



SITE DE LISSES

ÉTUDE D'IMPACT RADIOLOGIQUE

DE L'INSTALLATION DE FABRICATION
DE PRODUITS RADIOPHARMACEUTIQUES

PETNET Solutions

SIEMENS
Healthineers

Sommaire

1. Objet	4
2. Contexte	4
2.1. L'entreprise	4
2.2. La Radioprotection	5
2.2.1. Les rayonnements ionisants	6
2.2.2. L'activité	6
2.2.3. La dose efficace.....	7
2.2.4. Modes d'exposition.....	7
2.2.5. Effets biologiques des rayonnements ionisants.....	7
2.2.6. Exposition de la population française	7
2.2.7. Limites d'exposition	9
2.3. La réglementation	9
3. Description des rejets	9
3.1. Radionucléides	9
3.1.1. Fonctionnement de l'installation	9
3.1.2. Origine et caractérisation des effluents	10
3.1.3. Modalités de rejet.....	11
3.2. Caractéristiques des rejets	11
3.3. Caractéristiques de l'émissaire	12
4. Description de l'environnement de l'installation	14
4.1. Orographie, bâti et topographie	14
4.1.1. Reliefs.....	14
4.1.2. Bâti.....	14
4.1.3. Topographie.....	14
4.2. Climatologie locale	15
4.3. Environnement démographique et social	18
4.4. Environnement agricole, maraîcher, jardins, vergers et régime alimentaire des populations autour de l'installation	19
5. Les transferts dans l'environnement	20
5.1. Identification des voies de transfert dans l'environnement	20

5.2. Calcul de la dispersion.....	20
6. Evaluation des doses par identification des voies d'exposition, de la personne représentative et par le calcul des doses reçues	21
6.1. Identification des personnes représentatives.....	21
6.2. Identification des voies d'exposition.....	22
6.3. Calcul des doses.....	23
6.3.1. Hypothèses retenues pour la mise en œuvre du code de calcul.....	23
6.3.1.1. Communes	23
6.3.1.2. Spécifiques à l'exposition externe.....	23
6.3.1.3. Spécifiques à l'exposition interne.....	23
6.3.2. Résultats.....	24
6.3.2.1. Résultats détaillés du calcul d'impact (fonctionnement normal de l'installation)	24
6.3.2.2. Synthèse des doses efficaces (fonctionnement normal de l'installation)	25
6.3.2.3. Résultats détaillés du calcul d'impact (fonctionnement anormal de l'installation)	26
6.3.2.4. Synthèse des doses efficaces (fonctionnement anormal de l'installation)	27
6.4. Somme des contributions à la dose.....	28
7. Conclusion.....	29
Sources.....	30

1. Objet

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la demande d'autorisation d'exploitation d'un 3^{ème} cyclotron pour la fabrication de produits radiopharmaceutiques déposée par la société PETNET Solutions auprès de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) pour son site de Lisses (91).

Elle vise à évaluer le niveau dosimétrique d'exposition de la population aux rejets de l'installation de production compte tenu des limites de rejets déjà fixées à l'entreprise par l'ASN.

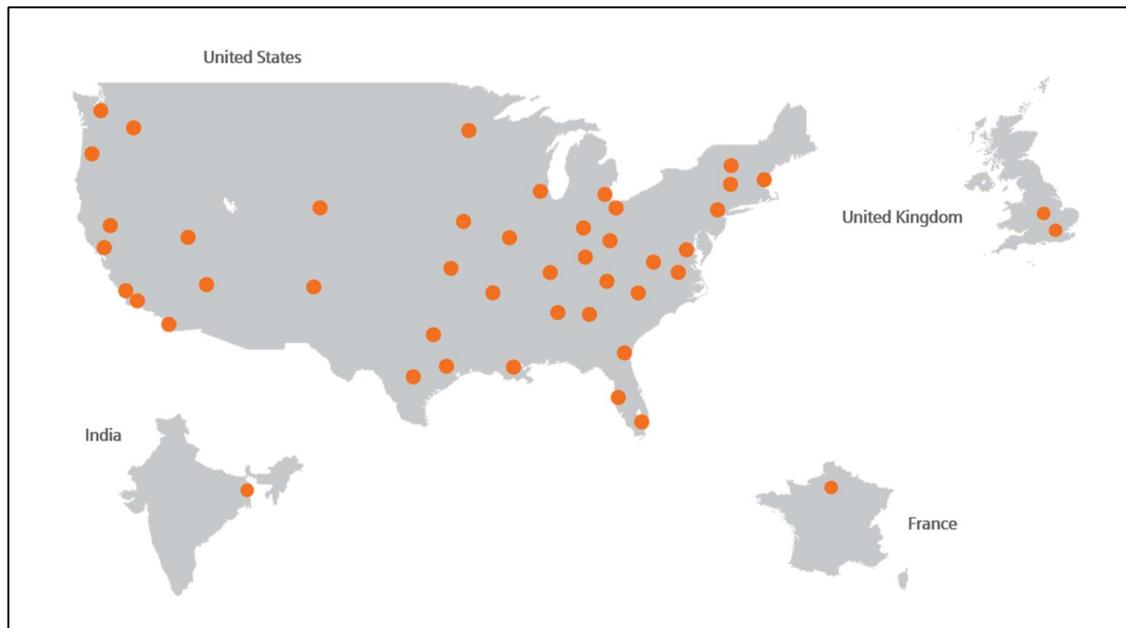
2. Contexte

2.1. L'entreprise

PETNET Solutions SAS est une société créée en 1996 aux Etats-Unis d'Amérique et appartenant au Groupe SIEMENS Healthineers depuis le début des années 2000.



Spécialisée dans la production de molécules radiopharmaceutiques à base de Fluor-18 destinées aux services de médecine nucléaire pour la réalisation d'exams TEP (tomographie par émission de positons), la société est l'un des leaders mondiaux.



Avec plus de 47 sites à travers le monde (43 aux USA, 2 au Royaume-Uni, 1 en France et 1 en Inde) la société délivre près d'1 millions de doses de produit injectable chaque année auprès de 2800 centres d'imagerie médicale.

Le site français, installé sur la commune de Lisses (91), délivre des doses de produit injectable à ses clients principalement basés en Ile-de-France depuis 2011.

Ces solutions injectables au nombre de quatre en 2022, permettent aux services de médecine nucléaire rattachés à divers hôpitaux et cliniques de réaliser les examens TEP (PET Scan) utiles en oncologie, pour diagnostiquer différents types de cancers.



La fabrication de ces radio-marqueurs nécessite la production de Fluor-18 (atome de Fluor radioactif) à l'aide d'accélérateurs de particules désignés « cyclotrons » (photo 1). Une fois le Fluor-18 créé, il est transféré dans des automates (photo 2) synthétisant le produit injectable au sein d'isolateurs blindés (photo 3). Le produit est ensuite réparti dans des flacons (photo 4) et envoyé selon les modalités de transport des marchandises dangereuses (photos 5 et 6) dans les différents centres de médecine nucléaire.

2.2. La Radioprotection

Le Fluor-18 produit dans l'installation PETNET Solutions est un radionucléide, c'est-à-dire un élément radioactif émettant de l'énergie sous forme de rayonnements ionisants. Le processus de création de ce Fluor-18 au sein des cyclotrons génère également d'autres radionucléides qui ne peuvent pas être valorisés. Ceux-ci constituent des déchets solides et des effluents liquides ou gazeux. Les rayonnements ionisants émis par ces radionucléides sont source de danger pour l'être humain. Des mesures de prévention et de protection doivent donc être mises en œuvre pour assurer la protection des personnes (travailleurs et population locale) et de l'environnement, c'est la radioprotection.

La radioprotection vise donc à empêcher ou à réduire les risques sanitaires liés aux rayonnements ionisants, en s'appuyant sur trois grands principes :

- Justification des activités comportant un risque d'exposition à des rayonnements ionisants
- Optimisation des expositions à ces rayonnements au niveau le plus faible raisonnablement possible
- Limitation des doses d'exposition individuelle à ces rayonnements

Pour appliquer ces principes, la radioprotection met en œuvre des moyens réglementaires et techniques spécifiquement adaptés à trois catégories de personne : le public, les patients et les travailleurs.

