pour évaluer les modèles de dispersion atmosphérique. Il s'agit d'une série de cas-tests intégrant des jeux de mesures de terrain qui sont largement référencés dans la validation des modèles. L'évaluation des modèles sur des cas-tests consiste à comparer les résultats d'un modèle à des mesures de terrain représentatives de situations simples. La synthèse du rapport rédigé par l'Ecole Centrale de Lyon est téléchargeable sur le site Internet de l'association RECORD¹⁰.

Les résultats de cette étude ont montré que la moyenne des concentrations modélisées sur toutes les expériences est proche de la moyenne des concentrations mesurées. D'autre part, le coefficient de corrélation de 0,6 et le pourcentage de résultats dans un facteur 2 par rapport aux mesures de l'ordre de 60% sont satisfaisants. Cette étude montre également qu'ARIA Impact™ a des résultats statistiques équivalents à ceux des autres logiciels de dispersion, dont les logiciels de référence de l'US-EPA AERMOD et ISCST3.

Le logiciel ARIA Impact™ a également fait l'objet de nombreuses comparaisons mesures/calculs dans le cadre d'études spécifiques. Certaines d'entre elles sont reprises dans le dossier de validation du logiciel ARIA Impact™, disponible sur simple demande.

Limite du modèle

ARIA Impact™ **n'est pas applicable** dans les conditions suivantes :

- **lorsque la topographie est trop importante** (zones montagneuses, reliefs pouvant modifier la trajectoire des panaches) : ARIA Impact™ considère la trajectoire du panache rectiligne. Le module spécifique à la topographie ne permet pas au panache de contourner la montagne (il passe au-dessus), ce qui n'est pas le cas en particulier en cas d'atmosphère stable ;
- **lorsque la station météorologique n'est pas représentative de la climatologie du site** : la météorologie est considérée constante sur l'ensemble du domaine d'étude. Il n'y a pas de reconstitution 3D météorologique.

Les résultats du logiciel ARIA Impact™ ne sont pas interprétables à moins de 100 mètres des sources d'émissions.

¹⁰ Rapport : « Modélisation de la dispersion des émissions atmosphériques d'un site industriel – Vers un guide de l'utilisateur - Phase 1 : Etat de l'art, Phase 2 : Evaluation des modèles », R. PERKINS, 2005
<http://www.record-net.org/record/resultetudes.php>

Annexe 2 : Méthodologie de calcul des doses par ingestion

Détermination de l'activité dans les milieux d'exposition

Activité du sol

L'activité du sol due aux dépôts est obtenue en intégrant, sur le temps de fonctionnement de l'installation, l'équation qui combine les débits de dépôt par temps sec et par temps de pluie avec les pertes par décroissance radioactive et migration dans le sol :

$$A_{\text{soldépôt}} = (Ds + Dh) \times \frac{1 - \exp [-(\lambda_m + \lambda) \times t_f]}{(\lambda_m + \lambda) \times \rho_0 \times P_r}$$

Avec :

$A_{\text{soldépôt}}$: activité du sol due aux dépôts en Bq.kg^{-1}

Ds : débit de dépôt sec en $\text{Bq.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$

Dh : débit de dépôt humide en $\text{Bq.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$

λ_m : constante de migration de l'élément dans le sol en 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).

λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s^{-1}

t_f : temps de fonctionnement de l'installation en s (50 ans dans notre cas)

ρ_0 : masse volumique du sol sec en kg.m^{-3}

P_r : profondeur de l'horizon racinaire en m

L'activité déposée sur le sol est calculée dans la 50^{ème} année d'exposition de fonctionnement de l'installation.

Les concentrations dans les sols sont calculées en prenant les hypothèses et paramétrages suivants :

- densité de sol sec : $\rho=1\ 300\ \text{kg/m}^3$
- durée d'exposition : $t_f= 50$ ans

Les concentrations dans le sol ont été calculées :

- dans la couche superficielle de **1 cm d'épaisseur**, dans les zones d'habitation et de pâturages, pour l'ingestion directe de poussières (homme et animaux),
- dans la couche superficielle de **30 cm d'épaisseur**, dans les zones d'habitations ou de culture, où sont cultivés les végétaux,
- dans la couche superficielle de **10 cm d'épaisseur** au niveau des zones de pâturage.

Activité des végétaux

Les radionucléides déposés sur le sol et sur les parties aériennes des végétaux génèrent deux grandes voies de transfert vers le végétal que sont le transfert foliaire et le transfert racinaire.

