

# ARRONAX

## Etude de dispersion et Evaluation des risques sanitaires liés aux rejets atmosphériques du GIP ARRONAX de Saint Herblain (44)

### Fonctionnement normal

**Références** : Rapport ARIA/2023.002

**Documents associés** : Rapport ARIA/2019.021

**Type de document** : Rapport d'études

**Avancement du document** : Version 2

**Accessibilité** : Restreint

<b>ARIA Technologies</b>	<b>Titre : Cyclotron ARRONAX - Etude de dispersion et Evaluation des risques sanitaires liés aux rejets atmosphériques- Fonctionnement normal</b>						
<b>N° rapport ARIA</b>	23.002						
<b>N° action ARIA</b>	22.239						
<b>Nombre de pages</b>	91	<b>Nombre de figures</b>	23	<b>Nombre de tableaux</b>	32	<b>Nombre d'annexes</b>	6
<b>Auteur(s)</b>	ARIA Technologies, Anne-Sophie SAFFRE Ingénieure Chef de projet Qualité de l'Air -Responsable Diagnostics Industriels						
<b>Sous-traitants</b>	-						
<b>Intérêt documentaire</b>	Accessibilité		Confidentielle		Libre		
Oui		Non	ARIA Technologies		Restreinte		
<b>Etat du document</b>	<b>Rédacteurs Nom/Date</b>			<b>Relecteur Nom/Date</b>			
Version V1	Anne-Sophie SAFFRE Le 01/02/2023			Anne-Sophie SAFFRE Le 15/02/2023			
Version V2	Anne-Sophie SAFFRE et Aude HERVOUIN Le 16/03/2023			Anne-Sophie SAFFRE Le 27/02/2023			
<b>Diffusion</b>	<b>Date</b>	<b>Destinataires</b>					<b>Nombre</b>
Diffusion informatique	30/03/2023	Cyclotron ARRONAX					-

---

## SOMMAIRE

---

<b>1. CADRE DE L'ETUDE .....</b>	<b>7</b>
<b>2. METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE .....</b>	<b>8</b>
<b>3. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR .....</b>	<b>9</b>
3.1 Composés étudiés.....	10
3.2 Concentrations et flux à l'émission .....	10
<b>4. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION .....</b>	<b>11</b>
4.1 Domaine d'étude.....	11
4.2 Populations .....	12
4.3 Populations sensibles et installations sportives .....	12
1.1 Usages autour du site .....	14
4.3.1 Usages agricoles .....	15
4.3.2 Activité de loisirs.....	16
4.3.3 Recensement des points d'eau.....	16
4.4 Météorologie.....	17
4.4.1 Données météorologiques .....	17
4.4.2 Analyse météorologique.....	17
<b>5. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE .....</b>	<b>22</b>
5.1 Méthodologie et modèle utilise .....	22
5.2 Données d'entrée .....	24
5.2.1 Domaine d'étude .....	24
5.2.2 Obstacles .....	25
5.2.3 Topographie.....	26
5.2.4 Météorologie .....	27
5.2.5 Emissions .....	27
5.3 Paramétrages du modèle.....	27
5.3.1 Maillage .....	27
5.3.2 Surélévation du panache .....	27
5.3.3 Autres paramètres de calcul.....	27
5.4 Détermination des concentrations dans l'air et des dépôts au sol .....	28
5.4.1 Présentation des résultats.....	28
5.4.2 Concentrations en moyenne annuelle .....	30
5.4.3 Dépôts au sol .....	33
<b>6. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE .....</b>	<b>35</b>
6.1 Identification des dangers.....	35
6.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations.....	35
6.1.2 Relation Dose-Réponse .....	36
6.2 Schéma conceptuel d'exposition.....	37
6.2.1 Voies d'exposition .....	37
6.2.2 Schéma conceptuel d'exposition.....	37
6.3 Estimation des doses d'exposition .....	38
6.3.1 Scénario d'exposition .....	38
6.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation).....	40
6.3.3 Exposition interne par inhalation .....	42
6.3.4 Exposition interne par passage transcutané .....	44
6.3.5 Exposition interne par ingestion.....	45

<b>6.4</b>	<b>Evaluation des risques</b> .....	<b>52</b>
6.4.1	Méthodologie .....	52
6.4.2	Evaluation des risques sanitaires.....	52
<b>6.5</b>	<b>Incertitudes</b> .....	<b>56</b>
6.5.1	Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique.....	56
6.5.2	Incertitudes relatives à l'évaluation des risques sanitaires.....	58
<b>7.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>59</b>
<b>ANNEXES</b>	.....	<b>61</b>
<b>Annexe 1</b>	<b>: Détermination des rejets</b> .....	<b>62</b>
<b>Annexe 2</b>	<b>: Note prise en compte Kiube</b> .....	<b>67</b>
<b>Annexe 3</b>	<b>: Description du terme source (ARIA_Nouveau terme source_v5_23122019.pdf)</b> .....	<b>69</b>
<b>Annexe 4</b>	<b>: Description du logiciel MSS</b> .....	<b>72</b>
<b>Annexe 5</b>	<b>: Résultats de calcul des doses par ingestion</b> .....	<b>83</b>
<b>Annexe 6</b>	<b>: Résultats de calcul des doses par radioéléments et par cibles</b> .....	<b>86</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

### TABLEAUX

Tableau 1 : Terme source actualisé en fonctionnement pénalisant sur une année : 6000h et tirs haute intensité 200 $\mu$ A .....	9
Tableau 2 : émissions prises en compte .....	10
Tableau 3 : données de population (Source : Insee, Recensements de la population, mis en ligne le 27/12/2018) .....	12
Tableau 4 : recensement agricole 2010 (recensement le plus récent disponible : <a href="http://recensement-agricole.agriculture.gouv.fr/">http://recensement-agricole.agriculture.gouv.fr/</a> ) .....	16
Tableau 5 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent toutes directions confondues .....	18
Tableau 6 : paramètres de calcul des dépôts pour chacune des espèces étudiées .....	28
Tableau 7 : concentrations en moyenne annuelle en radionucléides (Bq/m <sup>3</sup> ) .....	30
Tableau 8 : dépôts annuels en radionucléides (Bq/m <sup>2</sup> /s) .....	33
Tableau 9 : scénarios retenus .....	39
Tableau 10 : Coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe .....	41
Tableau 11 : dose d'exposition par irradiation (mSv/an) .....	42
Tableau 12 : volumes d'air inhalés .....	43
Tableau 13 : coefficient de dose efficace en Sv.Bq <sup>-1</sup> (CD <sub>inh</sub> ) .....	43
Tableau 14 : dose d'exposition par inhalation (mSv/an) .....	44
Tableau 15 : dose d'exposition par passage transcutané (mSv/an) .....	45
Tableau 16 : facteurs relatifs aux végétaux .....	47
Tableau 17 : facteurs de translocation .....	47
Tableau 18 : facteur de transfert racinaire en kgsol .kgfrais <sup>-1</sup> .....	48
Tableau 19 : Rations alimentaires journalières des animaux et ingestion de sol par inadvertance en kg.j <sup>-1</sup> .....	48
Tableau 20 : durée de consommation et de stockage des végétaux .....	49
Tableau 21 : facteur de transfert au produit animal en Bq.kgfrais <sup>-1</sup> par Bqingéré.j <sup>-1</sup> .....	49
Tableau 22 : facteur de concentration au végétal pour le tritium .....	50
Tableau 23 : facteur de concentration au produit animal pour le radionucléide considéré en m3.kg-1 .....	50
Tableau 24 : paramètres relatifs aux différentes catégories d'âge (données INERIS) .....	51
Tableau 25 : fraction d'aliments auto-produits (données INERIS) .....	51
Tableau 26 : dose efficace par ingestion (mSv/an) .....	52
Tableau 27 : doses efficace totale (mSv/an) .....	53
Tableau 28 - Terme source actualisé en fonctionnement pénalisant sur une année : 6000h et tirs haute intensité 200 $\mu$ A .....	71
Tableau 29 : dose efficace par ingestion – groupe de référence Habitation la plus exposée .....	84
Tableau 30 : dose efficace par ingestion – groupe de référence Ecole .....	84
Tableau 31 : dose efficace par ingestion – groupe de référence Habitation la plus exposée .....	84
Tableau 32 : dose efficace par voie d'exposition .....	87

### FIGURES

Figure 1 : carte du domaine d'étude .....	11
Figure 2 : localisation des populations sensibles et des équipements sportifs .....	13
Figure 3 : occupation du sol (données CORINE Land Cover 2012) .....	14
Figure 4 : zones de cultures .....	15
Figure 5 : localisation des captages d'eau .....	16
Figure 6 : rose des vents générale – Station Nantes Atlantique – 2018 .....	18
Figure 7 : rose des vents normale – Station Nantes Atlantique – 1991-2010 .....	19

Figure 8 : répartition des cas météorologiques en fonction de la stabilité atmosphérique .....	20
Figure 9 : variation moyenne mensuelle de la pluviométrie (période du 01/01/2018 au 31/12/2018) .....	20
Figure 10 : variation moyenne mensuelle de la température (période du 01/01/2018 au 31/12/2018) .....	21
Figure 11 : Méthodologie mise en œuvre .....	23
Figure 12 : carte du domaine d'étude .....	24
Figure 13 : bâtiments sur la zone d'étude .....	25
Figure 14 : visualisations 3D des obstacles .....	26
Figure 15 : topographie du domaine d'étude .....	26
Figure 16 : localisation des points cibles (groupes de référence) .....	29
Figure 17 : carte de concentration en moyenne annuelle en carbone 11 en Bq/m <sup>3</sup> .....	31
Figure 18 : vue des concentrations en moyenne annuelle en carbone 11 en Bq/m <sup>3</sup> .....	32
Figure 19 : carte de dépôts en carbone 11 en Bq/m <sup>2</sup> au bout d'un an.....	34
Figure 20 : schéma conceptuel d'exposition .....	38
Figure 21 : dose efficace totale par radioéléments – scénario Habitant le plus exposé (Mas Horizon).....	54
Figure 22 : répartition de la dose par type d'exposition .....	55
Figure 23 : lignes de courant et concentration en SF6 à 4h10, 4h20 et 4h30.....	57

## 1. CADRE DE L'ETUDE

Dans le cadre de sa demande d'autorisation, ARRONAX a demandé à ARIA Technologies de réaliser une étude de dispersion afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques en radionucléides du cyclotron de Saint Herblain (44) sur les riverains présents autour du site, en fonctionnement normal et accidentel des installations du site. Ce travail a fait l'objet du rapport ARIA/2019.021.

Le présent document s'inscrit dans la continuité. Il tient compte de l'ensemble des remarques de l'avis IRSN n°2°21-00134 ainsi que l'évolution des bonnes pratiques pour la réalisation de ce type d'études depuis 2019. Il inclut aussi le nouveau projet du GIP ARRONAX qui souhaite installer un nouveau système de production de radionucléides pour des applications médicales dans sa zone réglementée sur son site de Saint Herblain (44) en France. Ce nouveau système comprend notamment l'implantation d'un cyclotron 15-20 MeV dans une casemate existante et une station d'irradiation de cible solide muni d'un système de transfert permettant de récupérer de manière sécurisée les matières irradiées à destination des enceintes blindées de traitement déjà existante (projet IK18). Ce nouvel équipement sera utilisé notamment pour la production de  $^{64}\text{Cu}$  de manière quotidienne et pourra être utilisé pour une production industrielle de  $^{18}\text{F}$  par une entité partenaire.

Afin de préciser le terme source, une note de calcul dénommée « Détermination des rejets pour le projet IK18 » permettant d'estimer les rejets radioactifs liés à l'exploitation d'un cyclotron 18 MeV au sein du GIP ARRONAX a été établie et se trouve en Annexe 1. Il a été constaté que l'azote 13 ajouté par le fonctionnement de IK18 est très négligeable par rapport aux rejets du C70. Pour l'Argon 41, l'augmentation de rejet est de l'ordre de 10 %. Cependant, l'impact dosimétrique de l'Ar41 est faible devant les autres radionucléides. Il a donc été conclu que l'ajout de ces rejets en fonctionnement normal n'impacte pas de manière significative le terme source initial lié à l'utilisation du cyclotron C70 seul et que ces valeurs ne remettent pas en cause les résultats de l'étude d'impact réalisée en 2019 pour l'exposition de la population (cf. Annexe 2).

Il a été établi sur la base des informations transmises à ARIA Technologies, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives de la réglementation, en vigueur au moment de la réalisation du dossier.

La responsabilité d'ARIA Technologies ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été fournies sont incomplètes ou erronées.

## 2. METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE

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

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

- En adaptant la méthodologie INERIS « Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires – Démarche intégrée pour la gestion des émissions des substances chimiques par les installations classées » (août 2013 mis à jour en septembre 2021) en application de la circulaire DGPR & DGS du 9 août 2013 ;
- Sur la base des données disponibles dans l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultants de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants ;
- En suivant les préconisations du guide IRSN pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation Cyclotron (Rapport IRSN N° 2022-00193).

Les étapes constituant la démarche sont les suivantes :

1. Evaluation des émissions de l'installation : caractérisation des émissions du site ;
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 prospective des risques sanitaires :
  - a. estimation de la dose efficace totale annuelle générée par les émissions du site ;
  - b. comparaison de la dose efficace annuelle à la valeur limite d'exposition définie par la réglementation et au niveau ambiant mesuré dans l'environnement du site ;
  - c. analyse des incertitudes.

### 3. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR

Le terme source des rejets atmosphériques en fonctionnement normal a été évalué par ARRONAX<sup>1</sup>.

Les conditions d'irradiations au sein du GIP ARRONAX sont variables au cours du temps. Cependant, les rejets sont majoritairement issus des radionucléides produits durant la phase de tir de production de strontium (haute intensité, haute énergie et longue durée) et durant la radiochimie en enceinte blindée pour extraire le strontium. Le fonctionnement du cyclotron C70 du GIP ARRONAX génère donc des effluents radioactifs provenant de trois modes de production :

- Activation de l'air en casemate de réaction par les neutrons secondaires. Ces rejets sont collectés par la CTA 3 de notre Centrale de Traitement d'Air.
- Activation de l'eau de refroidissement des cibles par les protons du faisceau primaire et dans une moindre mesure de l'activation de l'air par les neutrons produits par les pertes faisceaux lors de l'accélération. Ces rejets sont collectés par la CTA 4 de notre Centrale de Traitement d'Air.
- Radiochimie d'extraction du strontium. Ces rejets sont collectés par l'extracteur des enceintes blindées.

Ces modes de production ont été pris en compte pour estimer le terme source à partir de calculs de type Monte-Carlo et de calculs utilisant les sections efficaces de production.

Dans une perspective d'évolution du fonctionnement du cyclotron, il a été considéré un terme source basé sur les rejets actuels majorés par un facteur 2.2 pour prendre en compte un temps de fonctionnement de 6000 hrs à 200  $\mu$ A pour les tirs haute intensité (actuellement le mode de fonctionnement est basé sur un fonctionnement de 4000 heures sous 137  $\mu$ A pour les tirs haute intensité)

**Tableau 1 : Terme source actualisé en fonctionnement pénalisant sur une année : 6000h et tirs haute intensité 200 $\mu$ A**

Terme source V5 en fonctionnement pénalisant (6000hrs et 200 $\mu$ A)													
Radionucléide		H3	Be7	C11	N13	N16	O15	S35	Ar37	Ar39	Ar41	Kr79	Kr83m
Période		12,32 a	53,22 j	20,36 m	9,97 m	7,16 s	122,24 s	87,37 j	35,04 j	269 j	109,61 m	35,04 h	1,83 h
Activité Gaines Bq	Tirs hautes intensité	6,28E+09	2,87E+09	3,78E+13	4,62E+13	3,27E+13	9,61E+12	1,12E+05	5,62E+05	4,14E+05	1,14E+10		
Activité cheminée Bq	Radiochimie	1,01E+11										2,96E+13	1,42E+13
Total en Bq		1,07E+11	2,87E+09	3,78E+13	4,62E+13	3,27E+13	9,61E+12	1,12E+05	5,62E+05	4,14E+05	1,14E+10	2,96E+13	1,42E+13
Total Rn sup à 100jrs		1,07E+11											
Total Rn inf à 100jrs		1,70E+14											

Le détail du terme source est présenté en Annexe 3.

A noter que la cheminée est dotée de deux filtres THE (très haute efficacité) en série. Le premier est supposé avoir une efficacité de 99.9%, le second de 99%. Cela implique que pour tenir compte de la filtration, l'activité rejetée des radionucléides émis sous forme d'aérosols doit être réduite d'un facteur de 10<sup>-5</sup>.

Cependant, dans une approche majorante, la filtration n'est pas considérée lors de rejets continus et ce quel que soit le radionucléide.

<sup>1</sup> GIP ARRONAX. ARIA\_Nouveau terme source\_v5\_23122019

L'azote et le soufre sont considérés sous forme gazeuse.

Le tritium est considéré sous la forme de vapeur d'eau tritiée, donc sous une forme ne pouvant pas être arrêtée par les filtres (les mesures réalisées sur site montrent que l'eau tritiée représente en moyenne 60% des rejets en tritium).

A noter que l'azote 16 ne sera pas retenu compte tenu de sa période très faible (moins de 10 s).

### 3.1 COMPOSES ETUDIES

Les composés étudiés correspondent aux radioéléments du spectre du terme source à savoir :

- H3 (sous forme HTO)
- Be7
- C11
- N13
- O15
- S35
- Ar37
- Ar39
- Ar41
- Kr79
- Kr83m

### 3.2 CONCENTRATIONS ET FLUX A L'EMISSION

Les informations relatives aux sources et aux flux d'émissions ont été transmis par le Client. Les caractéristiques de la cheminée ainsi que les émissions sont détaillées dans le Tableau 2.

*Tableau 2 : émissions prises en compte*

	Unités	Cheminée
<b>Coordonnée X (UTM30)</b>	km	602,759
<b>Coordonnée Y (UTM30)</b>	km	5232,190
<b>Hauteur /sol</b>	m	13,02
<b>Surface</b>	m <sup>2</sup>	7,92
<b>Diamètre équivalent</b>	m	3,18
<b>Température des rejets</b>	°C	20
<b>Vitesse d'éjection</b>	m/s	1.76
<b>Nombre d'heures de fonctionnement sur l'année</b>	h	6000
<b>Emissions en</b>		
<b>H3 (sous forme HTO)</b>		1.07E+11
<b>Be7</b>		2.87E+09
<b>C11</b>		3.78E+13
<b>N13</b>		4.62E+13
<b>O15</b>		9.61E+12
<b>S35</b>		1.12E+05
<b>Ar37</b>		5.62E+05
<b>Ar39</b>		4.14E+05
<b>Ar41</b>		1.14E+10
<b>Kr79</b>		2.96E+13
<b>Kr83m</b>		1.42E+13

## 4. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION

Le site se trouve sur la commune de Saint Herblain (Loire-Atlantique) à proximité du CHU Nord Laennec.

### 4.1 DOMAINE D'ETUDE

Le domaine d'étude retenu est un carré de 2 km de côté centré sur le site.

*Figure 1 : carte du domaine d'étude*



## 4.2 POPULATIONS

Le Tableau 3 indique les données de population pour la commune de Saint Herblain.