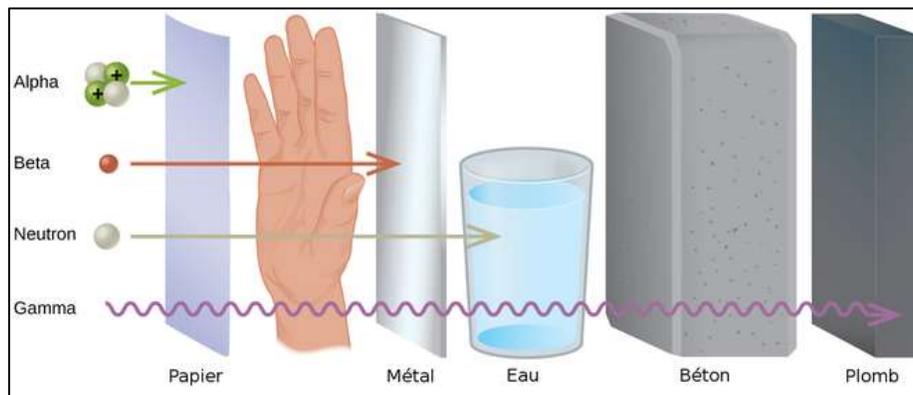
L'Autorité de sûreté nucléaire élabore la réglementation et contrôle, au nom de l'État, l'application du système de radioprotection.

2.2.1. Les rayonnements ionisants

Lorsqu'un radionucléide (atome radioactif) se désintègre, il peut émettre différents types de rayonnements. Ces rayonnements sont susceptibles d'arracher des électrons aux atomes de la matière qui y est exposée, c'est-à-dire d'ioniser cette matière.

Il existe différents types de rayonnements ionisants :

- Les rayonnements alpha (noyaux d'hélium). Formés de deux protons et de deux neutrons, ils sont très gros et peuvent être arrêtés par une simple feuille de papier ;
- Les rayonnements bêta (électrons ou positons). Plus petits que les alpha, ils sont plus difficiles à arrêter, on utilise une feuille d'aluminium, une plaque en verre ou en plexiglas ;
- Les ondes électromagnétiques X et gamma (photons). S'agissant d'ondes et non de particules, elles traversent très facilement la matière et les plus énergétiques ne sont arrêtées que par de grosses épaisseurs de plomb ou de béton.
- Les neutrons. Très énergétiques, il faut dans un premier temps leur faire perdre de l'énergie (les freiner) avant de pouvoir les arrêter. On utilise pour cela des matériaux riches en hydrogène (eau, polyéthylène, ...) qui seront complétés par des matériaux de densités importantes (béton, plomb, ...).

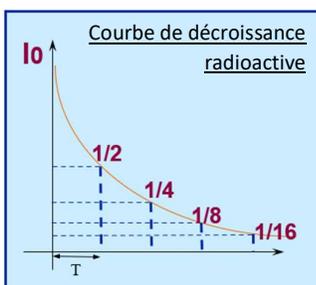


2.2.2. L'activité

Lorsqu'on considère une source radioactive (rassemblement d'un grand nombre d'atomes radioactifs qui ne vont pas tous se désintégrer et émettre leurs rayonnements ionisants en même temps), l'activité équivaut au nombre de désintégrations se produisant par seconde.

L'activité d'une source radioactive s'exprime en Becquerel (Bq) (1 Bq = 1 désintégration/s).

On utilisera les multiples du Bq, tels que le kBq (1 000 Bq), le MBq (1 000 000 Bq) ou le GBq (1 000 000 000 Bq) pour caractériser l'activité des flacons de produits radiopharmaceutiques ou les rejets d'effluents de l'installation.



L'activité diminue au fur et à mesure du temps, c'est le phénomène de décroissance radioactive.

La période T caractérise cette décroissance puisqu'il s'agit du temps nécessaire pour que le nombre de radionucléides initialement présent au sein d'une source ait été divisé par deux.

2.2.3. La dose efficace

Pour évaluer l'exposition d'une personne aux diverses sources de rayonnements ionisants, on utilise la dose efficace. Il s'agit de l'énergie moyenne par unité de masse déposée par le rayonnement dans les organes du corps, pondérée par leur sensibilité à la radioactivité et par la capacité relative du type de rayonnement à causer des dommages biologiques.

La dose efficace s'exprime en sieverts (Sv). Au quotidien, on utilise les sous-multiples de l'unité tels que le mSv (0,001 Sv) et le μ Sv (0,000 001 Sv).

La dose efficace est directement reliée à la probabilité d'apparition des cancers, mortels ou non, et des éventuelles maladies héréditaires.

2.2.4. Modes d'exposition

L'exposition externe :

- à partir d'une source de rayonnements externe et distante, qui peut être ponctuelle, ou au contraire de grande dimension et diffuse ; l'exposition diminue si l'on s'éloigne de la source et disparaît si celle-ci est supprimée ou si un écran efficace est interposé ;
- par la présence de substances radioactives sur la peau (on parle de contamination externe) ; pour supprimer l'exposition, il convient de nettoyer la surface du corps de façon appropriée.

L'exposition interne :

- par inhalation de substances radioactives dans l'air ;
- par ingestion de produits contaminés (par exemple des aliments) ;
- par pénétration transcutanée d'une contamination externe (par exemple en cas de blessure ou de plaie) ;
- lors d'un examen médical : scintigraphie, radiothérapie métabolique avec injection de substances radioactives.

L'exposition interne dure tant que les substances radioactives demeurent dans le corps ; elle diminue avec le temps en fonction de la décroissance radioactive des radioéléments incorporés et de leur élimination naturelle par excrétion.

2.2.5. Effets biologiques des rayonnements ionisants

Les effets déterministes :

Il s'agit d'effets certains (brûlures, nausées...), liés à la mort des cellules, qui apparaissent systématiquement et de façon généralement précoce, en présence de doses élevées et dépassant un certain seuil. La gravité des dommages augmente avec la dose.

Les effets stochastiques :

Il s'agit d'effets aléatoires, liés à la survie des cellules lésées par les rayonnements ionisants qui se traduisent principalement par des cancers qui apparaissent après un certain temps de latence (plusieurs années voire dizaines d'années) après le début de l'exposition. La probabilité d'apparition de ces effets augmente en fonction de la dose reçue.

En l'état actuel des connaissances, l'hypothèse d'une relation linéaire entre la dose et le risque conduit à retenir un excès de risque d'apparition de cancers/maladies héréditaires de l'ordre de 0,5 % en moyenne sur une population exposée à 100 mSv.

2.2.6. Exposition de la population française

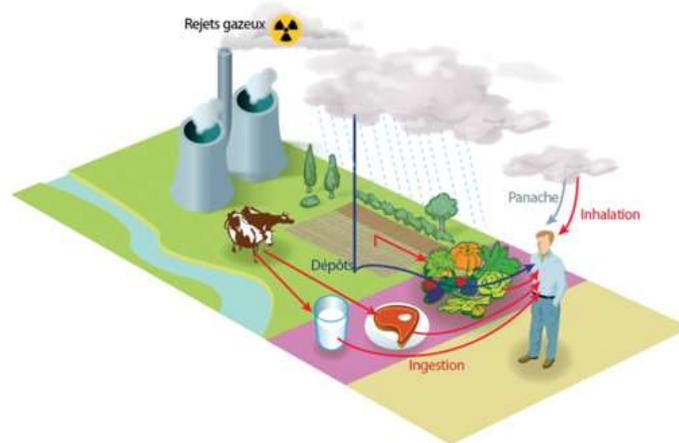
Les Français dans leur ensemble sont exposés en permanence à des rayonnements ionisants d'origine naturelle et artificielle.

Il existe quatre modes d'exposition aux **sources naturelles** de rayonnements ionisants :

- l'irradiation cosmique, due aux photons et aux particules venant de l'espace ;
- l'irradiation tellurique, due aux éléments radioactifs présents dans la croûte terrestre depuis la formation de la Terre ;
- l'incorporation d'éléments radioactifs naturels, dans l'air ou dans les produits consommés, présents depuis l'origine de la Terre ou créés par l'irradiation cosmique. L'ingestion de radionucléides naturels présents dans l'eau, dans la chaîne alimentaire et dans le tabac constitue la voie prépondérante d'incorporation de ces éléments ;
- l'inhalation de radon, gaz radioactif émanant du sol et ayant tendance à s'accumuler dans les espaces clos ou mal ventilés.

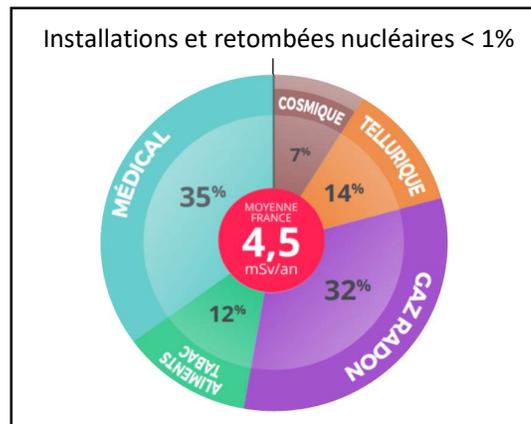
L'exposition liée à une **origine artificielle** des rayonnements ionisants peut quant à elle être divisée en deux grandes catégories :

- l'exposition due aux accidents majeurs et aux essais d'armes nucléaires : il s'agit des conséquences de la retombée de particules radioactives libérées dans l'atmosphère lors des accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima et des essais atmosphériques d'armes nucléaires ;
- l'exposition due aux activités nucléaires autorisées : il s'agit des rejets de fonctionnement des installations nucléaires civiles ou militaires.