➤ Activité due au transfert foliaire ou direct

Une partie du dépôt peut être retenue par les feuilles des végétaux. Une partie des radionucléides ainsi déposés est absorbée par la surface foliaire et transférée à la partie comestible.

La fraction du dépôt retenue sur les parties aériennes du végétal est modélisée par *le rapport de captation*. On considère que le franchissement des enveloppes externes des parties aériennes du végétal s'effectue sans perte d'activité et donc que l'activité déposée sur les parties aériennes se répartit par dilution dans le végétal.

Un *facteur de translocation*, rapport de l'activité massique entre la partie comestible et la biomasse du végétal, permet d'obtenir l'activité massique dans les parties comestibles.

Entre l'instant où les particules radioactives se déposent sur le végétal et la récolte du végétal, trois phénomènes contribuent à la diminution de la radioactivité, à savoir :

- une décroissance radioactive ;
- un phénomène mécanique (lessivage par la pluie des parties aériennes du végétal) ;
- un phénomène biologique (dilution par croissance du végétal).

Ces deux derniers phénomènes sont modélisés à l'aide d'une seule constante appelée *constante de décroissance biomécanique*.

Les équations donnant la concentration dans les parties comestibles des végétaux par voie foliaire à la récolte sont les suivantes :

$$A_{\text{vég.foliaire.dépôt}} = (Ds \times Rcs + Dh \times Rch) \times F \times \frac{1 - \exp [-(\lambda_{bm} + \lambda) \times t_{\text{veg}}]}{(\lambda_{bm} + \lambda) \times r}$$

Avec :

$A_{\text{vég.foliaire.dépôt}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg⁻¹

Ds : débit de dépôt sec en Bq.s⁻¹.m⁻²

Dh : débit de dépôt humide en Bq.s⁻¹.m⁻²

Rcs : rapport de captation sec du végétal (sans unité)

Rch : rapport de captation humide du végétal (sans unité)

F : facteur de translocation (sans unité)

λ_{bm} : constante biomécanique de l'élément en s⁻¹

λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s⁻¹

t_{veg} : temps de croissance du végétal en s

r : rendement de culture en kgfrais.m⁻²

Les facteurs relatifs aux végétaux utilisés sont issus du rapport GRNC¹¹ sont présentées dans le Tableau 23.

Le Tableau 24 présente les facteurs de translocation retenus provenant du rapport GRNC¹².

Tableau 23 : facteurs relatifs aux végétaux

Unités	Rs	Rh	t _{vég} jours	r kgfrais.m ²
Légumes-racines	0.7	0.1	150	3
Légumes-feuilles	0.5	0.1	180	1.5
Légumes-fruits	0.5	0.1	180	2
Fruits	0.5	0.1	180	2
Herbe	0.7	0.1	42	1.5
Maïs ensilage	0.9	0.1	65	5
Grains	0.9	0.1	65	0.5
Foin	0.9	0.1	42	1.5

Tableau 24 : facteurs de translocation

¹¹ Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3, Annexe 8-2

¹² Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3, Annexe 8-2

Facteur de translocation	F blé/céréales (grains)	F légumes racine	F légumes fruits	F fruits	F autres végétaux	F sol/herbe
Zr-89	2.00E-02	0.00E+00	2.00E-02	2.00E-02	2.00E-02	1.00E+00
Lu-177	-	-	-	-	-	-
Tc- 99m	-	-	-	-	-	-
F-18	-	-	-	-	-	-
Ga-68	-	-	-	-	-	-

➤ Activité due au transfert racinaire ou indirect

Cette activité est calculée à partir de l'activité du sol :

$$A_{\text{vég.racinaire.dépôt}} = A_{\text{sol.dépôt}} \times F_{\text{rac}}$$

Avec :

$A_{\text{vég.racinaire.dépôt}}$: activité des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en $Bq.kg^{-1}$

$A_{\text{sol.dépôt}}$: activité surfacique déposée sur le sol $Bq.kg_{\text{sol}}^{-1}$

F_{rac} : facteur de transfert racinaire en $kg_{\text{sol}}.kg_{\text{frais}}^{-1}$

Les facteurs relatifs aux végétaux utilisés sont issus du rapport GRNC¹³ ou du rapport CEA¹⁴ et sont présentées dans le Tableau 25.