Tableau 3 : données de population (Source : Insee, Recensements de la population, mis en ligne le 27/12/2018)

Dép.	Communes	Surface de la commune (km <sup>2</sup> )	Population légale en 2016	Densité de population (hab/km <sup>2</sup> )	de 2016	Population principale en 2015 pour les 0 – 10 ans
44	Saint Herblain	30,02	47502	1 582		6499

## 4.3 POPULATIONS SENSIBLES ET INSTALLATIONS SPORTIVES

Conformément au guide méthodologique INERIS de 2013, sont recensés autour du site :

- les populations sensibles et vulnérables (enfants, personnes âgées, malades) : crèches, établissements scolaires, maisons de retraite, centre de soins ;
- les installations recevant du public (terrains de sport,...).

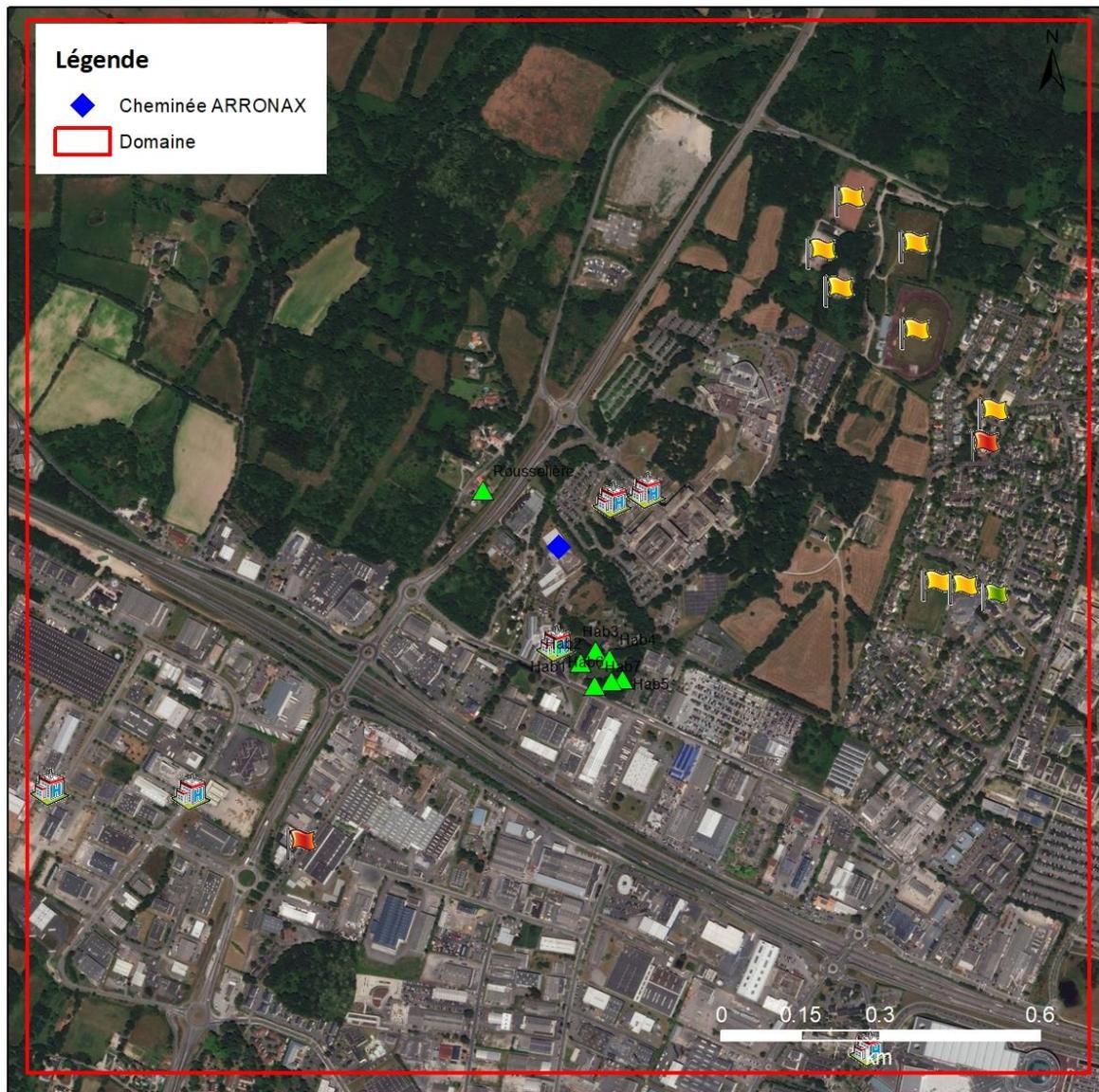
Dans le domaine d'étude sont recensés :

- 2 structures multi-accueil (crèche, halte-garderie) (Source : [lescreches.fr](http://lescreches.fr)) :
  - Crèche de la Bergerie – 2 rue de la Bergerie, Saint Herblain ;
  - Crèche Milk And Biscuits, 15 Rue Olympe de Gouges, Saint Herblain ;
- 1 groupe scolaire (source : annuaire de l'éducation nationale <http://www.education.gouv.fr/>) : groupe scolaire René-Guy Cadou
- 5 établissements sanitaires et sociaux (Source : FINESS<sup>2</sup>) :
  - CHU Nord Laennec ;
  - Institut de Cancérologie de l'Ouest (ICO) - Site René Gauducheau ;
  - Maison d'accueil spécialisée Horizon ;
  - ESAT CATOUEST ;
  - Institut Médico-éducatif Val-Lorie ;
- 8 équipements sportifs (Source : <http://www.res.sports.gouv.fr/>).

La Figure 2 localise ces sites.

<sup>2</sup> Fichier National des Etablissements Sanitaires et Sociaux

Figure 2 : localisation des populations sensibles et des équipements sportifs



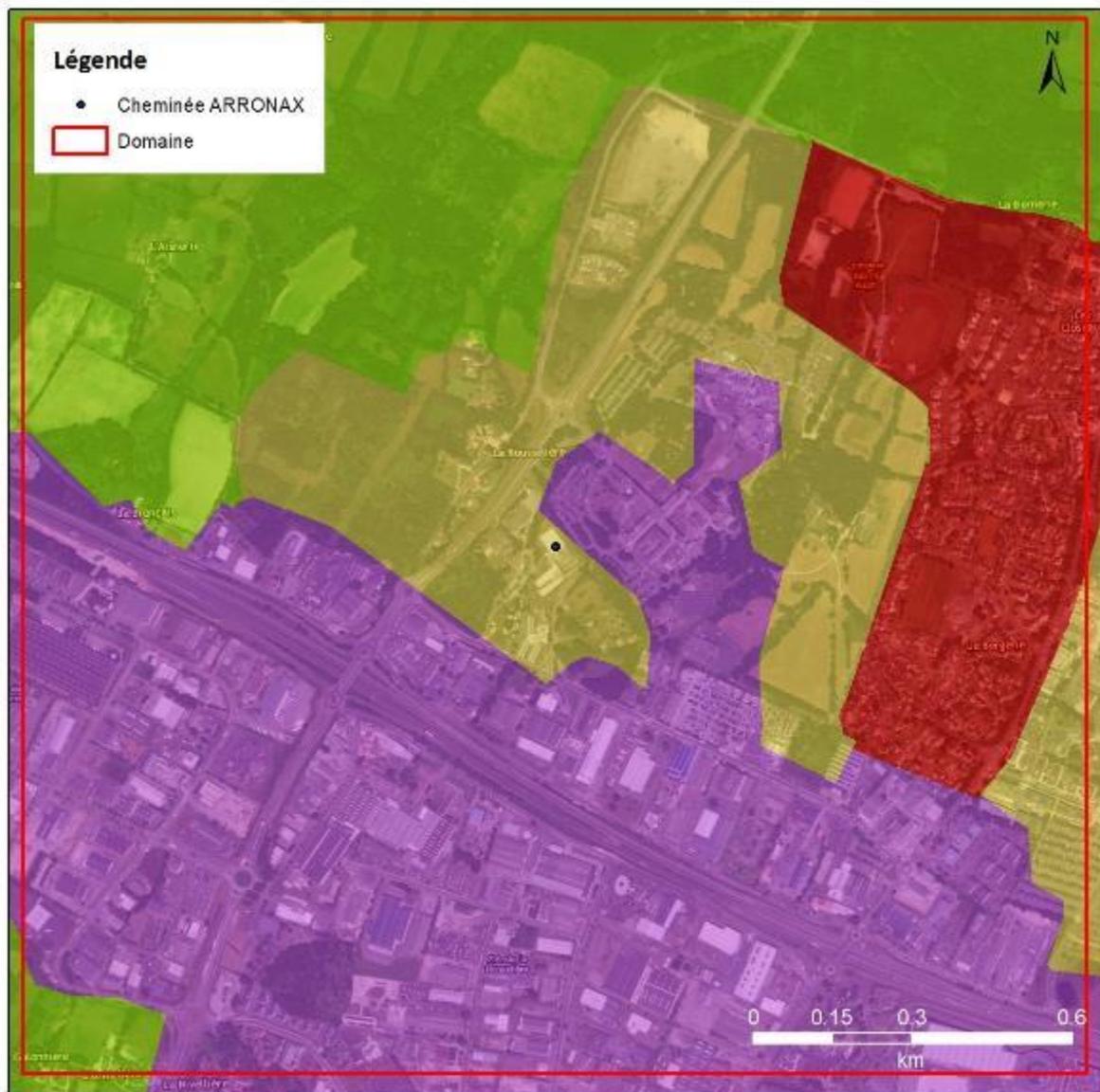
-  Sports
-  Ecoles
-  Santé
-  Crèches
-  Habitations les plus proches



## 1.1 USAGES AUTOUR DU SITE

Comme le montre la Figure 3 (données CORINE Land Cover 2012 d'occupation du sol), le site se trouve dans une zone urbanisée. Le domaine d'étude est principalement composé de tissu urbain et de zones industrielles, mais quelques zones de culture sont également présentes au nord et à l'ouest du site.

*Figure 3 : occupation du sol (données CORINE Land Cover 2012)*



### Occupation des sols (Corine Land Cover 2012)

- 112 : Tissu urbain discontinu
- 121 : Zones industrielles ou commerciales et installations publiques
- 231 : Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole
- 242 : Systèmes culturaux et parcellaires complexes



### 4.3.1 Usages agricoles

Comme le montre la Figure 3, même si le site se trouve dans une zone péri-urbaine, des zones de cultures se trouvent à proximité.

*Figure 4 : zones de cultures*



#### Registre Parcellaire Agricole 2012

- Fourrage
- Prairies Permanentes
- Prairies Temporaires
- Autres Céréales



Le Tableau 4 présente les résultats du recensement général agricole 2010. Le recensement agricole offre un portrait instantané, complet et détaillé, du secteur de l'agriculture (population agricole, surfaces végétales, y compris viticoles, effectifs animaux, moyens de production, activités annexes, etc.).

Tableau 4 : recensement agricole 2010 (recensement le plus récent disponible : <http://recensement-agricole.agriculture.gouv.fr/>)

Communes	Orientation technico-économique de la commune	Exploitations agricoles ayant leur siège dans la commune	Cheptel en unité de gros bétail, tous aliments	Superficie agricole utilisée en hectare	Superficie en terres labourables en hectare	Superficie en cultures permanentes en hectare	Superficie toujours en herbe en hectare
Saint Herblain	Fleurs et horticulture diverse	4	54	71	s	0	0

s : donnée soumise au secret statistique.

### 4.3.2 Activité de loisirs

Aucune zone de baignade officielle en rivière ou en mer n'a été recensée dans le domaine d'étude (source : Ministère de la Santé/Baignades).

### 4.3.3 Recensement des points d'eau

La Figure 5 localise les captages d'eau destinée à la consommation humaine, captages en eau souterraine et en eau de surface continentale (rivières, lacs) situés dans le domaine d'étude. Ces données sont issues du référentiel des captages AEP (Alimentation en Eau Potable), disponible sur le site <http://www.adeseaufrance.fr/>. Le référentiel des captages d'eau souterraine est élaboré à partir de champs issus d'une part de la base de données du ministère en charge de la Santé SISE-Eaux (Système d'information en santé environnement sur les eaux) et d'autre part de ceux de la banque de données du BRGM BSS EAU (Banque du Sous-sol Eau).

Aucun captage d'eau AEP destinée à la consommation humaine n'est présent dans le domaine d'étude. Le captage le plus proche se trouve à 3,4 km à l'est du site.

Deux points PRV (adduction collective privée) se trouvent à environ 3 km du site.

*Figure 5 : localisation des captages d'eau*



## 4.4 METEOROLOGIE

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

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

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

### 4.4.1 Données météorologiques

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

- 1. sa position géographique** : la station retenue doit être la plus proche possible de l'installation et il ne doit pas exister d'obstacle majeur entre la station et la zone d'étude.
- 2. la cadence d'acquisition des données météorologiques** : Météo France possède des stations où les relevés sont faits toutes les heures et d'autres tous les jours. Pour notre étude, nous avons besoin de données météorologiques suffisamment fines au niveau horaire pour avoir une bonne représentativité de la météorologie locale et pour prendre en compte les phénomènes météorologiques diurnes. Il est habituel d'utiliser des bases de données météorologiques comportant des données concernant le vent, la température et la nébulosité toutes les 3 heures pendant plusieurs années. Les stations « journalières » sont donc éliminées.
- 3. la pertinence des données météorologiques.**

Les données météorologiques proviennent de la station Météo-France de Nantes Atlantique pour les mesures de vent (direction et vitesse), de température, de nébulosité et de pluie. Cette station est située à environ 9 km du site.

Les données météorologiques utilisées sont des mesures horaires (1 mesure toutes les heures). Ce fichier comporte une année de mesures : du 01/01/2018 au 31/12/2018.

### 4.4.2 Analyse météorologique

#### 4.4.2.1 Roses des vents

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

La Figure 6 présente la rose des vents générale pour la station de Nantes Atlantique calculées à partir des données horaires sur la période 01/01/2018 au 31/12/2018. Le Tableau 5 synthétise les fréquences d'occurrence par classe de vitesse, toutes directions confondues. Les classes de vitesses de vent retenues sont celles présentées par Météo-France sur la rose décennale (cf. Figure 7).

Figure 6 : rose des vents générale – Station Nantes Atlantique – 2018

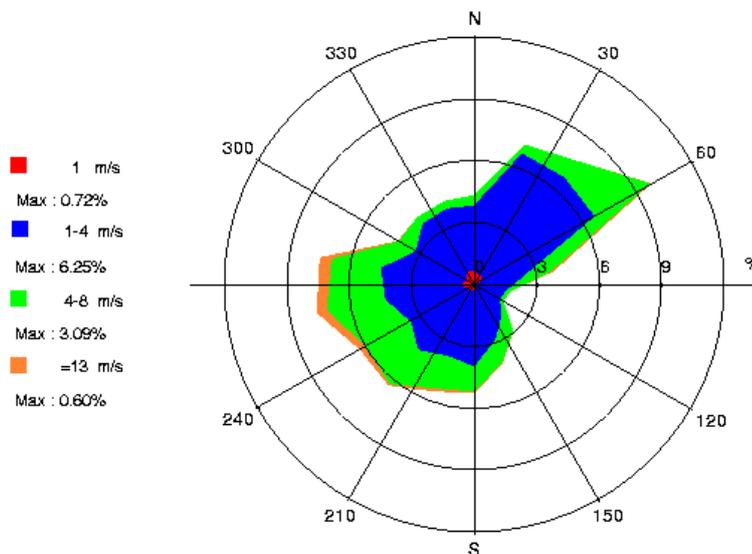


Tableau 5 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent toutes directions confondues

Classe de vitesse (m/s)	calmes	1	1-4	4-8	>=8
Borne de l'intervalle	[0 ; 0,9[	[0,9 ; 1,5[	[1,5 ; 4,5[	[4,5 ; 8[	[8 ; ∞[
Fréquence (%)	5.4%	6.6%	62.5%	22.3%	3.3%

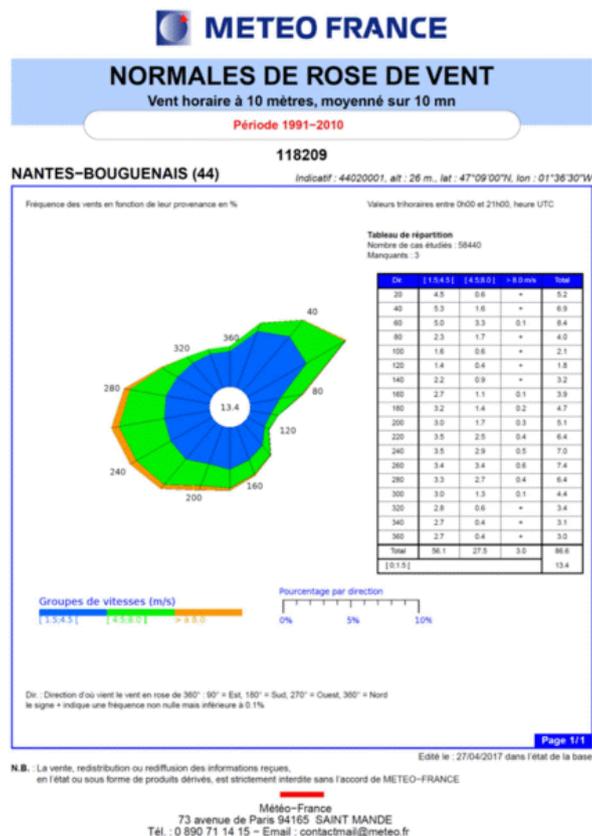
Sur la période retenue pour cette étude (du 01/01/2018 au 31/12/2018), les principaux résultats de cette analyse sont les suivants :

- les roses des vents montrent trois directions privilégiées :
  - vents de secteur **ouest-sud ouest** (39 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 220° et 300°<sup>3</sup>),
  - une direction secondaire : vents du **nord-est** (21% des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 20° et 80°),
  - une direction secondaire : vents du **sud** (18,1 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 140° et 220°).
- Les vents les plus fréquents sont les vents de vitesse comprise entre 3 et 6 m/s. Ces vents proviennent principalement des secteurs ouest, sud et nord-est. Les vents ont une vitesse moyenne de 11,7 km/h (3,3 m/s).
- Les vents forts (vitesse supérieure à 7 m/s) proviennent principalement du secteur ouest.
- Les vents faibles (vitesse inférieure à 1,5 m/s) sont assez fréquents puisqu'ils représentent 12 % des observations, dont 5,4 % de vents calmes (inférieures à 0,5 m/s).

<sup>3</sup> Les directions du vent sont données en degrés par rapport au Nord et indiquent la direction d'où vient le vent (convention météorologique internationale). Un vent de 0° est donc un vent venant du Nord, un vent de 180° est un vent venant du Sud.

La rose des vents de l'année 2018 est très semblable à la rose des vents normale 1991-2010 présentée sur la Figure 7. L'année 2018 est donc représentative des conditions météorologiques sur la zone d'étude.