Enfin, les rayonnements ionisants, quand ils sont utilisés à des fins diagnostiques, entraînent une exposition des patients appelée exposition « médicale ». S'agissant des actes thérapeutiques de radiothérapie externe et interne, les expositions liées, ou associées, correspondent à des fortes doses, délivrées localement pour soigner les pathologies concernées. Les patients ainsi traités constituent une fraction relativement peu nombreuse de la population générale et sont exposés dans un cadre très particulier.

**Exposition annuelle
moyenne de la
population française**



2.2.7. Limites d'exposition

La réglementation nationale (Code de la santé publique et Code du travail) fixe, pour le public et les travailleurs, des limites de doses individuelles annuelles cumulées admissibles pour les expositions relevant des activités professionnelles ou de l'exposition à des sources de rayonnements ionisants artificielles (hors expositions médicales).

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.

Lorsque l'exposition est à finalité médicale, le principe de limitation des doses ne s'applique pas pour les patients : seuls sont pris en compte les principes de justification et d'optimisation.

Par précaution, les limites réglementaires de doses annuelles sont fixées bien au-dessous des niveaux de risques sanitaires avérés, établis par différentes études épidémiologiques au niveau international. Le contrôle du respect de ces limitations implique une surveillance régulière de la radioactivité de l'environnement et une surveillance dosimétrique individuelle des travailleurs utilisant des sources de rayonnements ionisants. La surveillance de l'environnement s'appuie sur des réseaux de stations de mesures pour l'air, les eaux, les sols, certains végétaux, animaux et denrées alimentaires, réparties sur l'ensemble du territoire national. La surveillance des travailleurs repose notamment sur l'analyse régulière des dosimètres personnels qu'ils ont obligation de porter dans l'exercice de leurs fonctions.

2.3. La réglementation

Le Code de la santé publique (CSP) encadre les activités de production de radionucléides à l'aide de cyclotrons. Ce type d'activité est soumis à l'obtention d'une autorisation (art. L1333-8 et R.1333-104 du CSP) délivrée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN).

Dans le cadre de sa demande d'autorisation, le responsable d'une activité nucléaire dont l'installation rejette des quantités significatives de radionucléides dans ses effluents, doit proposer à l'ASN des valeurs limites de rejets (art. R. 1333-16 du CSP) compte tenu de l'impact potentiel que ceux-ci peuvent avoir sur la population environnante.

Dans ce but, le responsable de l'activité nucléaire doit réaliser une évaluation dosimétrique relative à l'exposition de la population potentiellement soumise aux rejets (art. R. 1333-23 du CSP). Il est précisé que « toute estimation de doses auxquelles la population est exposée prend en compte les doses résultant de l'exposition externe aux rayonnements ionisants et de l'incorporation de radionucléides. Elle est calculée pour une personne représentative, selon des scénarios aussi réalistes que possible ». La personne représentative est définie comme une « personne recevant une dose, qui est représentative des personnes les plus exposées au sein de la population, à l'exclusion des personnes ayant des habitudes extrêmes ou rares » (annexe 13-7 du CSP).

L'étude doit être réalisée en suivant les prescriptions du Rapport de l'IRSN n°2022-00193, « Eléments méthodologiques pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation cyclotron ».

3. Description des rejets

3.1. Radionucléides

3.1.1. Fonctionnement de l'installation

Le site de PETNET Solutions situé 15, rue des Pyrénées, à Lisses (91090) peut produire différents produits radiopharmaceutiques.

Ces produits sont fabriqués par lot et chaque production de lot nécessite la création de Fluor-18 par les cyclotrons. Le site de Lisses est équipé de 2 cyclotrons auto-protégés et d'1 cyclotron non auto-protégé.

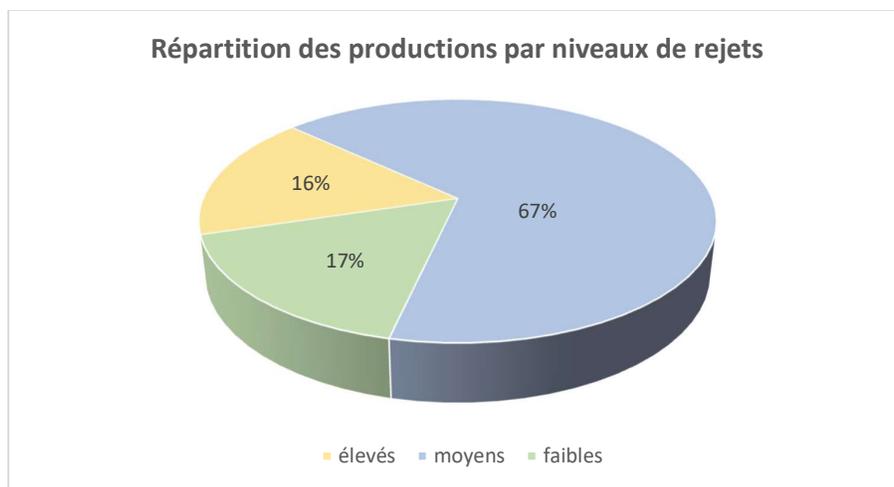
Les rejets de radionucléides sous forme de gaz ou d'aérosols peuvent être plus ou moins élevés selon la nature du produit radiopharmaceutique fabriqué.

Divers dispositifs techniques sont déjà déployés pour limiter le niveau de ces rejets : des sacs connectés aux modules de synthèse pour piéger les gaz relâchés, des filtres à charbon actif au niveau du point d'extraction d'air des isolateurs blindés dans lesquels se trouvent les modules de synthèse, un dispositif de compression et de piégeage des gaz pour mise en décroissance sur l'une des deux lignes de production, des filtres nucléaires sur les gaines de ventilation d'extraction d'air avant rejet des gaz et aérosols en cheminées.

On peut ainsi diviser les lots produits en différentes catégories, ceux dont les rejets de radionucléides sous forme d'aérosols sont plutôt élevés (jusqu'à 8 GBq/lot), ceux dont les rejets sont moyens (jusqu'à 250 MBq/lot) et ceux dont les rejets sont plutôt faibles (jusqu'à 15 MBq/lot).

Ainsi, en fonctionnement normal, le site peut produire jusqu'à 6 lots de produits radiopharmaceutiques par jour, 6 jours par semaine, soit 313 jours par an, portant donc le nombre maximal de lots à 36 par semaine, soit 1877 par an.

Parmi ces lots, voici la répartition qui s'opère entre lots à rejets élevés, moyens ou faibles sur une année :



Cette répartition peut ensuite évoluer en fonction :

- de phases particulières de fonctionnement :
 - o maintenance d'une ligne de production, amenant à une réduction du nombre de productions réalisables et donc des rejets ;
 - o maintenance d'un cyclotron, amenant à une réduction du nombre de productions réalisables et donc des rejets.
- d'aléas de fonctionnement :
 - o lot de production échoué amenant à relancer un nouveau lot, induisant une augmentation du nombre de lots produits sur la journée et donc des rejets.

3.1.2. Origine et caractérisation des effluents

- **Fluor-18 (¹⁸F)**
 - o Emetteur : béta + (β^+) à 97%, d'énergie moyenne 250 keV et d'énergie maximale 634 keV induisant, par effet d'annihilation, l'émission de deux photons gamma (γ) d'énergie 511 keV
 - o Période radioactive : 1,8289 h
 - o Etat : aérosol / gaz
 - o Forme : S S : Selon le cation auquel il est combiné (cas le plus défavorable pour l'exposition)
 - o Provenance : principalement lors de la synthèse radiochimique des produits radiopharmaceutiques se déroulant dans les isolateurs blindés des lignes de production mais éventuellement (en cas de

fuite), à l'occasion de la fabrication de Fluor-18 par les cyclotrons ou du transfert du Fluor-18 des cyclotrons vers les lignes de production des produits radiopharmaceutiques

- **Argon-41 (⁴¹Ar)**
 - Emetteur : béta – (β) à 100%, d'énergie 1198 keV
 - Période radioactive : 1,8268 h
 - Etat : gaz rare
 - Provenance : fabrication de Fluor-18 par le cyclotron IBA – Kiube 300 (exposition de l'Argon-40 de l'air aux neutrons thermiques issus du cyclotron)