Tableau 25 : facteur de transfert racinaire en $kg_{\text{sol}}.kg_{\text{frais}}^{-1}$

unité	Frac Légumes feuilles	Frac Légumes fruits	Frac Légumes racines	Frac Céréales et maïs d'ensilage	Frac Herbe et foin
	$kg_{\text{sol}}.kg_{\text{frais}}^{-1}$				
Zr-89	1.00E-04	5.00E-03	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04
Lu-177	-	-	-	-	-
Tc- 99m	-	-	-	-	-
F-18	-	-	-	-	-
Ga-68	-	-	-	-	-

Activité des produits d'origine animale

Le transfert de la contamination aux animaux se fait par ingestion d'aliments et de sol contaminés. La voie d'atteinte par exposition interne par inhalation n'est pas retenue. Le logiciel prend en compte la fraction exogène des végétaux ingérés par les animaux. Cette fraction traduit le fait que ces végétaux peuvent provenir de zones non contaminées. La concentration dans les aliments d'origine animale est obtenue à partir de l'activité ingérée par l'animal et d'un facteur de transfert à l'aliment d'origine animale :

$$A_{\text{animal}} = [(\sum A_{\text{veg}} \times Q_{\text{veg}} \times (1 - Ex) \times \frac{D_{\text{conso}}}{12} \times \exp(-\lambda \times T_{\text{stock}}) + A_{\text{sol}} \times Q_{\text{sol}}] \times F_{\text{animal}}$$

Avec :

$$\sum A_{\text{veg}} = A_{\text{vég.foliaire}} + A_{\text{vég.racinaire}}$$

¹³ Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3, Annexe 8-2

¹⁴ DAPNIA/SENAC/G/06-216/NT, PROJET ARRONAX ETUDE D'IMPACT DES REJETS ATMOSPHERIQUES EN FONCTIONNEMENT NORMAL

$A_{\text{vég,foliaire}}$: activité massique des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en Bq.kg^{-1}
 $A_{\text{vég,racinaire}}$: activité massique des parties comestibles du végétal due au transfert racinaire en Bq.kg^{-1}
 A_{animal} : activité des parties comestibles de l'animal due au transfert vers l'animal en Bq/kg
 $Q_{\text{vég-animal}}$: consommation de végétal par l'animal kgfrais.j^{-1}
 A_{sol} : activité massique du sol en Bq.kg^{-1}
 Q_{sol} : consommation de sol par l'animal kgfrais.j^{-1}
 Ex : fraction exogène du végétal (sans unité) ($Ex=0$: il est fait l'hypothèse qu'ils proviennent uniquement de la zone contaminée)
 D_{conso} : Durée de consommation en mois
 λ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s^{-1}
 T_{stock} : temps de durée de stockage du végétal en s
 F_{animal} : facteur de transfert au produit animal en Bq.kgfrais^{-1} par Bqinqéré.j^{-1}

Les paramètres retenus sont les suivants (données issues du rapport GRNC¹⁵) :

Tableau 26 : Rations alimentaires journalières des animaux et ingestion de sol par inadvertance en kg.j^{-1}

	Foin	Herbe	Mais	Terre
Bœuf	5	60	35	0.7
Volaille	-	-	0.06	0.01

Tableau 27 : durée de consommation et de stockage des végétaux

	Durée de consommation en mois (Dconso)		Durée de stockage en mois
	Bœuf	Volaille	
Mais	-	12	3
Herbe	8	-	0
Foin	4	-	5

L'activité du lait de la vache est donnée par l'équation suivante :

$$A_{\text{lait}} = A_{\text{vache}} \times F_{\text{vache_lait}}$$

Avec :

A_{lait} : activité massique du lait en Bq. L^{-1}

A_{vache} : activité massique de la vache Bq.kg^{-1}

$F_{\text{vache-lait}}$: facteur de transfert de la vache au lait en kg. L^{-1}

Les facteurs sont issus du rapport GRNC¹⁶ pour le Be7 et du rapport AIEA¹⁷ et sont présentées dans le Tableau 28.

Tableau 28 : facteur de transfert au produit animal en Bq.kgfrais^{-1} par Bqinqéré.j^{-1}

¹⁵ Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

¹⁶ Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

¹⁷ IAEA. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical reports series no. 472. 2010

Radionucléides	F _{boeuf}	F _{porc}	F _{lait}	F _{volaille}	F _{oeuf}
unité	<i>Bq.kgfrais⁻¹ par Bqingéré.j⁻¹</i>				
Zr-89	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-03	1.00E-03
Lu-177	-	-	-	-	-
Tc- 99m	-	-	-	-	-
F-18	-	-	-	-	-
Ga-68	-	-	-	-	-