Figure 7 : rose des vents normale – Station Nantes Atlantique – 1991-2010



#### 4.4.2.2 Stabilité atmosphérique

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

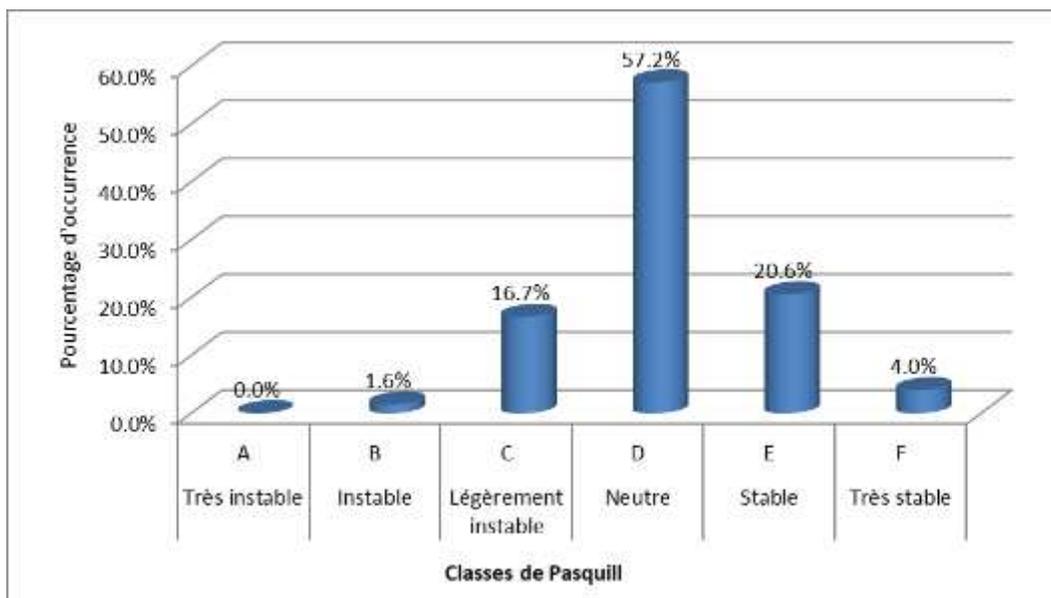
Dans ce rapport, elle a été déterminée à partir des données de vent et de nébulosité qui conduit à distinguer six catégories de stabilité de l'atmosphère :

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

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

La Figure 8 présente la répartition des cas météorologiques en fonction de la stabilité atmosphérique.

Figure 8 : répartition des cas météorologiques en fonction de la stabilité atmosphérique



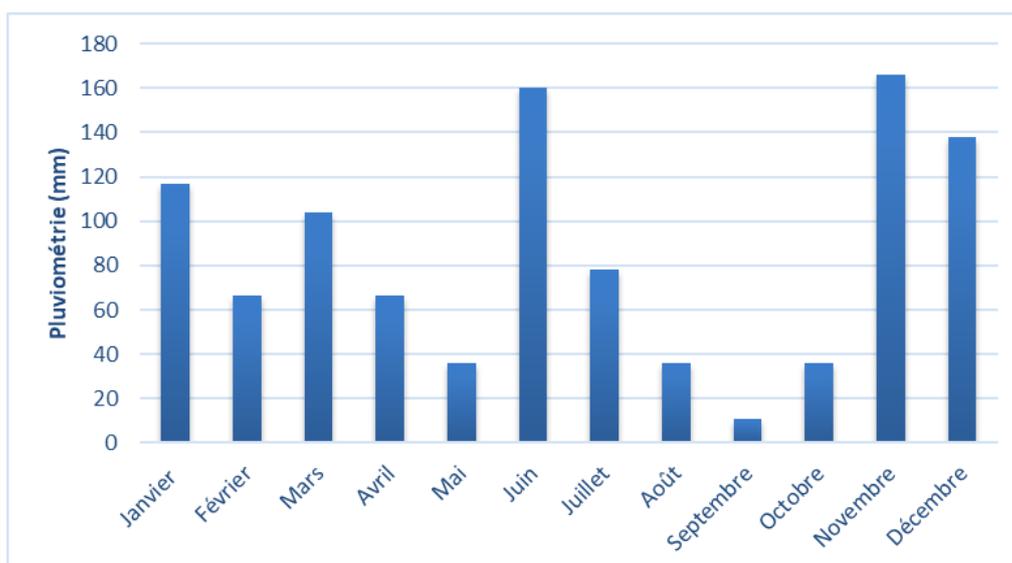
La classe D de Pasquill est la plus fréquemment observée (57,2 %) sur le site, ce qui est favorable pour la dispersion atmosphérique. Les conditions de dispersion sont relativement favorables puisque 75,5% des observations présentent une atmosphère instable ou neutre.

Les vents ont une vitesse moyenne d'environ 1,7 m/s en situation très stable - donc pénalisante pour la dispersion des émissions -, tandis qu'en atmosphère neutre, elle est de 4 m/s.

#### 4.4.2.3 Pluviométrie

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenu compte des données de pluviométrie recueillies sur la station de Nantes Atlantique. Il est tombé 1015 mm de pluie en 2018. C'est une année plutôt pluvieuse.

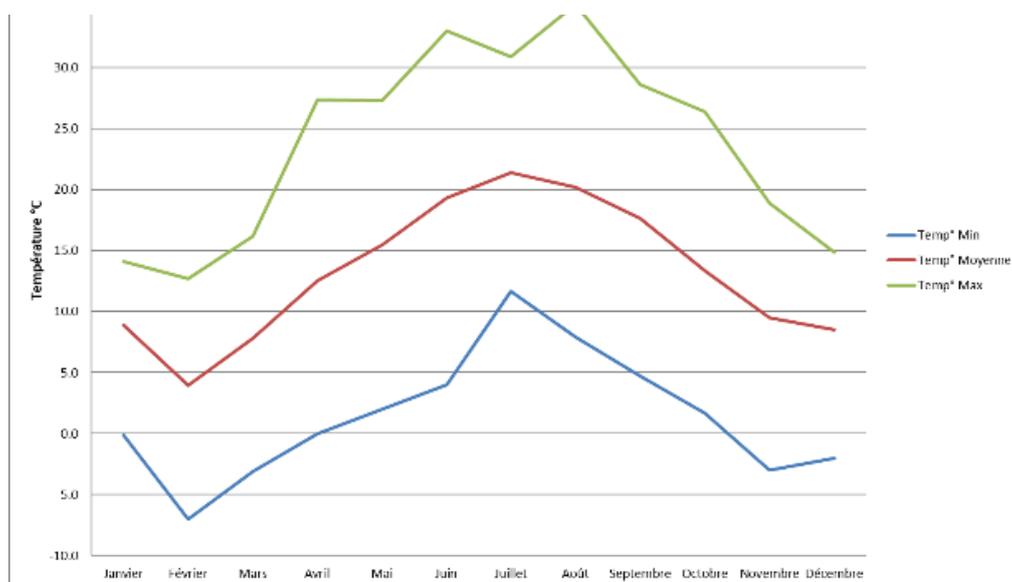
Figure 9 : variation moyenne mensuelle de la pluviométrie (période du 01/01/2018 au 31/12/2018)



#### 4.4.2.3.2 Températures

La température de l'air, dernier paramètre intervenant dans le processus de dispersion des polluants, est en moyenne de 13,3°C à la station de Nantes Atlantique en 2018. La Figure 10 présente les variations moyennes mensuelles de la température minimale, moyenne et maximale sur la période du 01/01/2018 au 31/12/2018.

*Figure 10 : variation moyenne mensuelle de la température (période du 01/01/2018 au 31/12/2018)*



## 5. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

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

### 5.1 METHODOLOGIE ET MODELE UTILISE

Deux mécanismes sont prépondérants dans la dispersion des polluants atmosphériques :

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

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

MSS est un élément du logiciel HPAC (Hazard Prediction Analysis Code) historiquement développé par ARIA Technologies pour les besoins du US-DOD (United States Department Of Defense). Ce logiciel intègre différents codes de dispersion.

MSS repose sur la mise en œuvre de :

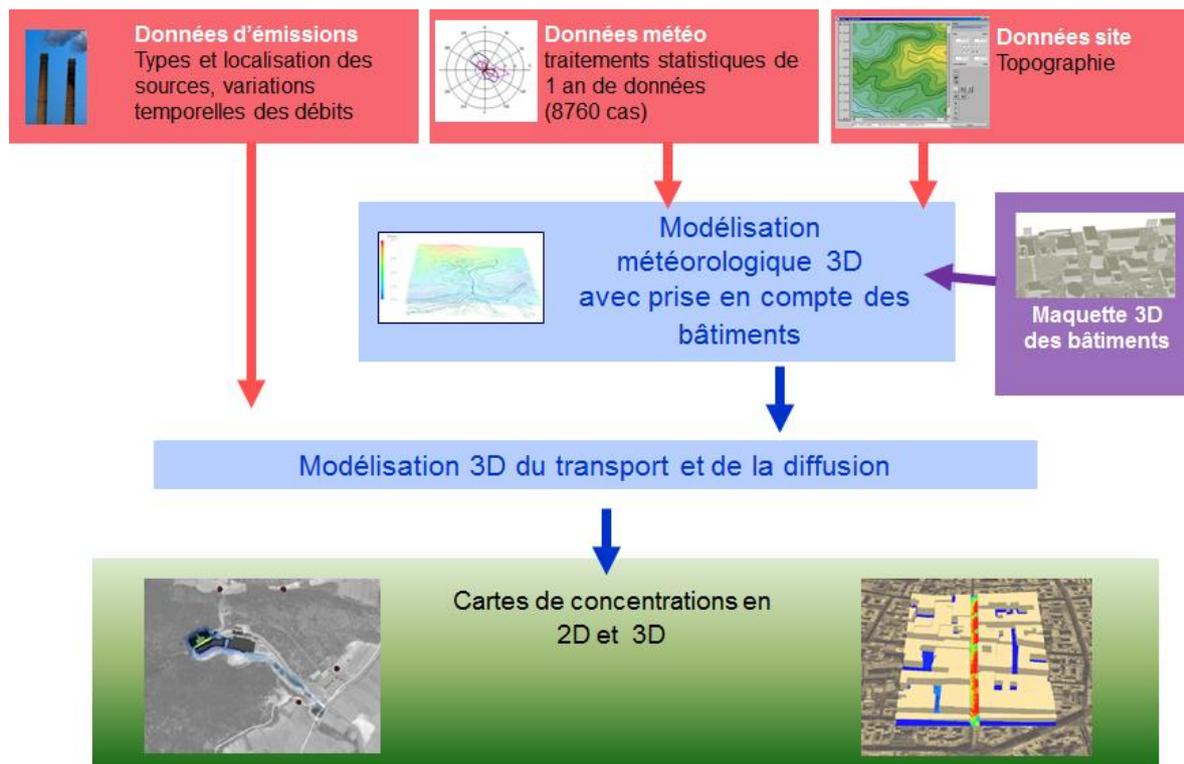
- SWIFT : modèle de calcul de champs tridimensionnels de vent et de température prenant notamment en compte l'influence du relief, de l'occupation des sols et des bâtiments. Il a été validé sur de nombreuses campagnes de mesures réalisées notamment par le US Department of Defence (Defence and Threat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

La méthodologie employée ici se décompose en plusieurs étapes successives :

- Etape 1 : constitution d'une base météorologique complète au pas horaire sur une année (année 2018, représentative des conditions de vents de la zone d'étude, cf. paragraphe 4.4.2) ;
- Etape 2 : modélisation de l'écoulement du vent en 3D pour chaque échéance horaire de la base météo → champs de vent 3D heure par heure soit 8 760 échéances ;
- Etape 3 : modélisation de la dispersion des émissions pour chaque échéance horaire de la base météo à partir des champs de vent 3D calculés à l'étape 2 → concentrations 3D heure par heure soit 8 760 échéances ;
- Etape 4 : calcul statistique des concentrations moyennes annuelles et des dépôts au sol à partir des résultats 3D horaires calculés sur l'année.

La Figure 11 présente la méthodologie mise en œuvre pour déterminer les concentrations dans l'air.

Figure 11 : Méthodologie mise en œuvre



## 5.2 DONNEES D'ENTREE

### 5.2.1 Domaine d'étude

Le domaine d'étude retenu est un carré de 2 km centré sur le site.

*Figure 12 : carte du domaine d'étude*



## 5.2.2 Obstacles

Compte tenu du contexte et de la présence d'établissements sensibles à proximité immédiate du site (CHU), les bâtiments ont été pris en compte dans les simulations.

Les informations concernant les obstacles sont issues de la BD TOPO® de l'IGN. A partir de ces données, un maillage tridimensionnel fin représentant le domaine d'étude et intégrant les obstacles a été réalisé.

La Figure 13 présente les obstacles de la zone d'étude. La Figure 14 présente des vues 3D des bâtiments.

*Figure 13 : bâtiments sur la zone d'étude*



Figure 14 : visualisations 3D des obstacles



### 5.2.3 Topographie

La topographie est issue d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 75 mètres. La Figure 15 présente une vue 2D de la topographie sur le domaine d'étude. L'unité est le mètre NGF (Nivellement Général de la France). Le relief du domaine d'étude varie entre 19 mètres à 59 mètres environ.

Figure 15 : topographie du domaine d'étude



## 5.2.4 Météorologie

Les données retenues correspondent aux données présentées au paragraphe 4.4 à savoir les données horaires de vent, température, nébulosité et pluie mesurées ou observées à la station Météo-France de Nantes-Atlantique pour l'année 2018 (1 mesure par heure sur la période du 01/01/2018 au 31/12/2018 soit 8 760 échéances horaires). Comme indiqué au paragraphe 4.4.2, l'année 2018 peut être considérée comme représentative des conditions météorologiques moyennes sur la zone d'étude.

A partir de ces données, le modèle météorologique utilisé pour les simulations (cf. schéma Figure 11) reconstitue l'écoulement du vent sur le domaine d'étude afin de bien reconstruire un champ de vent 3D à chaque échéance horaire de l'année. Ainsi, 8760 situations météorologiques réelles sont modélisées successivement par le modèle.

## 5.2.5 Emissions

Les émissions prises en compte correspondent au terme source présenté dans le Tableau 2, paragraphe 3.2.

## 5.3 PARAMETRAGES DU MODELE

### 5.3.1 Maillage

Le but étant de modéliser les obstacles présents dans la zone d'étude et pouvant influencer sur les écoulements d'air, ces obstacles ont été modélisés en fonction de leur volume et surtout de leur hauteur. Ces bâtiments ont été pris en compte avec une résolution de 5 mètres dans le plan horizontal et avec une hauteur qui dépend de la répartition des niveaux verticaux. Pour les simulations de la dispersion des polluants, il a été défini 20 niveaux verticaux dont 8 répartis entre 0 et 30m d'altitude (zone avec présence de bâtiments). La hauteur de maille la plus petite est de 2 mètres près du sol.

### 5.3.2 Surélévation du panache

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

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

### 5.3.3 Autres paramètres de calcul

Les simulations ont été réalisées pour des états stationnaires.

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

- Pas de temps d'émissions des particules : 10 s ;
- Nombre de particules émis par pas de temps : 1 000 ;
- Durée de moyennage : 3 600 secondes.

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 <sup>-1</sup> )	Diamètre de particules	Demie-vie (s)	Source biblio.
H3 (sous forme HTO)	Gaz	-	-	1	3.9E+08	1
Be7	Particules	5E-03	1E-04	1	4.6E+06	1
C11	Particules	5E-03	1E-04	1	1.2E+03	1
N13	Gaz	5E-03	1E-04	-	5.9E+02	1
O15	Particules	5E-03	1E-04	1	1.2E+02	1
S35	Gaz	5E-03	1E-04	-	7.5E+06	1
Ar37	Gaz	-	-	-	3.0E+06	1
Ar39	Gaz	-	-	-	2.3E+07	1
Ar41	Gaz	-	-	-	6.6E+03	1
Kr79	Gaz	-	-	-	1.3E+05	1
Kr83m	Gaz	-	-	-	6.6E+03	1

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

## 5.4 DETERMINATION DES CONCENTRATIONS DANS L'AIR ET DES DEPOTS AU SOL

### 5.4.1 Présentation des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de :

- concentration en moyenne annuelle exprimées en Bq/m<sup>3</sup> ;
- dépôts au sol pour les espèces particulaires exprimés en Bq/m<sup>2</sup>/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 (groupes de référence) présentés sur la Figure 16.

Figure 16 : localisation des points cibles (groupes de référence)



Numéro	Intitulé	Numéro	Intitulé
1	Crèche de la Bergerie	7	Habitation Nord-Est
2	CHU	8	Maisons CHU
3	Ecole Primaire René-Guy Cadou	9	Gardien
4	ESAT CATOUEST	10	MAS Horizon
5	Institut de Cancérologie de l'Ouest (ICO) - Site René Gauducheau	11	Rousselière
6	Centre Médical de Garde	12	Stade de la Bergerie

### 5.4.2 Concentrations en moyenne annuelle

Le Tableau 7 présente les valeurs calculées en moyenne annuelle en radionucléides exprimée en Bq/m<sup>3</sup> pour la configuration retenue au niveau des groupes de référence précédemment (cf. Figure 16).

Tableau 7 : concentrations en moyenne annuelle en radionucléides (Bq/m<sup>3</sup>)

Concentration Bq/m <sup>3</sup>		Ar37	Ar39	Ar41	Be7	C11	HTO	Kr79	Kr83 m	N13	O15	S35
1	Crèche de la Bergerie	4.3E-09	3.2E-09	8.8E-5	2.2E-05	2.9E-01	9.2E-04	2.3E-01	1.0E-01	2.7E-01	6.2E-03	8.5E-10
2	CHU	1.8E-07	1.4E-07	2.4E-03	9.4E-04	7.4E+00	3.8E-02	9.6E+00	4.6E+00	9.6E-01	1.4E+00	3.6E-08
3	Ecole Primaire R-G Cadou	1.2E-08	8.8E-09	2.2E-04	6.1E-05	5.8E-01	2.6E-03	6.3E-01	2.9E-01	3.6E-01	2.4E-02	2.3E-09
4	ESAT CATOUEST	7.9E-09	5.9E-09	1.6E-04	4.1E-05	4.3E-01	1.7E-03	4.2E-01	1.9E-01	4.1E-01	1.8E-02	1.5E-09
5	ICO René Gauducheau	1.2E-07	9.2E-08	2.4E-03	6.4E-04	6.8E+00	4.2E-02	6.5E+00	3.0E+00	7.1E+00	4.6E-01	2.4E-08
6	Centre Médical de Garde	1.1E-07	8.4E-08	2.3E-03	5.8E-04	7.7E+00	2.3E-02	6.0E+00	2.8E+00	9.3E+00	1.0E+00	2.2E-08
7	Habitation	3.3E-08	2.4E-08	6.7E-04	1.7E-04	2.2E+00	6.8E-03	1.7E+00	8.0E-01	2.7E+00	1.4E-01	6.4E-09
8	Maisons CHU	4.2E-08	3.1E-08	8.5E-04	2.1E-04	2.8E+00	8.6E-03	2.2E+00	1.0E+00	3.4E+00	2.8E-01	8.1E-09
9	Gardien	1.0E-07	7.6E-08	2.1E-03	5.3E-04	6.9E+00	2.1E-02	5.4E+00	2.6E+00	8.5E+00	8.4E-01	2.0E-08
<b>10</b>	<b>MAS Horizon</b>	<b>2.0E-07</b>	<b>1.5E-07</b>	<b>4.0E-03</b>	<b>1.0E-03</b>	<b>1.2E+01</b>	<b>4.1E-02</b>	<b>1.1E+01</b>	<b>5.0E+00</b>	<b>1.4E+01</b>	<b>1.6E+01</b>	<b>3.9E-08</b>
11	Rousselière	1.7E-08	1.3E-08	3.7E-04	8.7E-05	1.1E+00	3.5E-03	9.0E-01	4.2E-01	1.3E+00	1.3E-01	3.3E-09
12	Stade de la Bergerie	5.8E-09	4.3E-09	1.2E-04	3.0E-05	3.9E-01	1.3E-03	3.1E-01	1.4E-01	3.7E-01	1.2E-02	1.1E-09

Le groupe de référence le plus exposé est le point n°10 « MAS Horizon ».