3.1.3. Modalités de rejet

Fonctionnement de l'installation	Radionucléide	Activité rejetée (GBq/an)
Normal	¹⁸ F	750
	⁴¹ Ar	200
Particulier (maintenance)	¹⁸ F	0
	⁴¹ Ar	0
Aléas (lots échoués reproduits)	¹⁸ F	50
	⁴¹ Ar	0
Total		1000

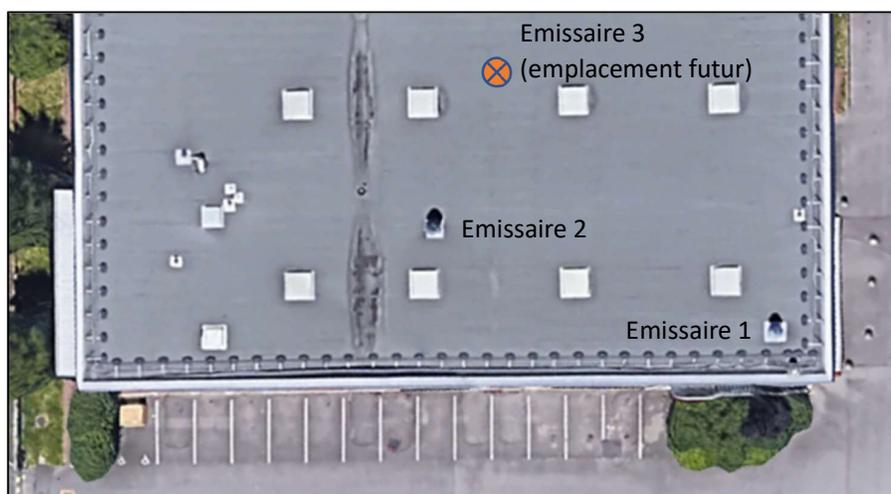
3.2. Caractéristiques des rejets

Plage horaire moyenne	Durée moyenne	Niveau de rejet	Fréquence
02h30 - 03h27	57min	Moyen	6 fois/semaine
05h20 - 06h17	57min	Moyen	6 fois/semaine
08h15 - 09h12	57min	Moyen	6 fois/semaine
10h50 - 11h47	57min	Moyen	6 fois/semaine
11h00 - 11h26	26min	Faible	2 fois/semaine
12h35 - 13h43	1h08min	Faible	1 fois/semaine
12h00 - 16h00	4h00min	Elevé	3 fois/semaine

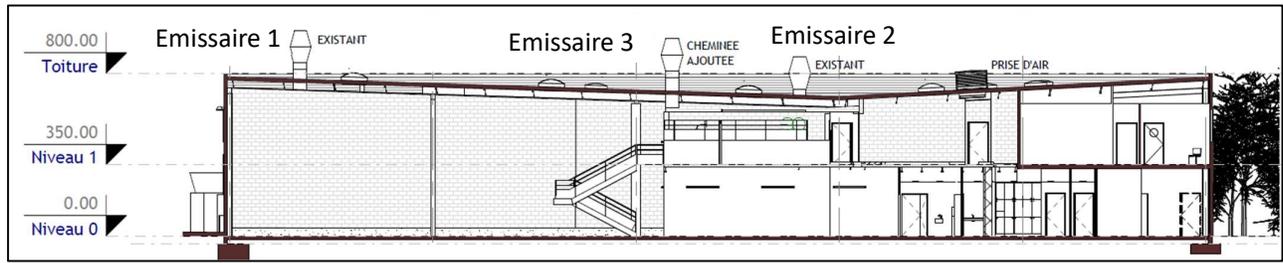
3.3. Caractéristiques de l'émissaire



Plan de situation de l'établissement PETNET Solutions au sein de la zone d'activité du Bois de Chaland



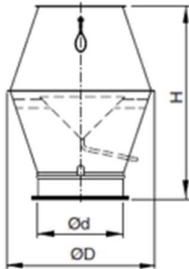
Localisation des émissaires sur le toit de l'établissement PETNET Solutions



Plan de coupe du bâtiment avec implantation des émissaires

Caractéristiques des émissaires :

Dimensions



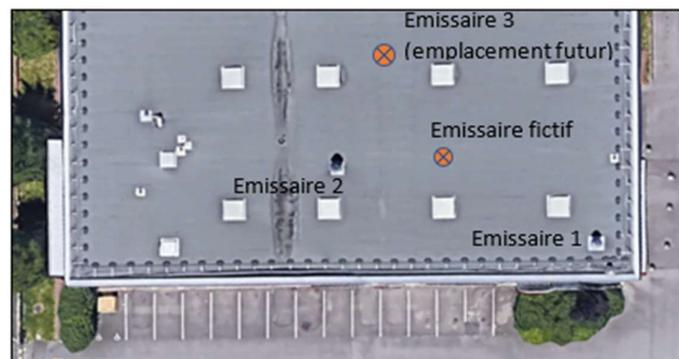
Ød nom	ØD mm	H mm	m kg	Roof through connection TGR	
				50 mm Size	100 mm
400	685	905	11,1	5	6
500	855	1055	20,0	6	7
630	1075	1295	38,0	8	9
800	1360	1640	63,0	9	10
1000	1600	2110	89,1	11	12
1250	2020	2615	118	14	15

Emissaire	Coordonnées	Orientation	Hauteur approximative (m)	Débit d'éjection moyen (m ³ /h)	Température mesurée (°C)
1	Latitude : 48,60607° / 48°36'21,91" N Longitude : 2,434138° / 2°26'4,15" E	Vers le haut	9,64m	9150	24,7
2	Latitude : 48,606086° / 48°36'21,74" N Longitude : 2,434485° / 2°26'3,05" E	Vers le haut	8,44m	3145	23,2
3	(Coordonnées prévisionnelles dans l'attente de sa création) Latitude : 48,606138° / 48°36'22,1" N Longitude : 2,434145° / 2°26'2,92" E	Vers le haut	9,34m	8490	-

Dans le cadre de la modélisation de la dispersion des rejets et compte tenu :

- de la grande proximité des trois émissaires ;
- du même ordre de grandeur de leur hauteur ;
- de l'absence d'obstacle entre ceux-ci susceptibles de modifier la dispersion des rejets ;

on considèrera que les rejets proviennent d'un même émissaire fictif situé à l'isobarycentre du triangle délimité par les trois émissaires.



Localisation de l'émissaire fictif sur le toit de l'établissement PETNET Solutions

4. Description de l'environnement de l'installation

4.1. Orographie, bâti et topographie

4.1.1. Reliefs

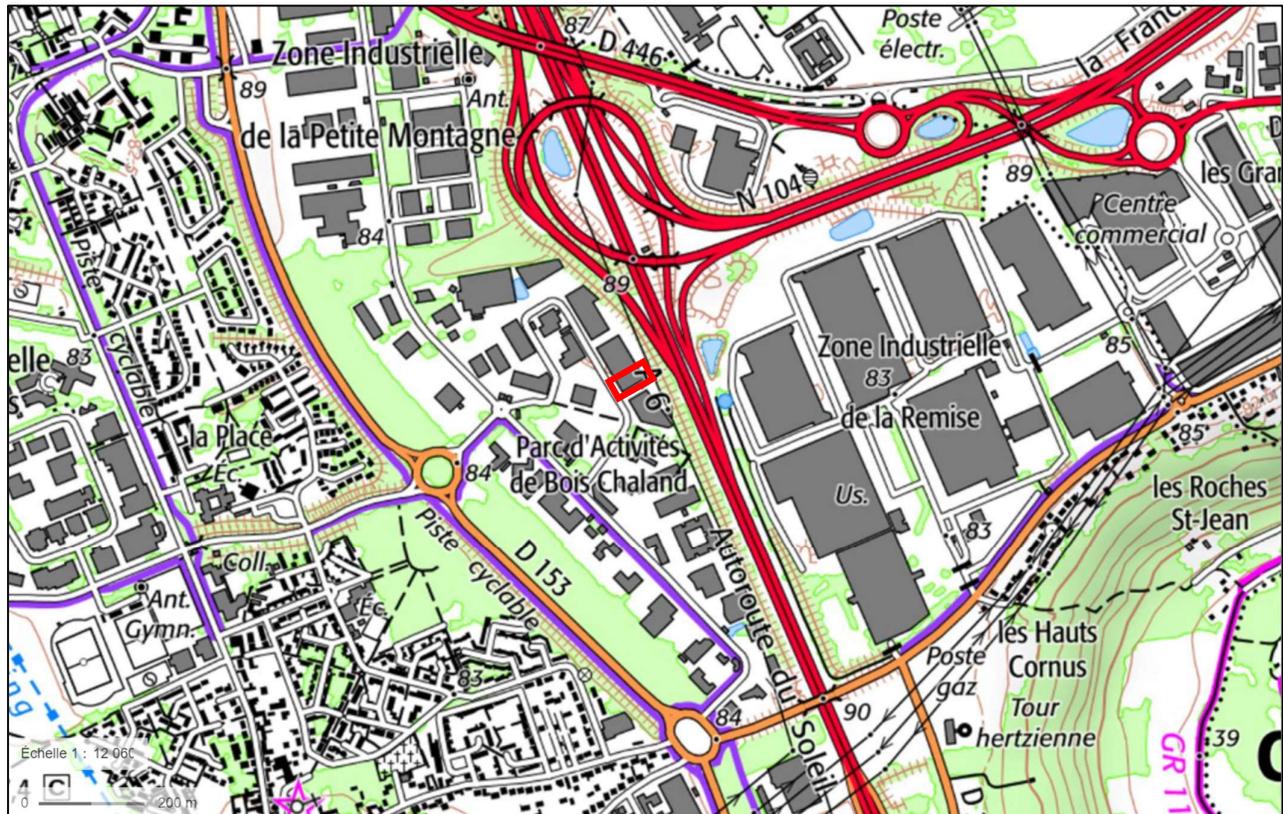
La commune de Lisses (91090) et la zone d'activité du Bois Chaland, au sein de laquelle se trouve l'établissement de PETNET Solutions, se situent dans une zone de plaine à une altitude moyenne de 85m. Il n'existe pas de reliefs particuliers au sein de la commune ou de ses alentours.