Les cartographies montrent que les concentrations les plus élevées sont situées au niveau de la MAS Horizon, du CHU et sur le parking du site. Les concentrations sont du même ordre de grandeur au niveau de la MAS Horizon et du CHU. A noter que les concentrations au niveau de l'Etablissement Français du Sang situé juste en face d'ARRONAX sont beaucoup plus faibles que celles enregistrées au niveau de la MAS Horizon et du CHU.

Figure 17 : carte de concentration en moyenne annuelle en carbone 11 en Bq/m<sup>3</sup>

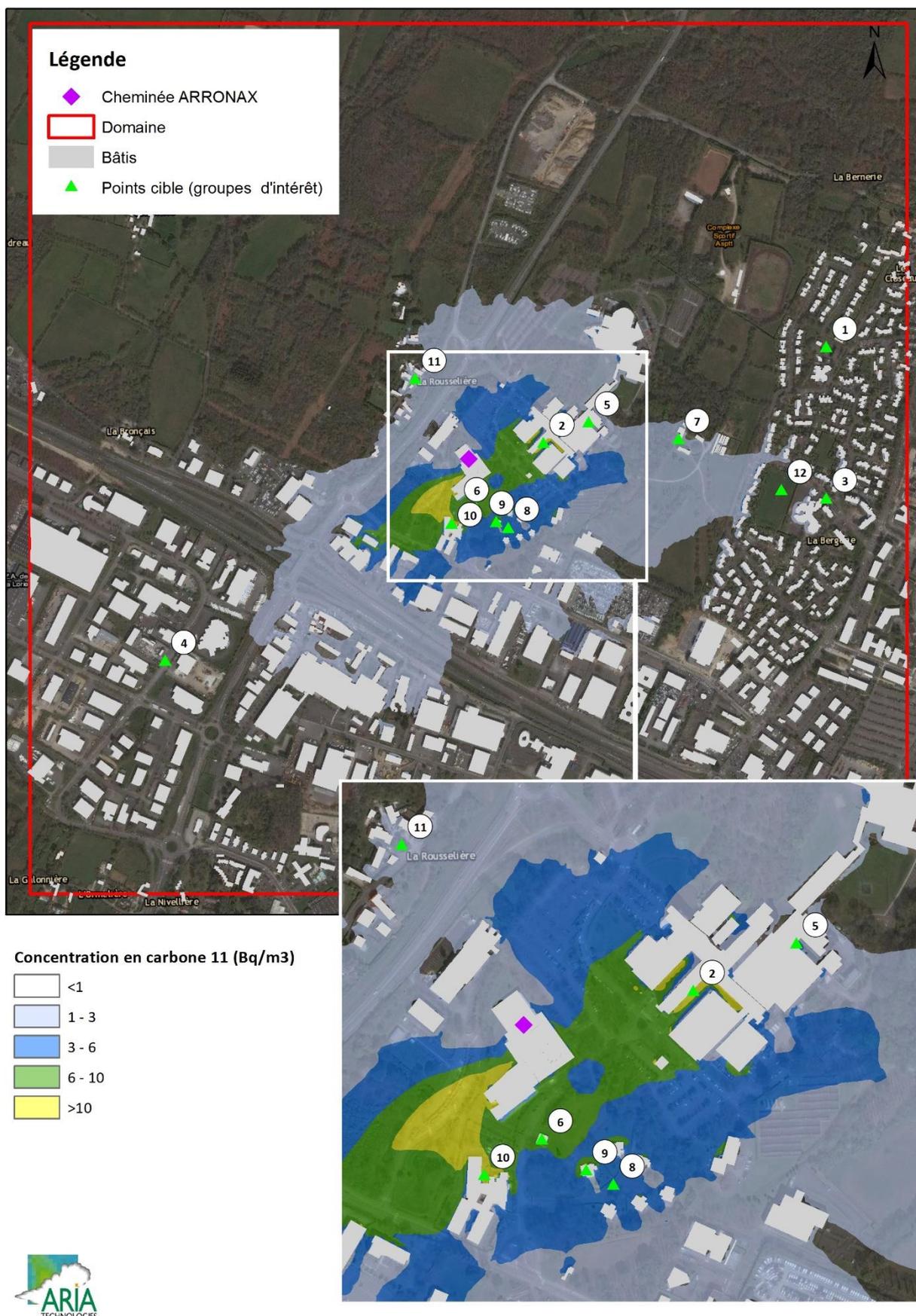
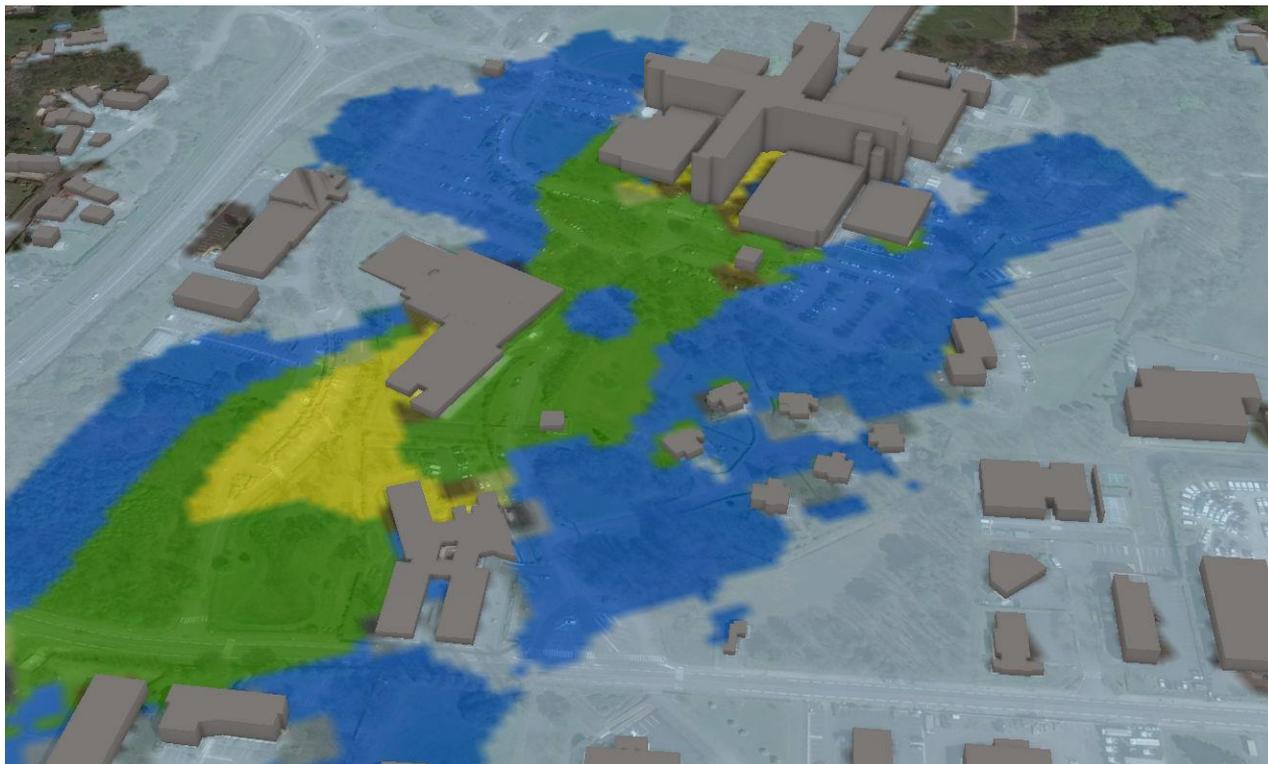


Figure 18 : vue des concentrations en moyenne annuelle en carbone 11 en Bq/m<sup>3</sup>



### 5.4.3 Dépôts au sol

Le Tableau 8 présente les dépôts en radionucléides exprimé en Bq/m<sup>2</sup>/s au niveau des groupes de références présentés précédemment (cf. Figure 16).

*Tableau 8 : dépôts annuels en radionucléides (Bq/m<sup>2</sup>/s)*

Dépôts(Bq/m <sup>2</sup> /s )		Ar3 7	Ar3 9	Ar4 1	Be7	C11	HT O	Kr7 9	Kr83 m	N13	O15	S35
1	Crèche de la Bergerie	-	-	-	1.9E-07	1.1E-03	-	-	-	5.5E-04	3.7E-06	7.2E-12
2	CHU	-	-	-	6.1E-06	2.1E-02	-	-	-	1.3E-02	4.6E-04	2.3E-10
3	Ecole Primaire René-Guy Cadou	-	-	-	3.9E-07	1.6E-03	-	-	-	8.6E-04	8.0E-06	1.5E-11
4	ESAT CATOUEST	-	-	-	2.6E-07	1.2E-03	-	-	-	6.4E-04	5.8E-06	1.0E-11
5	Centre Anti-Cancéreux	-	-	-	5.7E-06	2.6E-02	-	-	-	1.5E-02	2.0E-04	2.2E-10
6	Centre Médical de Garde	-	-	-	3.6E-06	2.2E-02	-	-	-	1.4E-02	3.1E-04	1.4E-10
7	Habitation	-	-	-	1.1E-06	7.2E-03	-	-	-	4.2E-03	4.6E-05	4.0E-11
8	Maisons CHU	-	-	-	1.4E-06	9.0E-03	-	-	-	5.6E-03	1.1E-04	5.5E-11
9	Gardien	-	-	-	3.2E-06	2.3E-02	-	-	-	1.4E-02	2.8E-04	1.2E-10
10	MAS Horizon	-	-	-	5.8E-06	2.9E-02	-	-	-	1.8E-02	4.5E-04	2.2E-10
11	Rousselière	-	-	-	6.3E-07	3.4E-03	-	-	-	2.1E-03	4.9E-05	2.4E-11
12	Stade de la Bergerie	-	-	-	2.7E-07	1.5E-03	-	-	-	8.5E-04	1.0E-05	1.0E-11

La Figure 19 présente la carte des dépôts sur le domaine d'étude en carbone 11 exprimés en Bq/m<sup>2</sup> au bout d'un an.

Les dépôts en Bq/m<sup>2</sup> au bout d'un an 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<sup>-2</sup>),

$A_{dep}$  : activité déposée en moyenne sur le sol (Bq.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>),

$\lambda_r$  : constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s<sup>-1</sup>)

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

Figure 19 : carte de dépôts en carbone 11 en Bq/m<sup>2</sup> au bout d'un an



## 6. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE

### 6.1 IDENTIFICATION DES DANGERS

#### 6.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations

##### 6.1.1.1 Effets sur la santé humaine (source : [www.asn.fr](http://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.

##### 6.1.1.1.1 Les effets déterministes

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

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

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

##### 6.1.1.1.2 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.

### 6.1.1.2 Exposition des populations

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

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

Les voies de contamination possibles sont les suivantes :

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

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

### 6.1.2 Relation Dose-Réponse

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

La réglementation nationale de la santé publique et du travail fixe, pour le public et les travailleurs, définit des limites de doses individuelles annuelles cumulées admissibles. Pour le public, la limite de la dose efficace est fixée à 1 mSv/an. Pour les travailleurs, cette limite est fixée à 20 mSv/an.

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

## 6.2 SCHEMA CONCEPTUEL D'EXPOSITION

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

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

### 6.2.2 Schéma conceptuel d'exposition

L'installation se trouve dans une zone urbanisée. Cependant, la présence de jardins n'est pas à exclure à proximité. La voie d'exposition par ingestion sera donc conservée dans le cas d'une habitation avec jardin.

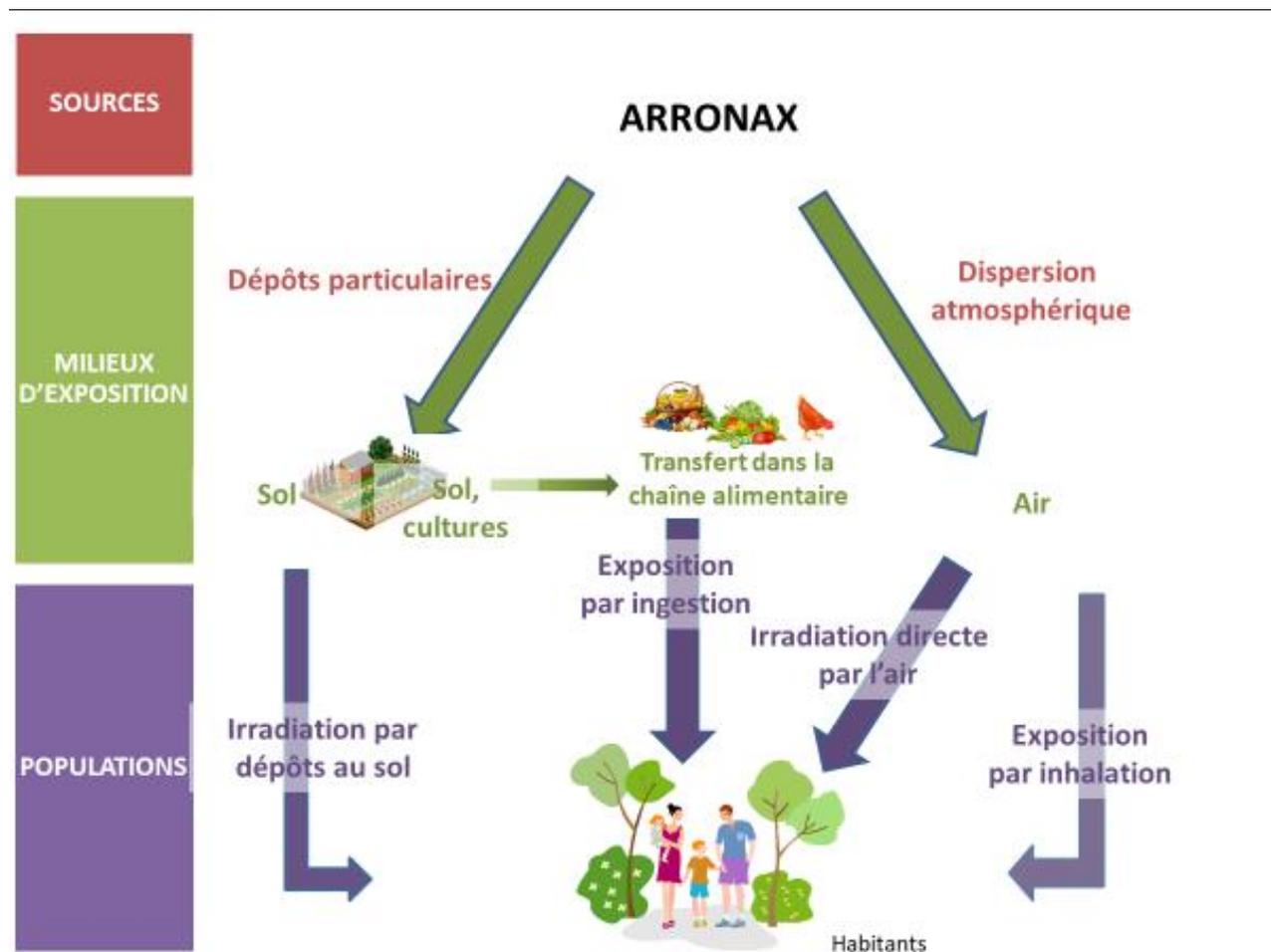
L'exposition par passage transcutané ne concerne que la vapeur d'eau tritiée (HTO). Elle est due à l'absorption de la vapeur d'eau tritiée par la peau et on la définit par rapport à l'exposition par inhalation. L'exposition externe par le panache est très faible dans le cas du tritium : seul le rayonnement  $\beta$  consécutif aux désintégrations du tritium de l'air contenu dans les poumons peut causer des dommages biologiques. On ne tiendra donc pas compte de cette voie d'exposition pour la suite de l'étude car sa contribution à l'exposition globale est négligeable.

**Les voies d'exposition retenues sont donc :**

- **L'exposition externe par irradiation (exposition externe au panache et aux dépôts) ;**
- **L'exposition interne par inhalation ;**
- **L'exposition interne par passage transcutané pour l'eau tritiée ;**
- **L'exposition interne par ingestion (pour les cibles avec jardin).**

Le Schéma Conceptuel d'Exposition autour du site est présenté sur la Figure 20.

Figure 20 : schéma conceptuel d'exposition



### 6.3 ESTIMATION DES DOSES D'EXPOSITION

Les voies d'exposition retenues sont :

- L'exposition externe par irradiation (exposition externe au panache et aux dépôts) ;
- L'exposition interne par inhalation ;
- L'exposition par passage transcutanée pour l'eau tritiée ;
- L'exposition interne par ingestion.

L'ensemble des paramètres relatifs aux radionucléides étudiés sont issus de l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003 relatif aux modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants, ou à défaut, de la plate-forme ECRIN de l'IRSN<sup>4</sup>.

#### 6.3.1 Scénario d'exposition

Les scénarios d'exposition retenus sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

<sup>4</sup> <https://ecrin.irsn.fr>

Tableau 9 : scénarios retenus

Scénario retenu	Groupe de référence	Typologie	Individu	Durée d'exposition	Temps d'exposition	Voies d'exposition
Scénario habitant majorant	MAS HORIZON	Zone habitée la plus exposée	Adulte (17 ans et plus)	1 année d'exposition, au bout de la 50 <sup>ème</sup> année (scénario le plus pénalisant prenant en compte l'accumulation éventuelle dans les sols)	8 760 h/an (toute l'année)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposition interne par inhalation du panache</li> <li>- Exposition externe au panache</li> <li>- Exposition externe aux dépôts sol</li> <li>- Exposition par passage transcutanée (HTO)</li> <li>- Exposition interne par ingestion de sol</li> </ul>
Scénario habitant avec jardin	Rousselière	Habitation la plus exposée avec jardin	Adulte (17 ans et plus) Enfant de 10 ans (représentant de la tranche 7 à 12 ans) Bébé ((enfant de 1 à 2 ans)		8 760 h/an (toute l'année)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposition interne par inhalation du panache</li> <li>- Exposition externe au panache</li> <li>- Exposition externe aux dépôts sol</li> <li>- Exposition par passage transcutanée (HTO)</li> <li>- Exposition interne par ingestion de sol, végétaux, de volailles et d'œufs</li> </ul>
Scénario enfant*	Ecole Primaire R.Cadou	Ecole la plus exposée	Enfant de 10 ans (représentant de la tranche 7 à 12 ans)		<p>1 296 h à l'école (9h/j, 4j/7, 36 semaines par an)</p> <p>7 464 h à proximité immédiate (le reste du temps)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposition interne par inhalation du panache</li> <li>- Exposition externe au panache</li> <li>- Exposition externe aux dépôts sol</li> <li>- Exposition par passage transcutanée (HTO)</li> <li>- Exposition interne par ingestion de sol</li> </ul>
Scénario travailleur	MAS HORIZON	Zone « travailleur » la plus exposée**	Adulte (17 ans et plus)		2000 h/an	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposition interne par inhalation du panache</li> <li>- Exposition externe au panache</li> <li>- Exposition par passage transcutanée (HTO)</li> <li>- Exposition interne par ingestion de sol</li> </ul>
	Rousselière	Habitation la plus exposée avec jardin			6760 h/an (le reste du temps)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposition interne par inhalation du panache</li> <li>- Exposition externe au panache</li> <li>- Exposition externe aux dépôts sol</li> <li>- Exposition par passage transcutanée (HTO)</li> <li>- Exposition interne par ingestion de sol, végétaux, de volailles et d'œufs</li> </ul>

\*On suppose que l'enfant vit à proximité immédiate de l'école. Il a été fait comme hypothèse qu'il est exposé à des mêmes niveaux à domicile et à l'école.