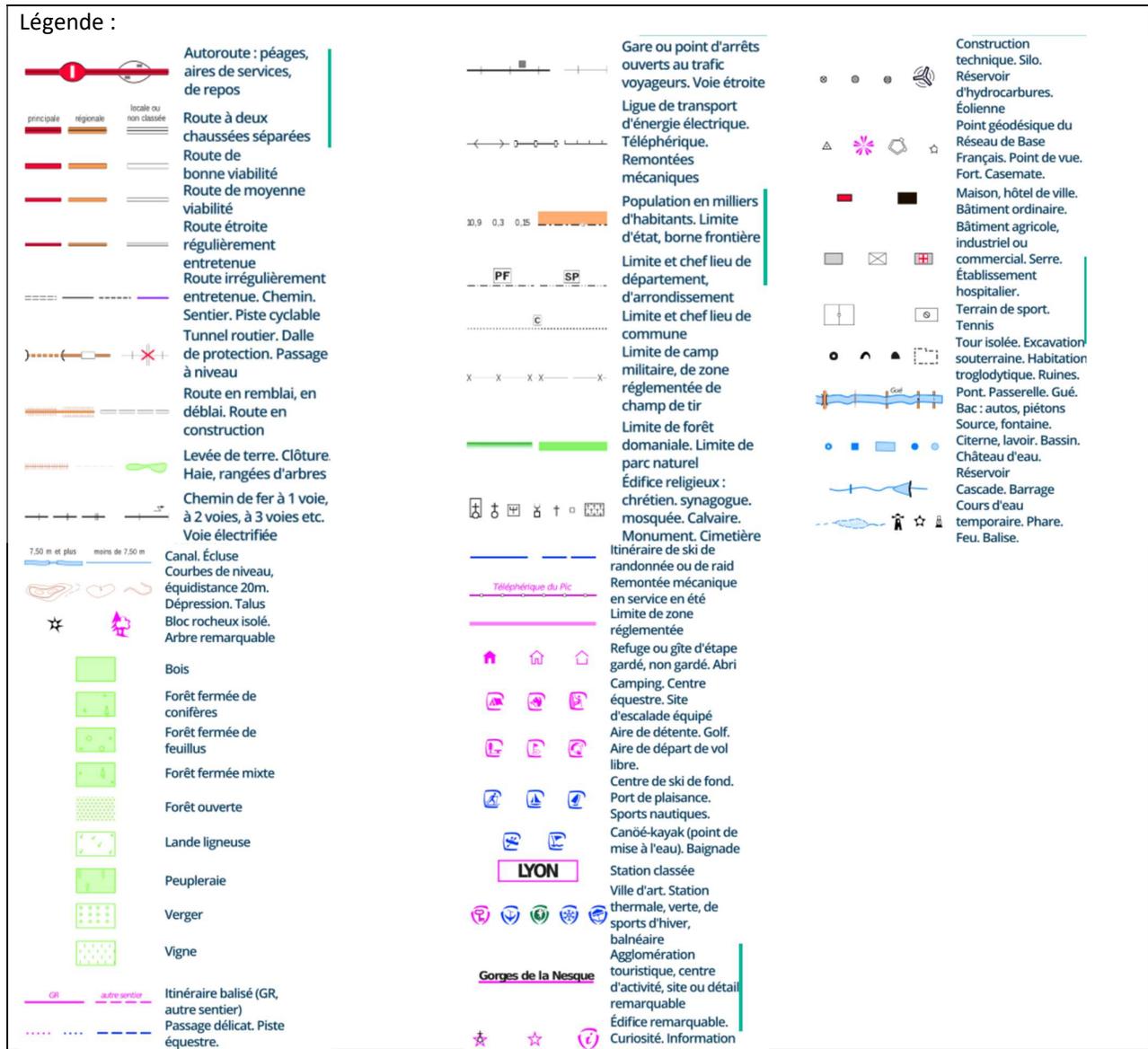
4.1.2. Bâti

Le bâtiment occupé par la société PETNET Solutions a une hauteur de 8m et les extrémités des émissaires culminent à 9,64m, 8,44m et 9,34m.

Les bâtiments situés autour de celui occupé par PETNET Solutions s'élèvent à la même hauteur et aucun bâtiment ne constitue d'obstacle au panache pouvant s'échapper des émissaires.