\*\* Il est à noter que les concentrations au niveau du CHU sont du même ordre de grandeur que celle du MAS HORIZON bien que très légèrement plus faibles. C'est pourquoi il a été retenu le MAS HORIZON comme zone travailleur.

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.

Seules les personnes habitant au niveau de la zone habitée avec jardin sont considérées comme potentiellement exposées à une contamination par ingestion de végétaux cultivés sur place, et de volaille et d'œufs de leur propre élevage. Les autres groupes de référence sont considérés comme non consommateurs de denrées en provenance de la zone.

La contamination par ingestion de viandes (autre que la volaille), de lait et de produits laitiers n'a pas été retenue (absence d'élevage dans la zone pouvant se trouver sous les retombées du site).

Pour tous les groupes de référence, afin d'être majorant, l'exposition par ingestion de sol a été conservée (enfants jouant au sol, personnes jardinant par exemple).

## 6.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation)

### 6.3.2.1 Méthodologie

L'irradiation a lieu :

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

#### 6.3.2.1.1 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<sup>-1</sup>)

$A_{air}$  : concentration dans l'air (Bq.m<sup>-3</sup>)

$CD_{pan}$  : coefficient de dose efficace externe au panache (Sv. s<sup>-1</sup>)/(Bq.m<sup>-3</sup>)

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

$t$  : durée d'exposition (en secondes)

#### 6.3.2.1.2 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<sup>-1</sup>),

$A_{dep}$  : activité déposée sur le sol ((Bq.m<sup>-2</sup>).s<sup>-1</sup>),

$CD_{dep}$  : coefficient de dose efficace externe au dépôt (Sv.s<sup>-1</sup> / Bq.m<sup>-2</sup>)

$F_{tp}$  : 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)

$\lambda_r$  : constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s<sup>-1</sup>),

$\lambda_m$  : constante de décroissance par migration dans le sol du radionucléide considéré (s<sup>-1</sup>)

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.

A noter que les gaz inertes et rares (Ar37, l'Ar39, l'Ar41, le Kr79 et le Kr83m) ne sont pas concernés par cette voie d'exposition (chimiquement inertes, ils ne se déposent pas).

En raison de sa mobilité (infiltration, évaporation, absorption par les racines), les dépôts aux sols d'eau, l'eau tritiée ne donnent pas lieu à une exposition externe aux dépôts.

### 6.3.2.2 Hypothèses

Faute de données dans l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003, les valeurs des coefficients de dose efficace externe au panache sont issues de la base ECRIN de l'IRSN (Federal Guidance 12 (FGR 12, 1993))<sup>5</sup>, et sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : Coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe

	constante radioactive	Irradiation panache	Irradiation dépôt	Durée d'exposition
Unités	s-1	((Sv/s)/(Bq/m <sup>3</sup> ))	((Sv/s)/(Bq/m <sup>2</sup> ))	année
H3	1.78E-09	3.31E-19	-	1 année, dose calculée au bout de 50 ans de fonctionnement
Be7	1.51E-07	2.36E-15	4.89E-17	
C11	5.67E-04	4.89E-14	1.01E-15	
N13	1.16E-03	4.90E-14	1.01E-15	
N16	9.68E-02	4.90E-14	1.01E-15	
O15	5.68E-03	4.91E-14	1.01E-15	
S35	9.18E-08	2.43E-19	1.68E-20	
Ar37	2.29E-07	1.27E-19	-	
Ar39	8.17E-11	9.10E-18	-	
Ar41	1.05E-04	6.50E-14	-	
Kr79	5.49E-06	1.21E-14	-	
Kr83m	1.05E-04	1.50E-18	-	

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.

<sup>5</sup> A noter que les publications CIPR 71 et 72 préconisent de prendre la solubilité M pour une exposition public ce qui a été retenue dans cette étude.

### 6.3.2.3 Calcul de la dose d'exposition par irradiation

Les Tableau 11 présente les doses d'exposition pour chaque tranche d'âge considéré (enfant âgé de 1 à 2 ans, enfants âgés de 10 ans, adulte) pour les différents scénarios :

- Scénario habitant majorant (groupe de référence : MAS HORIZON, cf. Figure 16);
- Scénario habitant avec jardin (groupe de référence : Rousselière, cf. Figure 16);
- Scénario Ecole (groupe de référence : école primaire R-G.Cadou, cf. Figure 16).
- Scénario travailleur (groupe de référence : MAS HORIZON pour leurs heures de travail et Rousselière, le reste du temps, cf. Figure 16);

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)

Scénario	Cible	Dose externe (irradiation panache)	Dose externe (irradiation dépôts)	Dose externe (irradiation panache et dépôts)
Habitant majorant	Adulte	4.7E-02	1.8E-03	4.9E-02
Habitant avec jardin	Adulte	4.2E-03	2.5E-04	4.5E-03
	Enfant âgé de 10 ans	4.2E-03	2.5E-04	4.5E-03
	Enfant âgé de 1 à 2 ans	4.2E-03	2.5E-04	4.5E-03
Ecole	Enfant âgé de 10 ans	1.7E-03	1.5E-04	1.9E-03
Travailleur	Adulte	1.4E-02	6.0E-04	1.5E-02

### 6.3.3 Exposition interne par inhalation

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

#### 6.3.3.1 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 ( $m^3.h^{-1}$ ),

$CD_{inh}$  : 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)

#### 6.3.3.2 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  $\mu m$ .

Les débits respiratoires considérés sont calculés à partir des volumes d'air inhalés quotidiennement indiqués dans la CIPR 66<sup>6</sup>.

**Tableau 12 : volumes d'air inhalés**

	Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans	Travailleur
<b>volumes d'air inhalés en m<sup>3</sup>/h (<math>D_{resp}</math>)</b>	0.96	0.64	0.22	1.21

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 conservatrice.

Les coefficients de dose utilisés proviennent de l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003 (tableau 1.2 sauf pour l'eau tritiée tableau 2.1 de l'annexe III). En l'absence d'information, il a été choisi les coefficients de dose correspondant au type d'absorption recommandé par défaut pour les aérosols quand l'information était disponible dans l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003 (Tableau 1.3) ou à défaut, les coefficients de dose les plus conservateurs.

Les gaz inertes et rares (Ar37, l'Ar39, l'Ar41, le Kr79 et le Kr83m) ne sont pas concernés par cette voie d'exposition. Pour le C11 et S35, la forme aérosol, la plus majorante, est choisie.

**Tableau 13 : coefficient de dose efficace en Sv.Bq<sup>-1</sup> ( $CD_{inh}$ )**

Inhalation - Efficace (Sv/Bq)	Unités	Type d'absorption retenu	Adulte	Enfant de 10 ans	Enfant de 1 à 2 ans
Ar37	Sv/Bq	-	-	-	-
Ar39	Sv/Bq	-	-	-	-
Ar41	Sv/Bq	-	-	-	-
Be7	Sv/Bq	S	5.50E-11	9.60E-11	2.40E-10
C11	Sv/Bq	M	1.80E-11	3.20E-11	1.10E-10
HTO	Sv/Bq	V	1.80E-11	2.30E-11	4.80E-11
Kr79	Sv/Bq	-	-	-	-
Kr83m	Sv/Bq	-	-	-	-
N13*	Sv/Bq		9.04E-12	9.04E-12**	9.04E-12**
N16***	Sv/Bq		9.04E-12	9.04E-12**	9.04E-12**
O15***	Sv/Bq		1.16E-12	1.16E-12**	1.16E-12**
S35	Sv/Bq	M	1.40E-09	2.00E-09	4.5E-09

\*\*\*aucune valeur définie dans le Federal Guidance 12, la valeur de N13 est choisie par défaut.

\*\*en cas d'absence de valeur pour les cibles « enfant de 10 ans » et « enfant de 1 à 2 ans », les valeurs retenues sont identiques à celles retenues pour les adultes.

\*valeurs issues d'une publication spécifique : Dose Coefficients and Derived Air Concentrations for accelerator-Produced Radioactive Material. November 3, 2006. K. F. Eckermann, R. W. Legett. ORDOS/2006/01

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

### 6.3.3.3 Calcul de la dose d'exposition par inhalation

Le Tableau 14 présente les doses d'exposition par inhalation pour chaque tranche d'âge considéré (enfant âgé de 1 à 2 ans, enfant âgé de 10 ans, adulte) pour les différents scénarios d'exposition :

- Scénario habitant majorant (groupe de référence : MAS HORIZON, cf. Figure 16);
- Scénario habitant avec jardin (groupe de référence : Rousselière, cf. Figure 16);
- Scénario Ecole (groupe de référence : école primaire R-G.Cadou, cf. Figure 16).
- Scénario travailleur (groupe de référence : MAS HORIZON pour leurs heures de travail et Rousselière, le reste du temps, cf. Figure 16).

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

Scénario	Cible	Dose interne par inhalation
Habitant majorant	Adulte	2.8E-03
Habitant avec jardin	Adulte	2.6E-04
	Enfant âgé de 10 ans	2.7E-04
	Enfant âgé de 1 à 2 ans	2.6E-04
Ecole	Enfant âgé de 10 ans	1.2E-04
Travailleur	Adulte	4.0E-03

### 6.3.4 Exposition interne par passage transcutané

#### 6.3.4.1 Méthodologie

La vapeur d'eau tritiée (HTO) peut être absorbée à travers la peau. On définit cette exposition par passage transcutané en considérant que la dose reçue par passage à travers la peau est égale à 40 % de la dose reçue par inhalation<sup>7</sup>. La dose efficace annuelle due au passage transcutané est obtenue selon la formule suivante :

$$E_{transcutané} = 0.4 \times E_{inh}$$

Avec :

$E_{inh}$  : dose efficace annuelle par inhalation (Sv.an<sup>-1</sup>)

$E_{transcutané}$  : dose efficace annuelle par passage transcutané (Sv.an<sup>-1</sup>)

#### 6.3.4.2 Calcul de la dose d'exposition par passage transcutané

Le Tableau 15 présente les doses d'exposition par inhalation pour chaque tranche d'âge considéré (enfant âgé de 1 à 2 ans, enfant âgé de 10 ans, adulte) pour les différents scénarios d'exposition :

- Scénario habitant majorant (groupe de référence : MAS HORIZON, cf. Figure 16);
- Scénario habitant avec jardin (groupe de référence : Rousselière, cf. Figure 16);
- Scénario Ecole (groupe de référence : école primaire R-G.Cadou, cf. Figure 16).
- Scénario travailleur (groupe de référence : MAS HORIZON pour leurs heures de travail et Rousselière, le reste du temps, cf. Figure 16).

<sup>7</sup> CEA, Rapport technique interne DO 276 - 11/07/2002, CALCUL D'IMPACT RADIOLOGIQUE D'UN REJET PAR VOIE ATMOSPHERIQUE EN SITUATION ACCIDENTELLE - Formulaire du logiciel GAZAXI - Ph. Guétat, P. Armand.

Tableau 15 : dose d'exposition par passage transcutané (mSv/an)

Scénario	Cible	Dose par passage transcutané
Habitant majorant	Adulte	2.4E-06
Habitant avec jardin	Adulte	2.0E-07
	Enfant âgé de 10 ans	1.8E-07
	Enfant âgé de 1 à 2 ans	1.3E-07
Ecole	Enfant âgé de 10 ans	1.3E-07
Travailleur	Adulte	3.3E-06

### 6.3.5 Exposition interne par ingestion

Les dépôts de radionucléides au sol peuvent contaminer les végétaux qui seront ensuite ingérés par l'homme et par les animaux eux-mêmes mangés par l'homme (viande de bœuf, volaille, œufs et lait de vache). Tous les transferts des radionucléides dans la chaîne alimentaire sont décrits dans cette partie pour en déduire la dose efficace reçue par l'homme par voie interne due à l'ingestion d'aliments contaminés.

A noter que :

- Les gaz rares (Ar37, l'Ar39, l'Ar41, le Kr79 et le Kr83m) ne sont pas métabolisés par les végétaux : ils ne sont donc pas considérés ;
- Concernant l'azote et l'oxygène, aucune donnée de facteurs de transfert dans la végétation et dans les denrées n'est à ce jour présentée par l'AIEA ou disponible dans le rapport GRNC<sup>8</sup>. Ils ne seront donc pas conservés.

#### 6.3.5.1 Détermination de l'activité dans les milieux d'exposition

##### 6.3.5.1.1 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<sup>-1</sup>

$Ds$  : débit de dépôt sec en Bq.s<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>

$Dh$  : débit de dépôt humide en Bq.s<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>

$\lambda_m$  : constante de migration de l'élément dans le sol en s<sup>-1</sup> 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).

$\lambda$  : constante de décroissance radiologique du radionucléide en s<sup>-1</sup>

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

$\rho_0$  : masse volumique du sol sec en kg.m<sup>-3</sup>

$P_r$  : profondeur de l'horizon racinaire en m

<sup>8</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3, Annexe 8-2

L'activité déposée sur le sol est calculée dans la 50<sup>ème</sup> 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 :  $t_f=50\ \text{ans}$

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.

#### 6.3.5.1.2 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 :

$$A_{\text{vég.foliaire.dépôt}} = (D_s \times R_{cs} + D_h \times R_{ch}) \times F \times \frac{1 - \exp [-(\lambda_{bm} + \lambda) \times t_{\text{veg}}]}{(\lambda_{bm} + \lambda) \times r}$$

Avec :

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

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

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

$R_{cs}$  : rapport de captation sec du végétal (sans unité)

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

*F*: facteur de translocation (sans unité)

$\lambda_{bm}$ : constante biomécanique de l'élément en  $s^{-1}$

$\lambda$ : constante de décroissance radiologique du radionucléide en  $s^{-1}$

$t_{vég}$ : 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 GRNC<sup>9</sup> sont présentées dans le Tableau 16.

Le Tableau 17 présente les facteurs de translocation retenu provenant du rapport GRNC<sup>10</sup>.

**Tableau 16 : facteurs relatifs aux végétaux**

	Rs	Rh	$t_{vég}$	r
Unités	-	-	jours	$kgfrais.m^2$
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 17 : facteurs de translocation**

Facteur de translocation	F blé/céréales (grains)	F légumes racine	F légumes fruits	F fruits	F autres végétaux	F sol/herbe
Be7	0.002	0	0.002	0.002	1	1
S35	1	1	1	1	1	1

➤ Activité due au transfert racinaire ou indirect

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

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

Avec :

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

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

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

Les facteurs relatifs aux végétaux utilisés sont issus du rapport GRNC<sup>11</sup> ou du rapport CEA<sup>12</sup> et sont présentées dans le Tableau 18.

<sup>9</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

<sup>10</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

<sup>11</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

<sup>12</sup> DAPNIA/SENAC/G/06-216/NT, PROJET ARRONAX ETUDE D'IMPACT DES REJETS ATMOSPHERIQUES EN FONCTIONNEMENT NORMAL

Tableau 18 : facteur de transfert racinaire en  $kg_{sol} .kg_{frais}^{-1}$ 

	Frac Légumes feuilles	Frac Légumes fruits	Frac Légumes racines	Frac Céréales et maïs d'ensilage	Frac Herbe et foin
unité	$kg_{sol} .kg_{frais}^{-1}$				
Be7	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03
S35	6.00E-01	6.00E-01	6.00E-01	6.00E-01	6.00E-01

### 6.3.5.1.3 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 :

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

Avec :

$$\sum A_{veg} = A_{veg,foliaire} + A_{veg,racinaire}$$

$A_{veg,foliaire}$  : activité massique des parties comestibles du végétal due au transfert foliaire en  $Bq.kg^{-1}$

$A_{veg,racinaire}$  : 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  $Bq/kg$

$Q_{veg-animal}$  : consommation de végétal par l'animal  $kg_{frais}.j^{-1}$

$A_{sol}$  : activité massique du sol en  $Bq.kg^{-1}$

$Q_{sol}$  : consommation de sol par l'animal  $kg_{frais}.j^{-1}$

$Ex$  : 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

$\lambda$  : 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  $Bq.kg_{frais}^{-1}$  par  $Bq_{ingéré}.j^{-1}$

Les paramètres retenus sont les suivants (données issues du rapport GRNC<sup>13</sup>) :

Tableau 19 : Rations alimentaires journalières des animaux et ingestion de sol par inadvertance en  $kg.j^{-1}$

	Foin	Herbe	Mais	Terre
<b>Bœuf</b>	5	60	35	0.7
<b>Volaille</b>	-	-	0.06	0.01

<sup>13</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

Tableau 20 : durée de consommation et de stockage des végétaux

	Durée de consommation en mois (Dconso)		Durée de stockage en mois
	Bœuf	Volaille	
<b>Mais</b>	-	12	3
<b>Herbe</b>	8	-	0
<b>Foin</b>	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 :

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

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

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

Les facteurs sont issus du rapport GRNC<sup>14</sup> pour le Be7 et du rapport AIEA<sup>15</sup> et sont présentées dans le Tableau 21.

Tableau 21 : facteur de transfert au produit animal en  $\text{Bq.kgfrais}^{-1}$  par  $\text{Bq.ingéré.j}^{-1}$ 

Radionucléides	$F_{\text{boeuf}}$	$F_{\text{porc}}$	$F_{\text{lait}}$	$F_{\text{volaille}}$	$F_{\text{oeuf}}$
unité	$\text{Bq.kgfrais}^{-1}$ par $\text{Bq.ingéré.j}^{-1}$				
Be7	8.00E-04	1.00E-02	8.30E-07	4.00E-01	2.00E-02
S35	5.00E-01	5.00E-01	7.90E-03	5.00E-01	5.00E-01

#### 6.3.5.1.4 Cas particulier du tritium

La teneur en tritium dans les produits d'origine végétale ou animale est supposée proportionnelle à la concentration atmosphérique (cf. rapport GRNC<sup>16</sup>)

Pour les végétaux :

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

Avec :

$A_{\text{végH3}}$  : activité du végétal due au tritium en  $\text{Bq.kg}^{-1}$

$A_{\text{air}}$  : activité volumique annuelle moyenne de l'air en  $\text{Bq.m}^{-3}$

$F_{\text{vc}}$  : facteur de concentration au végétal pour le radionucléide considéré en  $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$

<sup>14</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

<sup>15</sup> IAEA. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical reports series no. 472. 2010

<sup>16</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

Les facteurs sont issus du rapport GRNC<sup>17</sup> et sont présentées dans le Tableau 22.

*Tableau 22 : facteur de concentration au végétal pour le tritium*

F <sub>vc</sub> : facteur de concentration au végétal pour le radionucléide considéré en m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup>						
Légumes racines	Légumes feuilles	Légumes fruits	Fruits	Mais	Fourrage	Grains
1.15E+02	1.35E+02	1.30E+02	1.30E+02	8.00E+01	1.35E+02	8.00E+01

Pour les animaux :

$$A_{p.animal\ H3} = A_{air} \times F_{vc}$$

Avec :

A<sub>p.animal H3</sub> : activité du produit animal due au tritium ou en Bq.kg<sup>-1</sup>

A<sub>air</sub> : activité volumique annuelle moyenne de l'air en Bq.m<sup>-3</sup>

F<sub>vc</sub> : facteur de concentration au produit animal pour le radionucléide considéré en m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>

Les facteurs sont issus du rapport GRNC<sup>18</sup> et sont présentées dans le Tableau 23.

*Tableau 23 : facteur de concentration au produit animal pour le radionucléide considéré en m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>*

Radionucléides	F <sub>boeuf</sub>	F <sub>porc</sub>	F <sub>lait</sub>	F <sub>volaille</sub>	F <sub>oeuf</sub>
unité	m3/kg frais	m3/kg frais	m3/kg frais	m3/kg frais	m3/kg frais
H3	1.15E+02	1.15E+02	1.35E+02	1.15E+02	1.15E+02

### 6.3.5.2 Calcul des doses d'exposition par voie digestive

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<sub>ing</sub> : Dose efficace par ingestion (mSv/kg poids corporel/jour)
- CD<sub>ing</sub> : coefficient de dose efficace par ingestion (Sv.Bq<sup>-1</sup>)
- A<sub>i</sub> : 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<sub>i</sub> : quantité de l'aliment i ingérée (kg/jour)
- f<sub>i</sub> : fraction d'aliment i provenant de la zone d'exposition (-)

<sup>17</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

<sup>18</sup> Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, GRT3,Annexe 8-2

- 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 au 6.3.5.1.

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'INERIS<sup>19</sup> et utilisées dans le logiciel MODUL'ERS pour chaque catégorie d'âge étudié (cf. Tableau 24).

*Tableau 24 : 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
<b>Poids (kg)</b>	12.4	28.7	70.4
<b>Consommation de terre</b>			
<b>Quantité de terre ingérée (mg/j)</b>	50	50	20
<b>Consommation de légumes et fruits</b>			
<b>Quantité de fruit ingérée (g/j)</b>	53	90	160
<b>Quantité de tubercules ingérée (g/j)</b>	52	46	58
<b>Quantité de légume racine ingérée (g/j)</b>	26	7	12
<b>Quantité de légume feuille ingérée (g/j)</b>	22	10	24
<b>Quantité de légume fruit ingérée (g/j)</b>	40	64	110
<b>Consommation de produits d'origine animale</b>			
<b>Quantité de viande de volaille ingérée (g/j)</b>	1.1	1.7	3.2
<b>Quantité d'œufs ingérée (g/j)</b>	11.0	10.0	15.0

*Tableau 25 : fraction d'aliments auto-produits (données INERIS)*

Catégories d'aliments	Fraction d'aliments auto-produits pour la population moyenne
<b>Catégories d'aliments</b>	<b>Fraction d'aliments auto-produits</b>
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

<sup>19</sup> Rapport INERIS-DRC-14-141968-11173C (juin 2017) – Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS

Le Tableau 26 présentent les doses d'exposition pour chaque tranche d'âge considéré (enfant âgé de 1 à 2 ans, enfant âgé de 10 ans, adulte) pour les différents scénarios :

- Scénario habitant majorant (groupe de référence : MAS HORIZON, cf. Figure 16);
- Scénario habitant avec jardin (groupe de référence : Rousselière, cf. Figure 16);
- Scénario Ecole (groupe de référence : école primaire R-G.Cadou, cf. Figure 16).
- Scénario travailleur (groupe de référence : MAS HORIZON pour leurs heures de travail et Rousselière, le reste du temps, cf. Figure 16).

*Tableau 26 : dose efficace par ingestion (mSv/an)*

Scénario	Cible	Dose interne par ingestion sol	Dose interne par ingestion végétaux	Dose interne par ingestion animaux	Dose interne totale par ingestion
Habitant majorant	Adulte	7.0E-10	-	-	7.0E-10
Habitant avec jardin	Adulte	7.6E-11	7.7E-07	6.8E-09	7.6E-11
	Enfant âgé de 10 ans	1.6E-10	4.4E-07	4.4E-09	1.6E-10
	Enfant âgé de 1 à 2 ans	1.6E-10	3.5E-07	4.7E-09	1.6E-10
Ecole	Enfant âgé de 10 ans	1.0E-10	-	-	1.0E-10
Travailleur	Adulte	8.6E-10	4.4E-07	4.4E-09	8.6E-10

Les résultats détaillés par radioéléments sont présentés en Annexe 5.

## 6.4 EVALUATION DES RISQUES

### 6.4.1 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 (4,5 mSv<sup>20</sup>). 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.

### 6.4.2 Evaluation des risques sanitaires

Le Tableau 27 présente les doses efficaces d'exposition pour respectivement :

- Scénario habitant majorant (groupe de référence : MAS HORIZON, cf. Figure 16);
- Scénario habitant avec jardin (groupe de référence : Rousselière, cf. Figure 16);
- Scénario Ecole (groupe de référence : école primaire R-G.Cadou, cf. Figure 16).

<sup>20</sup> IRSN 2016 toutes sources d'exposition confondues : [https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-population/exposition-population-france-metropole/Documents/IRSN\\_Infographie-Exposition-population\\_201609.pdf](https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-population/exposition-population-france-metropole/Documents/IRSN_Infographie-Exposition-population_201609.pdf)

- Scénario travailleur (groupe de référence : MAS HORIZON pour leurs heures de travail et Rousselière, le reste du temps, cf. Figure 16).

Les résultats détaillés par radioélément et voies d'exposition sont détaillés en Annexe 6.

*Tableau 27 : doses efficace totale (mSv/an)*

Scénario	Cible	Dose externe (irradiation panache et dépôts)	Dose interne par inhalation	Dose par transfert transcutané	Dose interne par ingestion	Dose efficace totale
Habitant majorant	Adulte	4.9E-02	2.8E-03	2.4E-06	7.0E-10	5.2E-02
Habitant avec jardin	Adulte	4.5E-03	2.6E-04	2.0E-07	7.7E-07	4.7E-03
	Enfant âgé de 10 ans	4.5E-03	2.7E-04	1.8E-07	4.5E-07	4.8E-03
	Enfant âgé le 1 à 2 ans	4.5E-03	2.6E-04	1.3E-07	3.5E-07	4.8E-03
Ecole	Enfant âgé de 10 ans	1.9E-03	1.2E-04	1.3E-07	1.0E-10	2.0E-03
Travailleur	Adulte	1.5E-02	4.0E-03	3.3E-06	4.5E-07	1.9E-02
<b>Dose efficace admissible en France</b>						<b>1</b>
<b>Dose efficace moyenne annuelle en France</b>						<b>4,5</b> (2,9 mSv d'origine naturelle et 1,6 mSv d'origine artificielle)

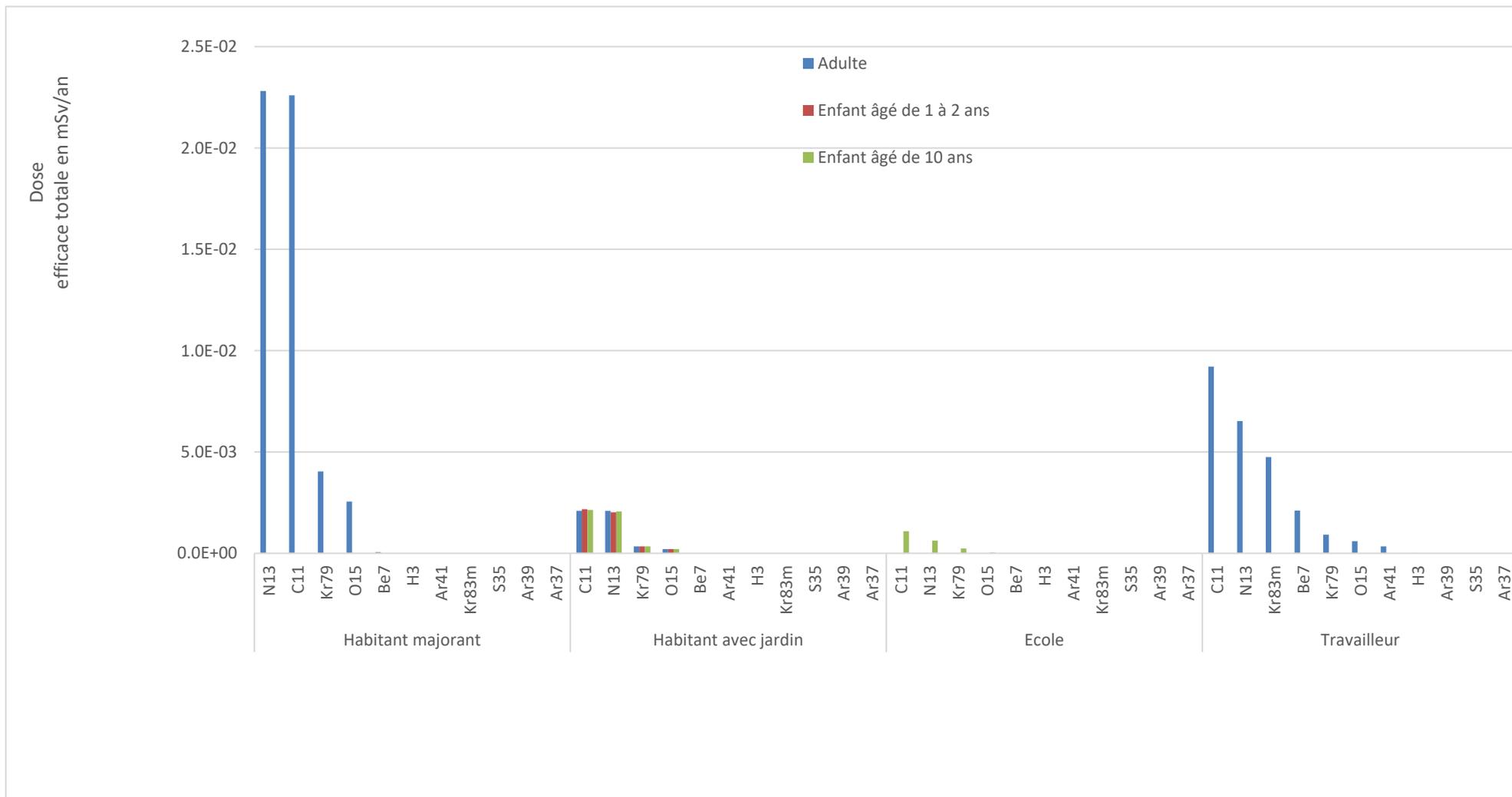
Quel que soit le scénario d'exposition et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions d'ARRONAX en fonctionnement normal est très faible vis-à-vis de la dose admissible en France (5% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

Le scénario majorant correspond au scénario Habitant Majorant (adulte résidant au MAS Horizon est la avec une dose efficace de 0,05 mSv à comparer à la dose efficace admissible de 1 mSv/an.

*Pour rappel, les concentrations et dépôts au niveau du CHU étant du même ordre de grandeur qu'au niveau de la MAS HORIZON, les doses au niveau du CHU seraient du même niveau également.*

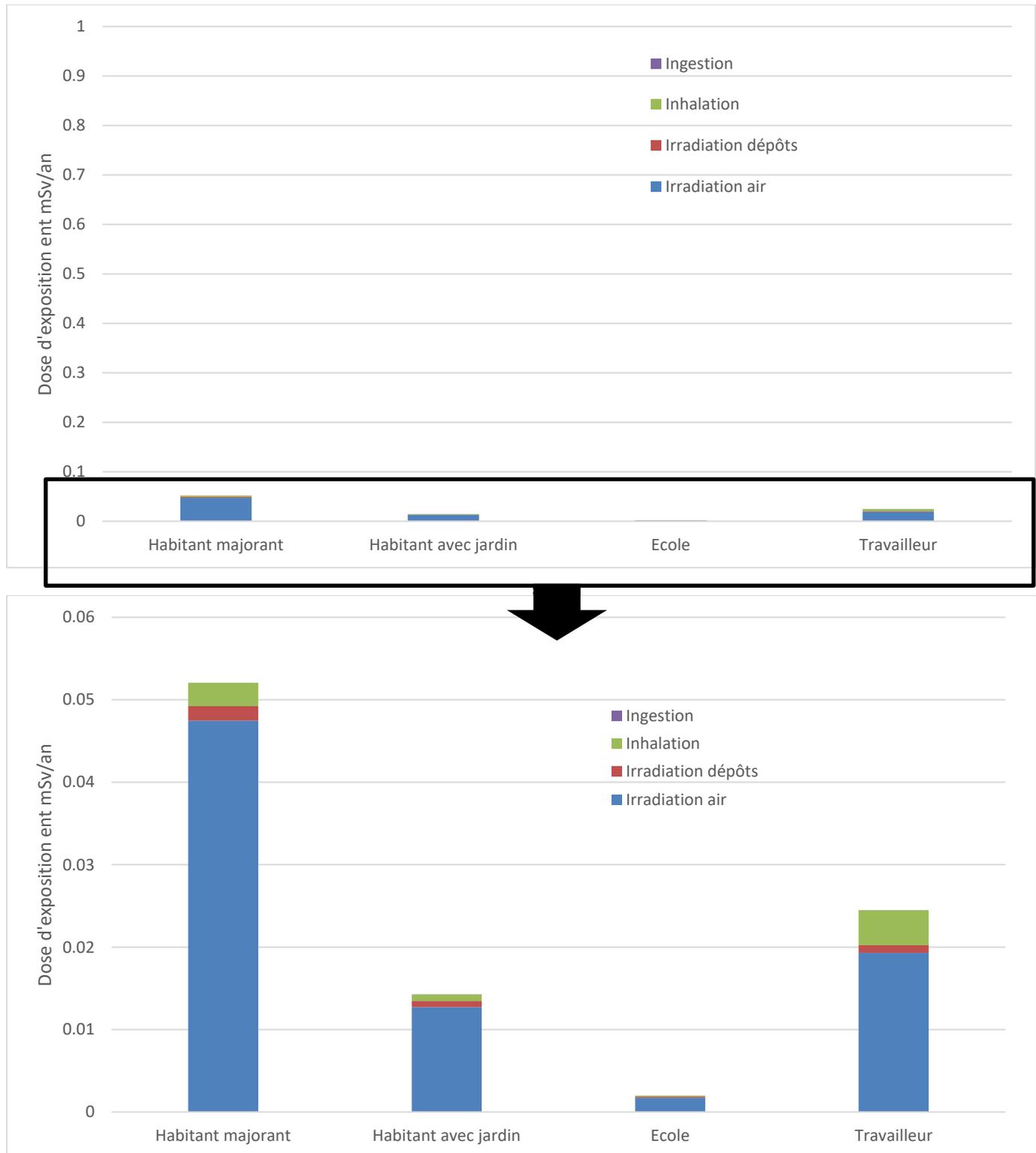
Comme le montre la Figure 21, la dose efficace totale annuelle est essentiellement associée au carbone 11 et à l'azote 13. Ces deux radionucléides représentent à eux seuls 87 % de la dose efficace totale.

Figure 21 : dose efficace totale par radioéléments – scénario Habitant le plus exposé (Mas Horizon)



L'exposition externe par irradiation panache est de loin la voie d'exposition principale (environ 90% de la dose d'exposition totale), suivi par l'exposition externe par irradiation dépôts, les autres voies d'exposition étant très faibles quel que soit le groupe de référence étudié.

Figure 22 : répartition de la dose par type d'exposition



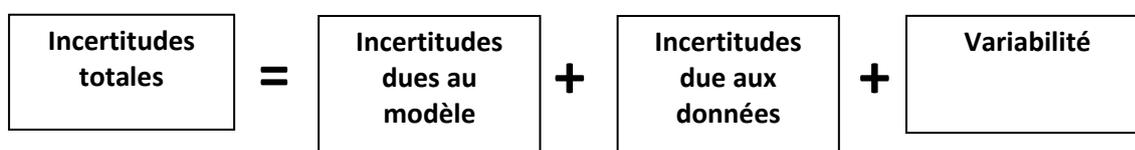
## 6.5 INCERTITUDES

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

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

### 6.5.1 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 :



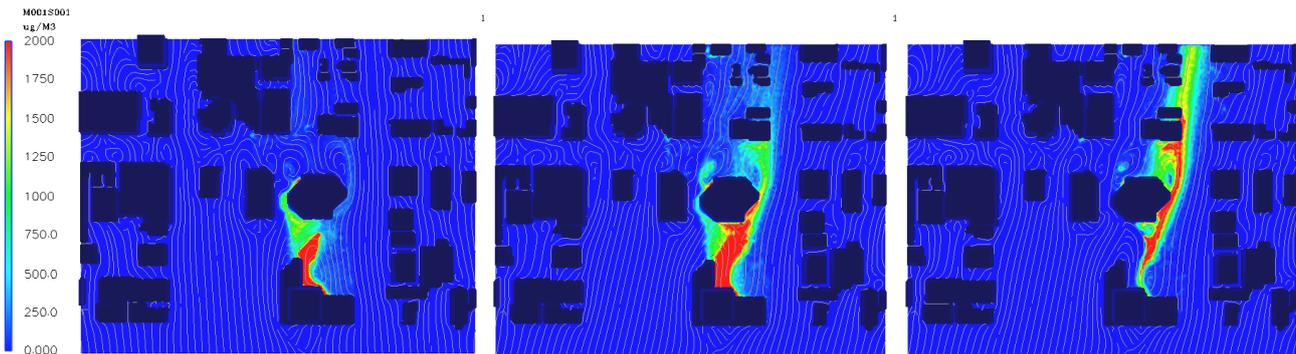
Pour d'autres auteurs, elles ont pour origine trois sources majeures (Hanna, 2004) en ce qui concerne la modélisation de la qualité de l'air :

- 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.

#### 6.5.1.1 Incetitudes liées au modèle : validation du modèle MSS

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

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

Figure 23 : lignes de courant et concentration en SF6 à 4h10, 4h20 et 4h30

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

### 6.5.1.2 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.

#### 6.5.1.2.1 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.

#### 6.5.1.2.2 Incertitudes liées aux mesures météorologiques

Les données météorologiques sont issues des mesures Météo-France

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

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

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

#### 6.5.1.2.3 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.

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.

### **6.5.1.3 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 3D permet aujourd'hui de quantifier les fluctuations de concentrations autour de la concentration moyenne calculée.

## **6.5.2 Incertitudes relatives à l'évaluation des risques sanitaires**

### **6.5.2.1 Facteurs de surestimation des risques**

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

#### **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.

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

#### **Constance des paramètres**

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

#### **Interactions des polluants**

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

## 7. CONCLUSION

Dans le cadre de sa demande d'autorisation, ARRONAX a demandé à ARIA Technologies de réaliser une étude de dispersion afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques en radionucléides du cyclotron de Saint Herblain (44) sur les riverains présents autour du site, en fonctionnement normal et accidentel des installations du site. Ce travail a fait l'objet du rapport ARIA/2019.021.