4.1.3. Topographie





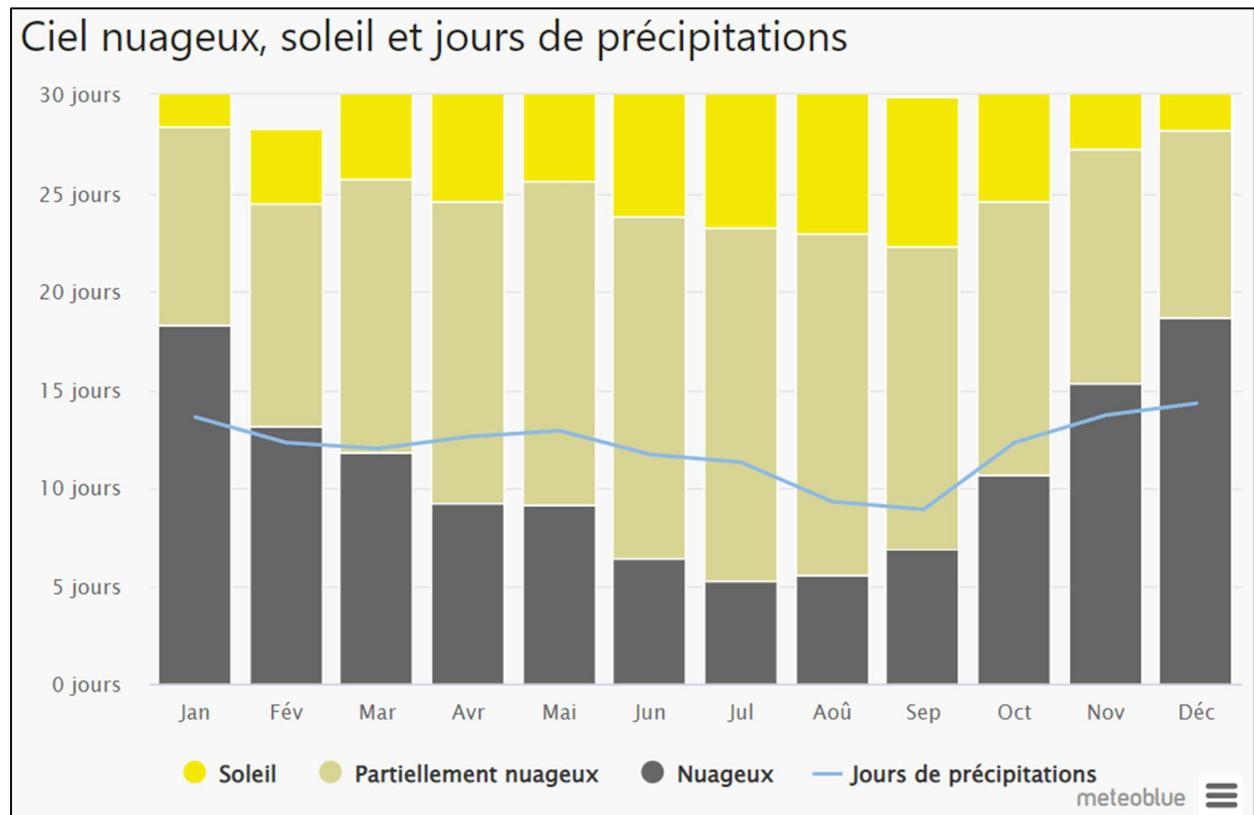
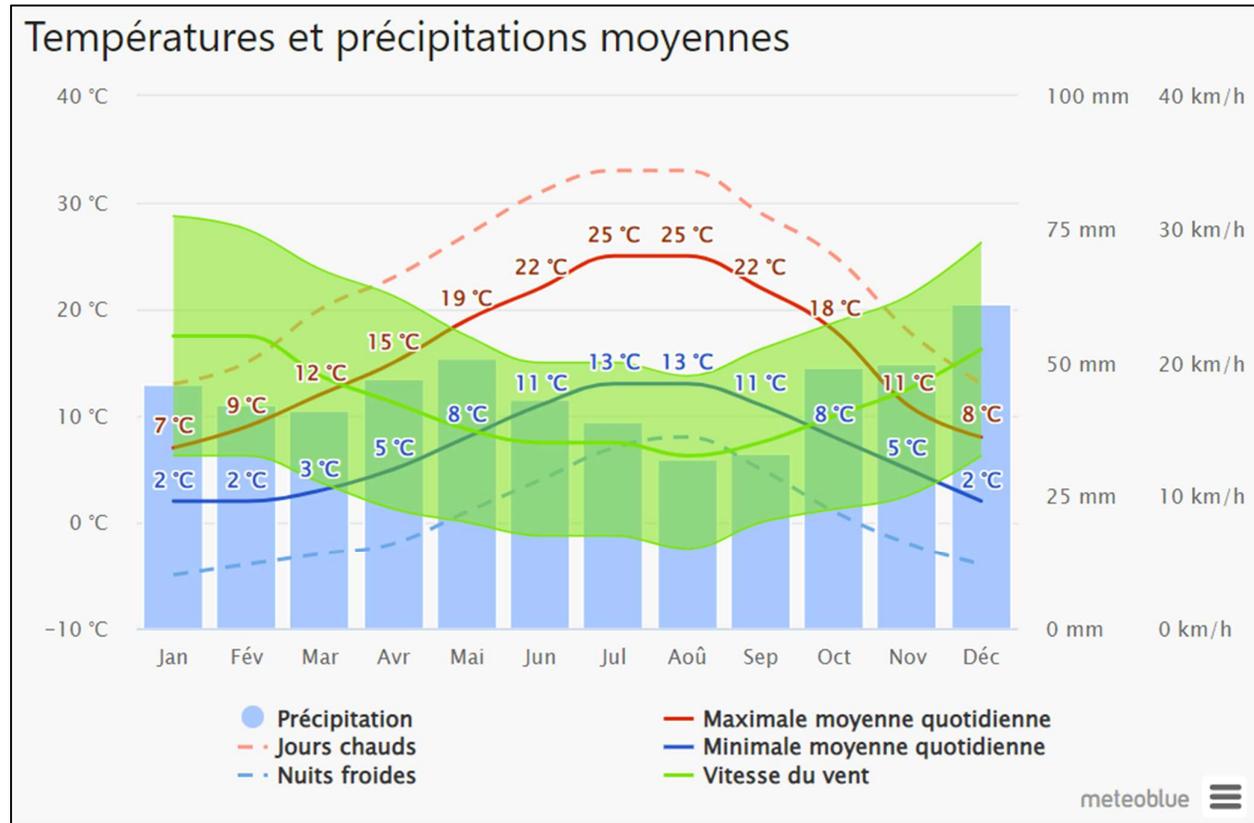
Situation topographique de l'établissement PETNET Solutions

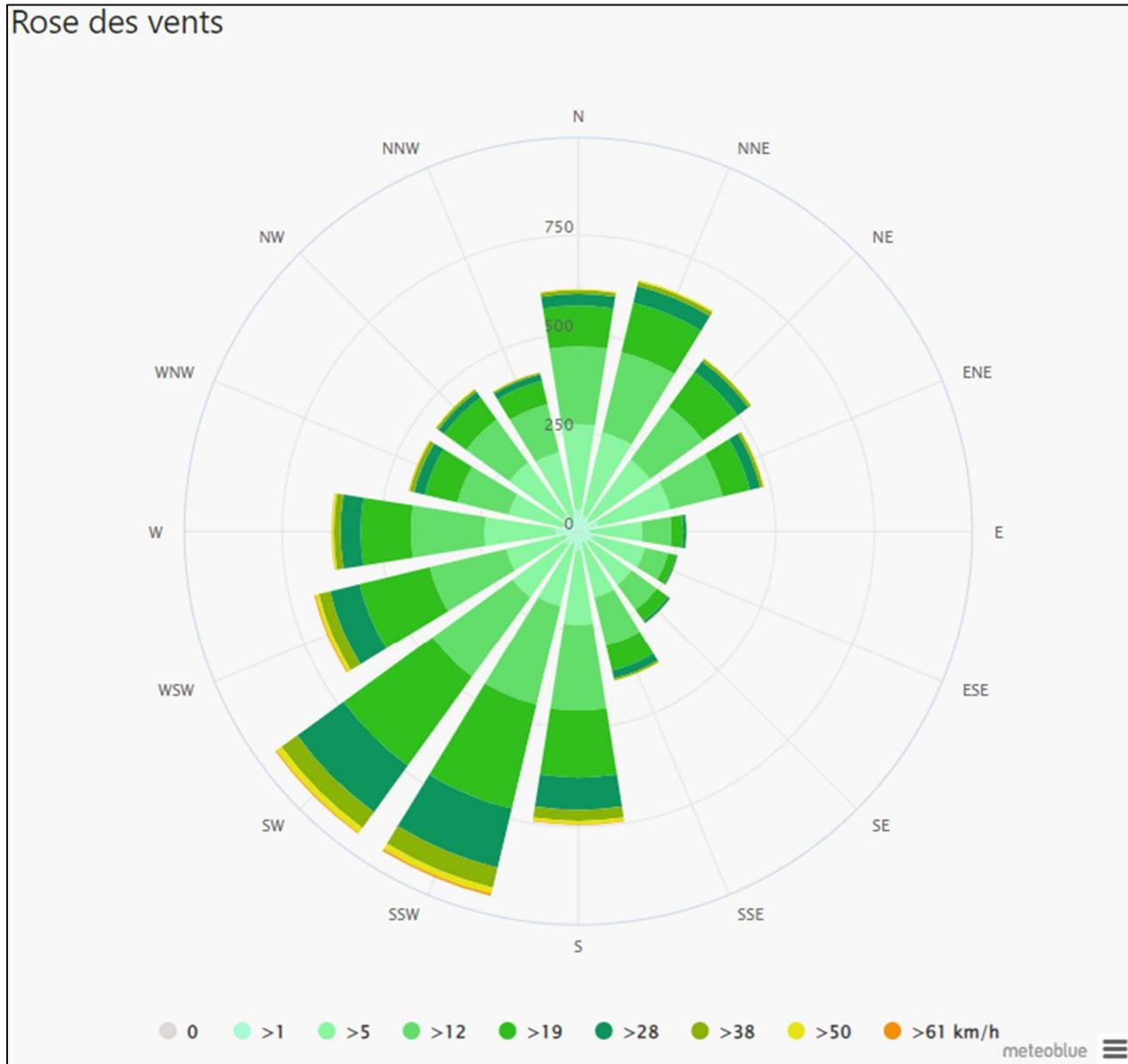
4.2. Climatologie locale

Afin de tenir compte de la climatologie locale, les données météorologiques de plusieurs sources ont été consultées et recoupées parmi lesquelles celles issues :

- De la station Météo France d'Orly (située à 14,4km à vol d'oiseau) ;
- De la station météo semi-professionnelle du réseau « Static » d'Evry-Courcouronnes (située à 3,6km à vol d'oiseau) de l'association Infoclimat ;
- Des modèles de la société meteoblue prenant en compte plus de 30ans de données météo.

Les diagrammes climatiques présentés ci-dessous et issus du site meteoblue caractérisent la climatologie retenue pour l'étude.