Le présent document s'inscrit dans la continuité. Il tient compte de l'ensemble des remarques de l'avis IRSN n°2°21-00134 ainsi que l'évolution des bonnes pratiques pour la réalisation de ce type d'études depuis 2019. Il inclut aussi le nouveau projet du GIP ARRONAX qui souhaite installer un nouveau système de production de radionucléides pour des applications médicales dans sa zone réglementée sur son site de Saint Herblain (44) en France. Ce nouveau système comprend notamment l'implantation d'un cyclotron 15-20 MeV dans une casemate existante et une station d'irradiation de cible solide muni d'un système de transfert permettant de récupérer de manière sécurisée les matières irradiées à destination des enceintes blindées de traitement déjà existante (projet IK18). Ce nouvel équipement sera utilisé notamment pour la production de  $^{64}\text{Cu}$  de manière quotidienne et pourra être utilisé pour une production industrielle de  $^{18}\text{F}$  par une entité partenaire.

Afin de préciser le terme source, une note de calcul dénommée « Détermination des rejets pour le projet IK18 » permettant d'estimer les rejets radioactifs liés à l'exploitation d'un cyclotron 18 MeV au sein du GIP ARRONAX a été établie et se trouve en Annexe 1. Il a été constaté que l' $^{13}\text{N}$  ajouté par le fonctionnement de IK18 est très négligeable par rapport aux rejets du C70. Pour l' $^{41}\text{Ar}$ , l'augmentation de rejet est de l'ordre de 10 %. Cependant, l'impact dosimétrique de l' $^{41}\text{Ar}$  est faible devant les autres radionucléides. Il a donc été conclu que l'ajout de ces rejets en fonctionnement normal n'impacte pas de manière significative le terme source initial lié à l'utilisation du cyclotron C70 seul et que ces valeurs ne remettent pas en cause les résultats de l'étude d'impact réalisée en 2019 pour l'exposition de la population (cf. Annexe 2).

**Compte-tenu des radionucléides rejetés et de l'environnement du site, les voies d'exposition retenues sont :**

- **l'exposition externe par irradiation (exposition externe au panache et aux dépôts) ;**
- **l'exposition interne par inhalation ;**
- **l'exposition par passage transcutané (pour l'eau tritiée uniquement) ;**
- **l'exposition interne par ingestion.**

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 d'ARRONAX en fonctionnement normal est très faible vis-à-vis de la dose admissible en France (5% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

Le groupe de référence le plus touché est la MAS HORIZON avec une dose efficace de 0,05 mSv à comparer à la dose efficace admissible de 1 mSv/an. Pour rappel, les concentrations et dépôts au niveau du CHU étant du même ordre de grandeur qu'au niveau de la MAS HORIZON, les doses au niveau du CHU seraient du même niveau également.

La dose efficace totale annuelle est essentiellement associée au carbone 11 et à l'azote 13. Ces deux radionucléides représentent à eux seuls 87% de la dose efficace totale.

L'exposition externe par irradiation panache est de loin la voie d'exposition principale (environ 90% de la dose d'exposition totale), suivi par l'exposition externe par irradiation dépôts, les autres voies d'exposition étant très faibles quel que soit le groupe de référence étudié.

**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 du site ARRONAX en fonctionnement normal est très faible vis-à-vis de la dose admissible en France (5% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).** Rappelons que la cheminée est dotée de deux filtres THE (très haute efficacité) en série. Cependant, afin d'être majorant, la filtration n'a pas été prise en considération dans cette étude. Les résultats sont donc majorants.

# **ANNEXES**

## **Annexe 1 : Détermination des rejets**

## Détermination des rejets pour le projet IK18

Auteur :F. Haddad –Vérificateur : L. Perrigaud

le 08 MAR 2023

**Objectifs :** Déterminer les activités rejetées annuellement lors du fonctionnement du cyclotron IK18. On considèrera un fonctionnement sur 240 jours par an et 6 heures d'irradiation F18 et 6h de Cu64 par jour.

### Bibliographie :

- [1] Utilisation des bases de données nucléaires (nudat2, EXFOR, TENDL)
- [2] Document interne IBA (Technical report Air Activation in C18/9 Vault).
- [3] "Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities", NCRP Report N° 144, 2005.

### Eléments considérés pour les rejets :

Radionucléides	O-15	N-13	C-11	Ar-41
T <sub>1/2</sub>	2 mn	9,97 mn	20,4 mn	109 mn

L'air sec se compose d'environ 78 % d'azote, 21 % d'oxygène et 1 % d'argon.

### Hypothèse du calcul :

Ces éléments peuvent être produits par interaction nucléaire induite par les neutrons produits lors de l'interaction du faisceau de proton avec la cible de production de radionucléides. On considèrera le cas de la cible de fluor car il est celui qui est le plus documenté et on multiplie par 2 pour tenir compte des rejets associés à la production de Cu-64.

Radionucléides	O-16(n,x)O-15	N-14(n,x)N-13	N-14(n,x)C-11	Ar-40(n,x)Ar-41
E <sub>seuil</sub> (MeV)	1,6,6	11,3	24,4	0
	Section efficace quasi nulle. Pas de production	10 mb à 18 MeV	Pas de production	600 mb

La production de Ar-41 se fait via l'activation neutronique du Ar-40 qui est présent dans l'air à hauteur de (1%). La section efficace de production est égale à 600 mb pour les neutrons thermiques (TENDL) et 610 mb dans le document IBA [2].

La production de N-13 sera la seule autre production considérée, les autres sont soit impossibles soit ont des valeurs de sections efficaces très faibles. On prendra les valeurs de sections efficaces expérimentales de EXFOR (CF. Annexe) [1].

### Calcul de la production de Ar-41 :

D'après la référence [3] (p. 341), la production d'<sup>41</sup>Ar par les neutrons thermiques est :

$$R = \Phi_{th} \times N_A \times A^{-1} \times f_w \times \rho_{air} \times \sigma \quad (1)$$

avec

- $\Phi_{th}$  est le flux de neutron thermique dans la casemate
- $f_w$  = fraction massique de l'argon dans l'air = 0.01
- $\rho_{air}$  = densité de l'air = 0.0012 g/cm<sup>3</sup>
- $N_a$  = nombre d'Avogadro (6.02 10<sup>23</sup> atomes/mole)
- $A$  = nombre de masse = 39.95 g/mole
- $\sigma$  = section efficace de capture neutronique = 600 mb = 0.60 10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>

On ne tient pas compte de la décroissance car la période est supérieure au temps de recyclage de l'air dans la casemate (10 renouvellements par heure soit un renouvellement de l'air toutes les 6 mn)

En utilisant NCRP 144, le flux de neutron thermique peut être déterminé en utilisant la relation suivante :

$$\Phi_{th} = 1.25 Q_F / S$$

avec

- $Q_F$  = production de neutron rapide (n/s);
- $S$  = surface de la casemate (en  $cm^2$ ).

On obtient alors un rendement de production (atomes/s. $cm^3$ ) :  $R(^{41}Ar) = 1.36 \cdot 10^{-7} \times Q_F / S$

On considère un faisceau de protons de  $150\mu A$  pour une production de  $^{18}F$  via la réaction  $^{18}O(p,n)^{18}F$  ce qui donne une production d'un neutron par noyau de  $^{18}F$  produit soit

$$Q_F = 150 \mu A \times 250 \text{ mCi}/\mu A \times 3.7 \cdot 10^7 = 1.35 \cdot 10^{12} \text{ n/s}$$

La casemate P1 à une surface de mur totale de  $S = (2,2 \cdot (9,5 + 2,5 + 9 + 2 + 4,5) + 2 \cdot (2,5 \cdot 9,5 + 9 \cdot 4/2)) = 1,44 \cdot 10^6 \text{ cm}^2$ .

On obtient donc un nombre d'atomes d' $^{41}Ar$  produits lors de la production de  $^{18}F$  de :

$$R(^{41}Ar) = 0,1271 \text{ atomes}/cm^3/s = 1,271 \cdot 10^5 \text{ atomes}/m^3/s$$

En considérant le renouvellement d'air, on considère qu'il faut 6 mn pour que l'Argon-41 arrive à la cheminée et donc on a une partie qui a décréé selon la relation :

$$A(Ar-41) = \lambda N(Ar41) = \lambda R(^{41}Ar) \times (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{Avec } \lambda = 0.105 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

On obtient alors :  $A(^{41}Ar) = 1,271 \cdot 10^5 \times 360 \text{ s} = 0,815 \text{ Bq}/m^3/s$ .

#### Calcul de la production de N-13 :

On va reprendre la méthodologie précédente avec les modifications suivantes :

- La réaction nucléaire se fait avec des neutrons rapides. On a donc  $\Phi_{th} = Q_F / S$
- La section efficace moyenne sur l'intervalle 11 MeV -18 MeV est de 7 mb soit une section efficace intégrée de  $7 \cdot 7 = 49 \text{ mb}$
- La constante radioactive de N-13 est de  $\lambda = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

On obtient :  $A(N-13) = 0,483 \text{ Bq}/m^3/s$

#### Terme source à considérer :

Radionucléides	O-15	N-13	C-11	Ar-41
Rejets production $^{18}F$ (Bq/m3/s)	0	0,483	0	0,815
Rejets totaux (Bq/m3/s)	0	0,966	0	1,630
Rejets annuels	0	$7,21 \cdot 10^8$	0	$1,22 \cdot 10^9$

On produit environ 10 fois moins d'argon-41 par rapport au C70 car on considère 2 fois moins de temps de fonctionnement, une intensité de  $150\mu A$  au lieu de  $200\mu A$  et le nombre de neutrons produits est plus faible (facteur environ 10 entre 18 MeV et 70 MeV). Cela donne un facteur total d'environ 30.

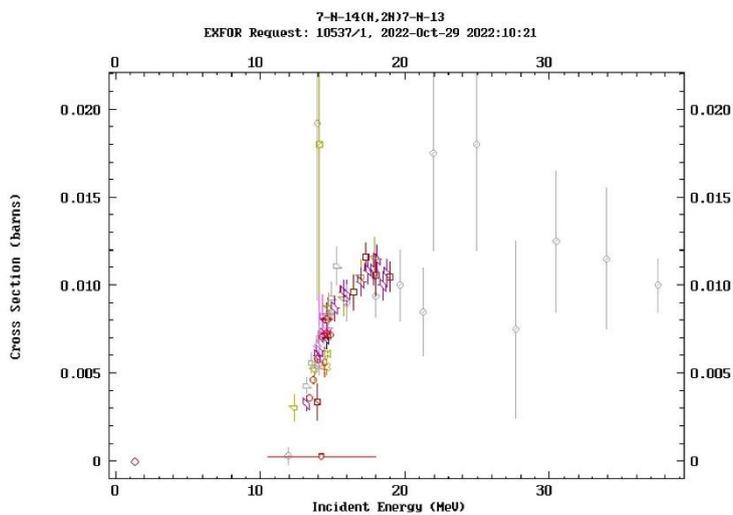
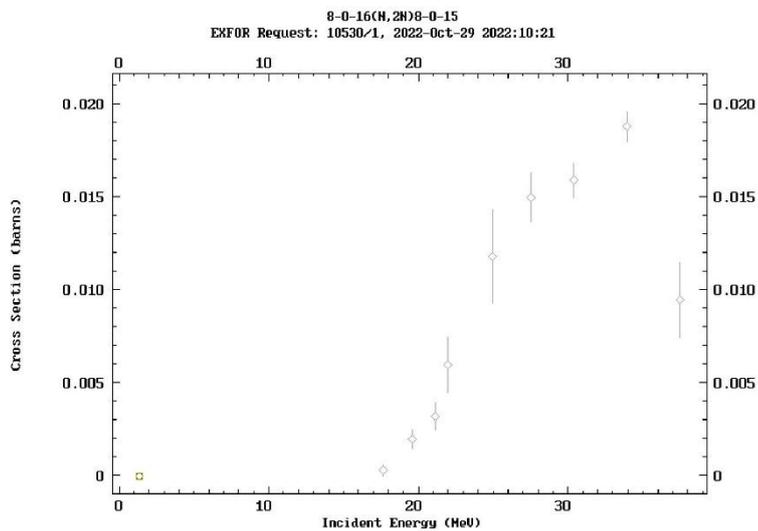
Pour N13 on a un facteur 10000. Ceci peut s'expliquer en partie par les mêmes facteurs que pour Ar-41 auxquels il faut ajouter, un facteur 10 sur la section efficace et le fait que les neutrons vont avoir la possibilité d'interagir de multiple fois avec l'air avant d'être thermalisée et arriver en dessous de

l'énergie seuil de production de N13 (autre facteur 10).A cela s'ajoute le fait que N13 est aussi créé dans le C70 par interaction directe du faisceau de protons avec l'eau du circuit de refroidissement..

**Remarque :**

Le débit d'air à prendre en compte est celui de la casemate P1. En sortie de cheminée il faut éventuellement tenir compte de la dilution provenant de l'extraction des autres casemates.

### Annexe



## **Annexe 2 : Note prise en compte Kiube**

## Intégration des rejets atmosphérique liés au fonctionnement d'un nouveau cyclotron 18MeV « Kiube » en zone réglementée du GIP ARRONAX

### Contexte :

Le GIP Arronax souhaite installer un nouveau système de production de radionucléides pour des applications médicales dans sa zone réglementée sur son site de St Herblain (44) en France.

Il comprend notamment l'implantation d'un cyclotron 15-20 MeV dans une casemate existante et une station d'irradiation de cible solide muni d'un système de transfert permettant de récupérer de manière sécurisée les matières irradiées à destination des enceintes blindées de traitement déjà existante (projet IK18).

Ce nouvel équipement sera utilisé notamment pour la production de  $^{64}\text{Cu}$  de manière quotidienne et pourra être utilisé pour une production industrielle de  $^{18}\text{F}$  par une entité partenaire.

Dans ce contexte, nous avons souhaité prendre en compte la contribution de rejet d'effluent radioactif lié à l'exploitation et au fonctionnement de cet accélérateur dans la mise à jour de nos études d'impacts.

### - Fonctionnement normal -

#### Analyse basée sur notre étude de production d'effluent radioactif lors du fonctionnement d'un cyclotron 18 MeV pour la production de Cuivre 64 et Fluor 18

Afin de préciser le terme source, nous avons établi une note de calcul dénommée « Détermination des rejets pour le projet IK18 » permettant d'estimer les rejets radioactifs liés à l'exploitation d'un cyclotron 18MeV au sein du GIP ARRONAX.

Cette analyse a permis de conclure à des rejets en fonctionnement normal d'utilisation à hauteur de :

- $7,21 \cdot 10^8$  Bq de rejet annuel en N13 et  $1,22 \cdot 10^9$  Bq de rejet annuel en Ar41

Ces valeurs sont à comparer à notre terme source en fonctionnement normal pris en compte pour notre étude d'impact lié au fonctionnement du cyclotron C70 :

- N13  $4,62 \cdot 10^{13}$  Bq/an et Ar41  $1,14 \cdot 10^{10}$  Bq/an

On constate que l'N13 ajouté par le fonctionnement de IK18 est très négligeable par rapport aux rejets du C70. Pour Ar41, l'augmentation de rejet est de l'ordre de 10%. Cependant, l'impact dosimétrique de Ar41 est faible devant les autres radionucléides. Nous pouvons donc conclure que l'ajout de ces rejets en fonctionnement normal n'impacte pas de manière significative le terme source initial lié à l'utilisation du cyclotron C70 seul et que ces valeurs ne remettent pas en cause les résultats de notre étude d'impact pour l'exposition de la population.

**Annexe 3 : Description du terme source  
(ARIA\_Nouveau terme  
source\_v5\_23122019.pdf)**

# Terme source Fonctionnement Normal

Version 5

Date : 23 Décembre 2019

Objet : Mise à jour de l'étude d'impact suite à l'actualisation du terme source (V5)

## 1. PREAMBULE

Dans le cadre de l'activité du GIP Arronax, des rejets gazeux sont émis via l'émissaire de sortie.

Suite à la mise en place d'une méthodologie permettant la caractérisation des effluents gazeux de la zone réglementée défini dans le document « Nouveau terme source V5\_19122019 », nous souhaitons réactualiser notre étude d'impact.

## 8. MODE DE PRODUCTION DES EFFLUENTS GAZEUX RADIOACTIFS :

Les conditions d'irradiations au sein du GIP ARRONAX sont variables au cours du temps. Cependant, les rejets sont majoritairement issus des radionucléides produits durant la phase de tir de production de strontium (haute intensité, haute énergie et longue durée) et durant la radiochimie en enceinte blindée pour extraire le strontium. Le fonctionnement du cyclotron C70 du GIP Arronax génère donc des effluents radioactifs provenant de trois modes de production :

- Activation de l'air en casemate de réaction par les neutrons secondaires. Ces rejets sont collectés par la CTA 3 de notre Centrale de Traitement d'Air.
- Activation de l'eau de refroidissement des cibles par les protons du faisceau primaire. Ces rejets sont collectés par la CTA 4 de notre Centrale de Traitement d'Air.
- Radiochimie d'extraction du strontium. Ces rejets sont collectés par l'extracteur des enceintes blindées.

Ces modes de production ont été pris en compte pour estimer le terme source à partir de calculs de type Monte-Carlo et de calculs utilisant les sections efficaces de production. Grâce à ces calculs, nous connaissons la proportion relative des radionucléides présents dans les rejets. Des mesures à l'aide de prélèvements et de barbotages permettent également d'obtenir des informations sur les rejets.

Les deux voies principales de production de rejets gazeux ne génèrent pas les mêmes radionucléides :

- Tir haute intensité en casemates de réactions nucléaires :
  - Rn produits : H-3/Be-7/C-11/N-13/N-16/O-15/S-35/Ar-37/Ar-39/Ar-41
- Chimie de production de strontium :
  - Rn produits : Kr-79/Kr-83m, H-3

## 9. TERME SOURCE ACTUALISE ET CONTRAINT PAR LES MESURES POUR UN FONCTIONNEMENT PENALISANT.

### 9.1 PERSPECTIVE DE FONCTIONNEMENT NORMAL

Dans une perspective d'évolution du fonctionnement du cyclotron, nous devons reconsidérer notre terme source en nous basant sur les rejets actuels majorés par un facteur 2.2 pour prendre en compte un temps de fonctionnement de 6000 hrs à 200  $\mu$ A pour les tirs haute intensité (actuellement notre mode de fonctionnement est basé sur un fonctionnement de 4000 heures sous 137  $\mu$ A pour les tirs haute intensité).

**Tableau 28 - Terme source actualisé en fonctionnement pénalisant sur une année : 6000h et tirs haute intensité 200µA**

		Terme source V5 en fonctionnement pénalisant (6000hrs et 200µA)											
Radionucléide		H3	Be7	C11	N13	N16	O15	S35	Ar37	Ar39	Ar41	Kr79	Kr83m
Période		12,32 a	53,22 j	20,36 m	9,97 m	7,16 s	122,24 s	87,37 j	35,04 j	269 j	109,61 m	35,04 h	1,83 h
Activité Gains Bq	Tirs hautes intensité	6,28E+09	2,87E+09	3,78E+13	4,62E+13	3,27E+13	9,61E+12	1,12E+05	5,62E+05	4,14E+05	1,14E+10		
Activité cheminée Bq	Radiochimie	1,01E+11										2,96E+13	1,42E+13
Total en Bq		1,07E+11	2,87E+09	3,78E+13	4,62E+13	3,27E+13	9,61E+12	1,12E+05	5,62E+05	4,14E+05	1,14E+10	2,96E+13	1,42E+13
Total Rn sup à 100jrs		1,07E+11											
Total Rn inf à 100jrs		1,70E+14											

## **Annexe 4 : Description du logiciel MSS**

## Descriptif du modèle Micro SWIFT

### 1. Le domaine

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

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

### 2. Le maillage

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

Le maillage vertical est défini par deux choix :

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

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

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

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

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

### 3. Variables

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

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

### 4. Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle sont :

Le modèle numérique de terrain (MNT) ;

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

Le masque terre - mer (le cas échéant) ;

Une description des bâtiments (facultatif) ;

Toutes les données météorologiques disponibles (Vent, Température).

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

## 5. Méthodes de calcul

Micro SWIFT comporte trois étapes de calcul distinctes :

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

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

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

## 6. Description des sorties

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

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

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

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

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

Fournissent une turbulence tridimensionnelle représentative du site étudié.

## 7. Références

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

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

SNCF (2000)

CERTU, DDE 42, ADEME (1999)

DRIRE Haut.10-Normandie (1998)

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

ROUEN-LE HAVRE Réseau AIR NORMAND (1997)

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

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

ENEL Centre de Recherches (MILAN-ITALIE)

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

RHONE-POULENC SA (LYON-FRANCE)

Institut Paul SCHERRER (VILLIGEN-CH)

Institut Josef STEFAN (Slovénie)

IBERDROLA SA (Madrid- Espagne)

Defence Nuclear Agency (Washington - USA)

HANFORD Nuclear Center (Seattle - USA)

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

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

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

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

CEA-DAM (2005)

Città di BOLOGNA (2003)

## Description du modèle Micro SPRAY

### INFORMATIONS DE BASE

**Version :**

Version 5.0

**Champs d'application :**

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

### INFORMATIONS DETAILLEES

**Description :**

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

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

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

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

où:

$Z$  est la coordonnée géométrique verticale

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\mathbf{T}_{L_{u'_x}}, \mathbf{T}_{L_{u'_y}}, \mathbf{T}_{L_{u'_z}}$$

dans le cas des schémas de Thomson 1984 ou bien :

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

$$\mathbf{T}_{L_{u'_x}}, \mathbf{T}_{L_{u'_y}}, \mathbf{T}_{L_{u'_z}}$$

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

dans le cas des schémas de Thomson 1987.

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

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

#### **Limitations :**

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

#### **Résolution :**

**Résolution spatiale horizontale :**

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

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

Résolution maximale conseillée: 10km

Résolution spatiale verticale :

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

**Résolution temporelle :**

Possibilité de choisir entre des pas d'intégration  $\Delta t$  des équations de mouvement fixes ou variables.

$\Delta t$  variables limités automatiquement par les caractéristiques du vent moyen et de la turbulence vue par la particule.

**Techniques de résolution :**

Différences finies pour l'évolution temporelle des particules.

Optimisation du choix des pas de temps sur des échelles de temps Lagrangien dans le cas du schéma à  $\Delta t$  variable.

**Données d'entrées requises :**

Générales :

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

Météorologiques :

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

Emissions :

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

**Données de sorties générées :**

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

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

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

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

### **Disponibilité d'interfaces :**

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

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

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

### **Documentation :**

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

### **Validation :**

#### **Simulations sur terrain plat :**

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

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

Simulation en conditions d'atmosphère stable et vent faible.

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

Simulations de la surhauteur dynamique.

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

#### **Simulations sur terrain complexe :**

Expérimentation en soufflerie EPA sur des collines bidimensionnelles.

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

Expérience Transalpine.

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

### Campagne Sostani.

Des simulations de la période relative à la campagne de 1991 près de la centrale thermique de Sostani en Slovénie ont été réalisées conjointement par ENEL, CISE et Josef Stefan Institute de Lubiana. Le site est modérément montagneux et les situations de stabilité simulées étaient caractérisées par des conditions neutres et instables, avec quelques périodes de vent calme. Les résultats, présentés au congrès ENVIROSOFT 1994 de Barcelone (Espagne) et au workshop de Manno "Intercomparison of advanced practical short range atmospheric dispersion models" de 1993 (Tinarelli et al., 1993), ont été comparés avec ceux de modèles eulériens simples pour terrain complexe et d'un modèle lagrangien à bouffées montrant une supériorité de la part du modèle SPRAY qui se prête mieux à la simulation de situations complexes. Le travail mis en œuvre pour effectuer ces simulations avec SPRAY est décrit entre autre dans un rapport interne de l'ENEL (Tinarelli et al., 1994).

### Applications :

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

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

**Application dans le cadre de l'étude pluridisciplinaire du dépérissement du pin forestier et des autres espèces biogéniques de la vallée d'Aoste** (Manzi et al., 1998). Des simulations de la dispersion des polluants provenant des principales émissions (trafic routier, industrie et chauffage domestique) recensées dans la région ont été effectuées sur un domaine de 100 × 80 km<sup>2</sup>. Les simulations, sur une durée moyenne de 10 à 15 jours, ont permis de fournir une description climatologique du site sur un domaine extrêmement complexe, aussi bien pour des conditions estivales qu'hivernales.

**Simulation des émissions provenant de la centrale thermoélectrique de Vado Ligure**, pour le compte de la province de Savone. Des simulations de la dispersion des fumées émises par la centrale ont été réalisées sur une durée d'environ 10 jours sur un domaine de 20 × 23 km<sup>2</sup>. L'objectif était de contrôler l'impact de la centrale sur le territoire environnant, à forte complexité topographique, et le niveau de représentativité du réseau de mesures météorologiques ou de qualité de l'air géré par l'ENEL et la province de Savone.

**Références :**

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

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

## **Annexe 5 : Résultats de calcul des doses par ingestion**

Tableau 29 : dose efficace par ingestion – groupe de référence Habitation la plus exposée

Radioéléments	Enfant (1 - 2 ans)				Enfant 10 ans				Adulte (> 17 ans)			
	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale
	Bq/kg/j											
H3	0E+00	8E-10	5E-09	5E-09	0E+00	8E-10	4E-09	5E-09	0E+00	1E-09	7E-09	8E-09
Be7	2E-10	3E-07	1E-12	3E-07	2E-10	4E-07	1E-12	4E-07	6E-11	8E-07	2E-12	8E-07
C11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S35	4E-14	0E+00	0E+00	4E-14	4E-14	0E+00	0E+00	4E-14	2E-14	0E+00	0E+00	2E-14
Ar37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ar39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ar41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr83m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 30 : dose efficace par ingestion – groupe de référence Ecole

Radioéléments	Enfant (1 - 2 ans)				Enfant 10 ans				Adulte (> 17 ans)			
	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale
	Bg/kg/j											
H3	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Be7	1E-10	0E+00	0E+00	1E-10	1E-10	0E+00	0E+00	1E-10	5E-11	0E+00	0E+00	5E-11
C11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S35	3E-14	0E+00	0E+00	3E-14	3E-14	0E+00	0E+00	3E-14	1E-14	0E+00	0E+00	1E-14
Ar37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ar39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ar41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr83m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 31 : dose efficace par ingestion – groupe de référence Habitation la plus exposée

Radioéléments	Enfant (1 - 2 ans)				Enfant 10 ans				Adulte (> 17 ans)			
	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale
	Bg/kg/j											
H3	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00
Be7	1E-09	0E+00	0E+00	1E-09	1E-09	0E+00	0E+00	1E-09	7E-10	0E+00	0E+00	7E-10
C11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S35	4E-13	0E+00	0E+00	4E-13	4E-13	0E+00	0E+00	4E-13	2E-13	0E+00	0E+00	2E-13
Ar37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Radioéléments	Enfant (1 - 2 ans)				Enfant 10 ans				Adulte (> 17 ans)			
	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale	sol	végétaux	animaux	dose totale
	Bg/kg/j											
Ar39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ar41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kr83m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## **Annexe 6 : Résultats de calcul des doses par radioéléments et par cibles**

Tableau 32 : dose efficace par voie d'exposition

Cible	Substance	Type	Irradiation air	Irradiation dépôts	Dose externe (irradiation panache et dépôts)	Dose interne par inhalation	Dose par passage transcutané	Dose interne par ingestion
			mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	
Habitant majorant	H3	Adulte	4.3E-10	0.0E+00	4.3E-10	6.0E-06	2.4E-06	0.0E+00
Habitant majorant	Be7	Adulte	7.7E-08	5.9E-05	5.9E-05	4.6E-07		7.0E-10
Habitant majorant	C11	Adulte	1.9E-02	1.6E-03	2.1E-02	1.8E-03		0.0E+00
Habitant majorant	N13	Adulte	2.2E-02	5.7E-05	2.2E-02	1.0E-03		0.0E+00
Habitant majorant	O15	Adulte	2.5E-03	0.0E+00	2.5E-03	1.5E-05		0.0E+00
Habitant majorant	S35	Adulte	3.0E-16	0.0E+00	1.3E-12	4.4E-10		1.9E-13
Habitant majorant	Ar37	Adulte	8.0E-16	0.0E+00	8.0E-16	0.0E+00		0.0E+00
Habitant majorant	Ar39	Adulte	4.3E-14	0.0E+00	4.3E-14	0.0E+00		0.0E+00
Habitant majorant	Ar41	Adulte	8.1E-06	0.0E+00	8.1E-06	0.0E+00		0.0E+00
Habitant majorant	Kr79	Adulte	4.0E-03	0.0E+00	4.0E-03	0.0E+00		0.0E+00
Habitant majorant	Kr83m	Adulte	2.4E-07	0.0E+00	2.4E-07	0.0E+00		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	H3	Adulte	9.9E-11	0.0E+00	9.9E-11	7.9E-06	3.2E-06	0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	Be7	Adulte	1.7E-08	1.3E-05	1.3E-05	6.0E-07		7.0E-10
MAS_HORIZON Travailleur	C11	Adulte	4.4E-03	3.8E-04	4.7E-03	2.4E-03		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	N13	Adulte	5.0E-03	1.3E-05	5.0E-03	1.3E-03		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	O15	Adulte	5.8E-04	5.7E-07	5.8E-04	2.0E-05		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	S35	Adulte	6.9E-17	2.9E-13	2.9E-13	5.8E-10		1.9E-13
MAS_HORIZON Travailleur	Ar37	Adulte	1.8E-16	0.0E+00	1.8E-16	0.0E+00		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	Ar39	Adulte	9.8E-15	0.0E+00	9.8E-15	0.0E+00		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	Ar41	Adulte	1.9E-06	0.0E+00	1.9E-06	0.0E+00		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	Kr79	Adulte	9.2E-04	0.0E+00	9.2E-04	0.0E+00		0.0E+00
MAS_HORIZON Travailleur	Kr83m	Adulte	5.4E-08	0.0E+00	5.4E-08	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	H3	Adulte	3.6E-11	0.0E+00	3.6E-11	5.0E-07	2.0E-07	8.1E-09
Habitant avec jardin	H3	Enfant âgé de 10 ans	3.6E-11	0.0E+00	3.6E-11	4.5E-07	1.8E-07	5.2E-09
Habitant avec jardin	H3	Enfant âgé de 1 à 2 ans	3.6E-11	0.0E+00	3.6E-11	3.2E-07	1.3E-07	5.4E-09
Habitant avec jardin	Be7	Adulte	6.5E-09	6.4E-06	6.4E-06	3.9E-08		7.7E-07

Cible	Substance	Type	Irradiation air	Irradiation dépôts	Dose externe (irradiation panache et dépôts)	Dose interne par inhalation	Dose par passage transcutané	Dose interne par ingestion
			mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	
Habitant avec jardin	Be7	Enfant âgé de 10 ans	6.5E-09	6.4E-06	6.4E-06	4.7E-08		4.4E-07
Habitant avec jardin	Be7	Enfant âgé de 1 à 2 ans	6.5E-09	6.4E-06	6.4E-06	4.0E-08		3.4E-07
Habitant avec jardin	C11	Adulte	1.7E-03	1.9E-04	1.9E-03	1.6E-04		0.0E+00
Habitant avec jardin	C11	Enfant âgé de 10 ans	1.7E-03	1.9E-04	1.9E-03	2.0E-04		0.0E+00
Habitant avec jardin	C11	Enfant âgé de 1 à 2 ans	1.7E-03	1.9E-04	1.9E-03	2.4E-04		0.0E+00
Habitant avec jardin	N13	Adulte	1.9E-03	5.7E-05	2.0E-03	9.2E-05		0.0E+00
Habitant avec jardin	N13	Enfant âgé de 10 ans	1.9E-03	5.7E-05	2.0E-03	6.4E-05		0.0E+00
Habitant avec jardin	N13	Enfant âgé de 1 à 2 ans	1.9E-03	5.7E-05	2.0E-03	2.2E-05		0.0E+00
Habitant avec jardin	O15	Adulte	2.1E-04	2.7E-07	2.1E-04	1.2E-06		0.0E+00
Habitant avec jardin	O15	Enfant âgé de 10 ans	2.1E-04	2.7E-07	2.1E-04	8.6E-07		0.0E+00
Habitant avec jardin	O15	Enfant âgé de 1 à 2 ans	2.1E-04	2.7E-07	2.1E-04	3.0E-07		0.0E+00
Habitant avec jardin	S35	Adulte	2.6E-17	1.4E-13	1.4E-13	3.8E-11		2.1E-14
Habitant avec jardin	S35	Enfant âgé de 10 ans	2.6E-17	1.4E-13	1.4E-13	3.7E-11		4.5E-14
Habitant avec jardin	S35	Enfant	2.6E-17	1.4E-13	1.4E-13	2.9E-11		4.5E-14

Cible	Substance	Type	Irradiation air	Irradiation dépôts	Dose externe (irradiation panache et dépôts)	Dose interne par inhalation	Dose par passage transcutané	Dose interne par ingestion
			mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	
		âgé de 1 à 2 ans						
Habitant avec jardin	Ar37	Adulte	6.8E-17	0.0E+00	6.8E-17	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar37	Enfant âgé de 10 ans	6.8E-17	0.0E+00	6.8E-17	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar37	Enfant âgé de 1 à 2 ans	6.8E-17	0.0E+00	6.8E-17	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar39	Adulte	3.6E-15	0.0E+00	3.6E-15	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar39	Enfant âgé de 10 ans	3.6E-15	0.0E+00	3.6E-15	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar39	Enfant âgé de 1 à 2 ans	3.6E-15	0.0E+00	3.6E-15	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar41	Adulte	7.1E-07	0.0E+00	7.1E-07	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar41	Enfant âgé de 10 ans	7.1E-07	0.0E+00	7.1E-07	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Ar41	Enfant âgé de 1 à 2 ans	7.1E-07	0.0E+00	7.1E-07	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Kr79	Adulte	3.4E-04	0.0E+00	3.4E-04	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Kr79	Enfant âgé de 10 ans	3.4E-04	0.0E+00	3.4E-04	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Kr79	Enfant âgé de 1 à 2 ans	3.4E-04	0.0E+00	3.4E-04	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Kr83m	Adulte	2.0E-08	0.0E+00	2.0E-08	0.0E+00		0.0E+00
Habitant avec jardin	Kr83m	Enfant	2.0E-08	0.0E+00	2.0E-08	0.0E+00		0.0E+00

Cible	Substance	Type	Irradiation air	Irradiation dépôts	Dose externe (irradiation panache et dépôts)	Dose interne par inhalation	Dose par passage transcutané	Dose interne par ingestion
			mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	
		âgé de 10 ans						
Habitant avec jardin	Kr83m	Enfant âgé de 1 à 2 ans	2.0E-08	0.0E+00	2.0E-08	0.0E+00		0.0E+00
Rousselière Travailleur	H3	Adulte	2.8E-11	0.0E+00	2.8E-11	5.0E-07	2.0E-07	8.1E-09
Rousselière Travailleur	Be7	Adulte	5.0E-09	5.0E-06	5.0E-06	3.9E-08		7.7E-07
Rousselière Travailleur	C11	Adulte	1.3E-03	1.5E-04	1.5E-03	1.6E-04		0.0E+00
Rousselière Travailleur	N13	Adulte	1.5E-03	4.4E-05	1.5E-03	9.2E-05		0.0E+00
Rousselière Travailleur	O15	Adulte	1.6E-04	2.1E-07	1.6E-04	1.2E-06		0.0E+00
Rousselière Travailleur	S35	Adulte	2.0E-17	1.1E-13	1.1E-13	3.8E-11		2.1E-14
Rousselière Travailleur	Ar37	Adulte	5.3E-17	0.0E+00	5.3E-17	0.0E+00		0.0E+00
Rousselière Travailleur	Ar39	Adulte	2.8E-15	0.0E+00	2.8E-15	0.0E+00		0.0E+00
Rousselière Travailleur	Ar41	Adulte	5.5E-07	0.0E+00	5.5E-07	0.0E+00		0.0E+00
Rousselière Travailleur	Kr79	Adulte	2.6E-04	0.0E+00	2.6E-04	0.0E+00		0.0E+00
Rousselière Travailleur	Kr83m	Adulte	1.6E-08	0.0E+00	1.6E-08	0.0E+00		0.0E+00
Ecole	H3	Enfant âgé de 10 ans	2.7E-11	0.0E+00	2.7E-11	3.3E-07	1.3E-07	0.0E+00
Ecole	Be7	Enfant âgé de 10 ans	4.5E-09	4.0E-06	4.0E-06	3.3E-08		1.0E-10
Ecole	C11	Enfant âgé de 10 ans	9.0E-04	9.1E-05	9.9E-04	1.0E-04		0.0E+00
Ecole	N13	Enfant âgé de 10 ans	5.5E-04	5.7E-05	6.1E-04	1.8E-05		0.0E+00
Ecole	O15	Enfant âgé de 10 ans	3.8E-05	4.5E-08	3.8E-05	1.6E-07		0.0E+00
Ecole	S35	Enfant	1.8E-17	8.6E-14	8.6E-14	2.6E-11		2.8E-14

Cible	Substance	Type	Irradiation air	Irradiation dépôts	Dose externe (irradiation panache et dépôts)	Dose interne par inhalation	Dose par passage transcutané	Dose interne par ingestion
			mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	mSv/an	
		âgé de 10 ans						
Ecole	Ar37	Enfant âgé de 10 ans	4.8E-17	0.0E+00	4.8E-17	0.0E+00		0.0E+00
Ecole	Ar39	Enfant âgé de 10 ans	2.5E-15	0.0E+00	2.5E-15	0.0E+00		0.0E+00
Ecole	Ar41	Enfant âgé de 10 ans	4.5E-07	0.0E+00	4.5E-07	0.0E+00		0.0E+00
Ecole	Kr79	Enfant âgé de 10 ans	2.4E-04	0.0E+00	2.4E-04	0.0E+00		0.0E+00
Ecole	Kr83m	Enfant âgé de 10 ans	1.4E-08	0.0E+00	1.4E-08	0.0E+00		0.0E+00