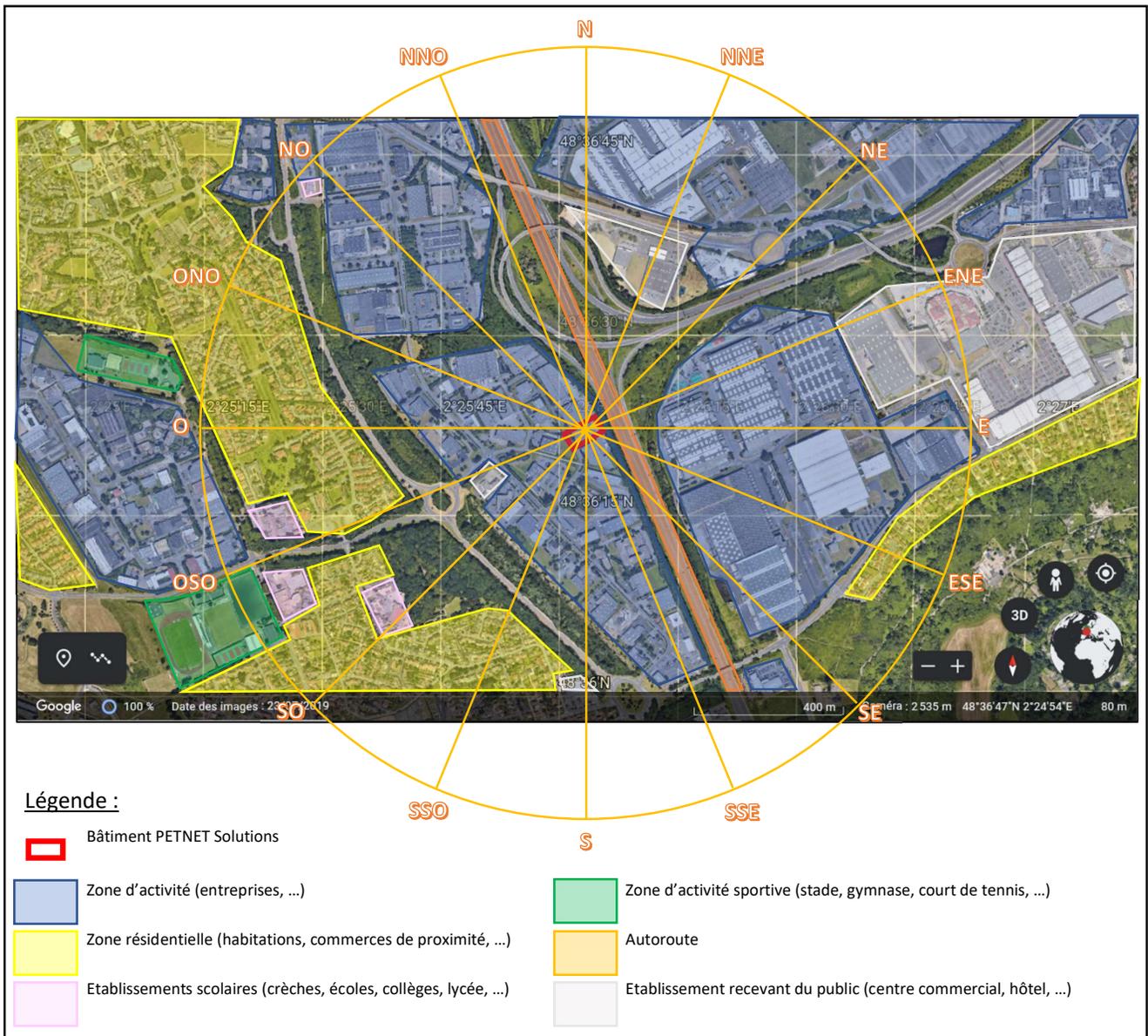
L'analyse des divers diagrammes permet d'établir que pour le site de PETNET Solutions on peut retenir :

- Une température minimale moyenne annuelle d'environ 6,8°C
- Une température maximale moyenne annuelle d'environ 16,1°C
- Les orientations et vitesses de vents suivantes :

Direction	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
Provenance	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
Durée (h/an)	745	950	949	688	625	442	447	415	614	655	543	484	275	259	288	391
Vitesses moyennes (km/h)	12 < x < 28				5 < x < 19											
(m/s)	3,3 < x < 7,8				1,4 < x < 5,3											

- Une hauteur de précipitation annuelle d'environ 523mm, soit une moyenne de 0,06 mm/h sur l'année
- Une nébulosité (ciel couvert) 129 jours/an

4.3. Environnement démographique et social



Environnement du site PETNET Solutions

Compte tenu de l'environnement démographique et social du site, une zone d'exposition représentative est définie pour chaque type de zone (d'activité professionnelle, résidentielle, scolaire, ...).

Afin que cette zone puisse être considérée comme représentative de l'exposition la plus pénalisante du public, elle est choisie sur la base de sa proximité avec le site et de son niveau de couverture par le panache s'en dégageant au vue de sa direction par rapport au site et de la fréquence du vent dans cette même direction.

Pour chaque zone d'exposition représentative, on identifie les populations s'y trouvant, leur âge et la fraction maximale de temps annuelle pendant laquelle elles peuvent y séjourner.

Zone d'exposition représentative	Distance entre la zone la plus proche du bâtiment et l'émissaire (m)	Direction par rapport au site	Populations présentes dans la zone	Âges des populations (ans)	Durée annuelle de présence des populations dans la zone (h)
Zone d'activité (entreprises)	70	SE	Travailleurs	16 – Adulte	2000 ¹
Zone résidentielle (habitations)	498	SSO	Enfants Adultes	0 – Adulte	8760 ²
Etablissement scolaire (école)	612	SO	Enfants Travailleurs	2 – 10 16 – Adulte	864 ³ 2000 ¹
Etablissement scolaire (crèche)	944	NO	Enfants Travailleurs	0 – 3 16 – Adulte	2442 ⁴ 2000 ¹
Zone d'activité sportive	915	OSO	Enfants Adultes	3 – Adulte	150,8 ⁵
Autoroute	58	ENE	Enfants Travailleurs	0 – Adulte	0,4 ⁶
Etablissement recevant du public (hôtel)	245	OSO	Enfants Travailleurs	0 – Adulte 16 – Adulte	1260 ⁷ 2000 ¹
Etablissement recevant du public (grossiste alimentaire)	396	NNE	Enfants Travailleurs	0 – Adulte 16 – Adulte	52 ⁸ 2000 ¹

¹ Considérant la durée de travail retenue par la CIPR 108

² Considérant le cas d'une personne passant tout son temps à son domicile

³ Considérant la durée d'enseignement obligatoire en France

⁴ Considérant le cas d'un enfant séjournant en crèche cinq jours sur sept sur toute l'amplitude d'ouverture de la crèche (11h00), 222 jours par an (correspondant au nombre de jours travaillés pour une personne réalisant 2000h de travail par an à raison de 9h par jour)

⁵ Considérant l'étude 2021 baromètre-sport-santé de la fédération française d'éducation physique et gymnastique volontaire

⁶ Considérant le cas d'une personne empruntant l'autoroute deux fois par jour pour se rendre à son travail tout au long de l'année (222 jours par an à raison de 2000h/an et de 9h/jour) et traversant le panache issu du site à la limite de vitesse autorisée sur une portion de route de 100m située en face du site

⁷ Considérant le cas d'une personne séjournant à l'hôtel pendant une semaine chaque mois et y demeurant 15h par jour.

⁸ Considérant une famille faisant des courses pendant 2h00 toutes les deux semaines.

4.4. Environnement agricole, maraîcher, jardins, vergers et régime alimentaire des populations autour de l'installation

L'environnement agricole de l'établissement est peu dense.

Le premier champ se trouve à 1200m de l'établissement, en deçà de cette distance on ne trouve pas d'élevage, de maraîcher, de verger ou de production alimentaire d'envergure.

En revanche, on ne peut pas exclure la présence de potagers individuels dans les zones résidentielles présentes autour de l'établissement, à des distances supérieures à 500m.

Le régime alimentaire de la population locale correspond au régime alimentaire moyen en France. Il repose sur des produits achetés en grandes surfaces, auprès de commerces de proximité, dans des marchés, auprès de producteurs locaux (offre limitée à proximité du lieu d'implantation de l'établissement) ou sur des légumes produits au sein d'un potager individuel.

5. Les transferts dans l'environnement

5.1. Identification des voies de transfert dans l'environnement

Les voies de transfert identifiées compte tenu des périodes de décroissance des radionucléides composant les rejets sont :

- La dispersion dans l'atmosphère en fonction de la climatologie annuelle et de la dilution des radionucléides par la turbulence atmosphérique
- Le dépôt sur la surface du sol ou sur les végétaux de poussières (dépôt sec)
- Le dépôt sur le sol ou les végétaux par les gouttes de pluie qui traversent le panache (dépôt humide)

Compte tenu des courtes périodes de décroissance des radionucléides rejetés (respectivement 1,8289h pour le Fluor 18 et 1,8268h pour l'Argon 41), les voies de transfert suivantes sont négligées : le transfert foliaire correspondant au passage des radionucléides vers les feuilles des végétaux ; la translocation d'une fraction de l'activité déposée sur les parties aériennes du végétal qui migre dans ses parties comestibles ; la migration dans les couches superficielles du sol par l'action humaine (labour bêchage) par les précipitations ; le transfert aux parties comestibles du végétal via ses racines.

5.2. Calcul de la dispersion

Choix du modèle de dispersion retenu :

Considérant que :

- le site se trouve en zone péri-urbaine ;
- que les personnes représentatives ne se trouvent pas à proximité immédiate des émissaires. Les cibles se trouvant majoritairement à des distances comprises entre 245m et 944m (à l'exception de l'autoroute à 58m et d'une zone d'activité professionnelle à 70m du site mais qui ne constituent des zones d'exposition en extérieur que sur de brèves durées) ;
- que les bâtiments présents dans la zone sont d'une hauteur inférieure à celle des émissaires et que le terrain ne présente pas de reliefs ou d'obstacles particuliers s'opposant à la dispersion du panache ;

le modèle de dispersion retenu est le modèle Gaussien de Doury en faisant l'hypothèse de rejet au sol de façon à obtenir une estimation enveloppe de l'impact. L'outil DOSIMEX-I 3 appliquant une modélisation Gaussienne de Doury sera utilisé pour la réalisation des calculs.

Pour plus de détails concernant les hypothèses simplificatrices du modèle, les limitations connues et les expériences de validation, les documents suivants peuvent être consultés :

- DOSIMEX - Validation Dosimex-I 3
- https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/Publications_documentation/BDD_publi/DEI/SECRE/Documents/lerfa-2000-021.pdf

6. Evaluation des doses par identification des voies d'exposition, de la personne représentative et par le calcul des doses reçues

6.1. Identification des personnes représentatives

Pour chaque zone d'exposition représentative retenue, on détermine quelles sont les personnes représentatives pouvant y séjourner, combien de temps elles peuvent y être présentes à l'année et si elles peuvent être amenées à y manger des denrées alimentaires qui auraient pu être contaminées.

Zone d'exposition représentative	Personnes représentatives	Durée d'exposition			Régime alimentaire
		Quotidienne (h)	Annuelle maximale ¹ (h)	Annuelle réaliste ² (h)	
Zone d'activité (entreprises)	Enfant 13-17 ans	9	2000 (222j/an)	447 (50j/an)	Pas de denrée alimentaire potentiellement contaminée disponible dans la zone
	Adulte (Travailleur)				
Zone résidentielle (habitations)	Enfant < 1 an	24	7512 (313j/an)	655 (27j/an)	Possible présence de denrées alimentaires contaminées (fruits ou légumes cultivés dans un jardin privatif)
	Enfant 1-2 ans				
	Enfant 3-7 ans				
	Enfant 7-12 ans				
	Enfant 13-17 ans				
	Adulte				
Etablissement scolaire (école)	Enfant 1-2 ans	4,8	864 (180j/an)	543 (113j/an)	Pas de denrée alimentaire potentiellement contaminée disponible dans la zone
	Enfant 3-7 ans				
	Enfant 7-12 ans				
	Adulte (Travailleur)	9	2000 (222j/an)	543 (60,3j/an)	
Etablissement scolaire (crèche)	Enfant < 1 an	11	2442 (222j/an)	288 (26,2j/an)	
	Enfant 1-2 ans	9	2000 (222j/an)	288 (32j/an)	
	Adulte (Travailleur)				
Zone d'activité sportive	Enfant 3-7 ans	0,5	150,8 (313j/an)	150,8 (313j/an)	
	Enfant 7-12 ans				
	Enfant 13-17 ans				
	Adulte				
Autoroute	Enfant < 1 an	0,002	0,4 (222j/an)	0,4 (222j/an)	
	Enfant 1-2 ans				
	Enfant 3-7 ans				
	Enfant 7-12 ans				
	Enfant 13-17 ans				
	Adulte (Travailleur)				
Etablissement recevant du public (hôtel)	Enfant < 1 an	15	1260 (72j/an)	484 (32,3j/an)	
	Enfant 1-2 ans				
	Enfant 3-7 ans				
	Enfant 7-12 ans				
	Enfant 13-17 ans	9	2000 (222j/an)	484 (53,8j/an)	
Adulte (Travailleur)					

Etablissement recevant du public (grossiste alimentaire)	Enfant < 1 an	2	52 (26j/an)	52 (26j/an)	
	Enfant 1-2 ans				
	Enfant 3-7 ans				
	Enfant 7-12 ans				
	Enfant 13-17 ans	9	2000 (222j/an)	950 (105,6j/an)	
	Adulte (Travailleur)				

¹ correspondant à la durée annuelle de présence des personnes représentatives dans la zone d'exposition ou à la durée annuelle maximale de rejets

² considérant la durée annuelle pendant laquelle le vent souffle dans la direction de la zone d'exposition

6.2. Identification des voies d'exposition

Afin de déterminer les voies d'exposition à prendre en considération, on tient compte :

- des voies de transfert identifiées :
 - o La dispersion dans l'atmosphère en fonction de la climatologie annuelle et de la dilution des radionucléides par la turbulence atmosphérique
 - o Le dépôt sur la surface du sol ou sur les végétaux de poussières (dépôt sec)
 - o Le dépôt sur le sol ou les végétaux par les gouttes de pluie qui traversent le panache (dépôt humide)
- des périodes de décroissance des radionucléides rejetés :
 - o 1,8289h pour le Fluor 18
 - o 1,8268h pour l'Argon 41
- des classes d'âges des personnes représentatives identifiées :
 - o Enfants : < 1 an, 1-2 ans, 3-7 ans, 7-12 ans, 13-17 ans
 - o Adulte : > 17 ans
- des temps de présence et des usages au sein des lieux d'exposition (travail, repos, sport, alimentation avec des fruits ou légumes produits dans le jardin, déplacement).

Facteur de protection de l'habitat :

Les personnes représentatives passent une majeure partie de leur temps au sein de bâtiments. Ces derniers jouant un rôle de protection contre les expositions en atténuant les débits de doses ou en limitant les quantités de radionucléides pouvant être inhalées, on pourrait s'attacher à définir un facteur de protection de l'habitat. Cependant, définir un coefficient de protection réaliste s'avérant difficile, on fait ici le choix de négliger ce facteur de protection ce qui induira que les niveaux d'exposition calculés seront majorés par rapport aux réels.

Ainsi, les voies d'exposition retenues sont les suivantes :

- exposition externe :
 - o par irradiation en cas d'immersion dans le panache
 - o par irradiation en cas de proximité avec les dépôts au sol
- exposition interne (pour le fluor 18 exclusivement, l'argon 41 étant un gaz rare dont le niveau d'exposition par voie interne peut être négligé) :
 - o par inhalation en cas d'immersion dans le panache

L'exposition interne par ingestion de denrées alimentaires (fruits ou légumes produits dans un potager privatif) contaminées par les dépôts au sol est négligée compte tenu de la période de décroissance radioactive du fluor-18, du faible niveau d'activité déposé au sol (inférieure à 1Bq/m²) et des pratiques alimentaires communément mises en œuvre (rinçage et/ou épluchage des fruits et légumes avant leur consommation).

6.3. Calcul des doses

6.3.1. Hypothèses retenues pour la mise en œuvre du code de calcul

6.3.1.1. Communes

Hauteur de rejet : on considère que les rejets se font à hauteur du sol et non à 10m de haut de façon à obtenir une estimation enveloppe de l'impact.

Vitesse du vent :

Compte tenu des vitesses de vent prédominantes dans chacune des directions, celles retenues pour les calculs de doses sont les suivantes :

- 10km/h, soit 2,8m/s, pour les directions dans lesquelles la vitesse de vent moyenne est comprise entre 5 et 19 km/h ;
- 22km/h, soit 6,1m/s, pour les directions dans lesquelles la vitesse de vent moyenne est comprise entre 12 et 28km/h.

Niveau de précipitation : 0,06mm/h

Diffusion : normale, gradient de température vertical <-0,5°C/100m

Distance entre l'émissaire de rejet et la zone d'exposition : variable selon la zone d'exposition considérée

Activité rejetée :

- ¹⁸F : 2,55 GBq/jour en moyenne (sur 313 jours de production annuel)
- ⁴¹Ar : 639 MBq/jour en moyenne (sur 313 jours de production annuel)

Durée d'exposition après rejet : variable selon la personne représentative considérée et sa durée d'exposition potentielle dans la zone d'exposition prise en compte

Diamètre aéralique médian (DAMA) : le DAMA utilisé est de 5µm afin de considérer l'exposition la plus pénalisante possible.

6.3.1.2. Spécifiques à l'exposition externe

Tel que préconisé, les doses équivalentes et efficaces reçues par exposition externe sont calculées sur la base des valeurs des facteurs de conversion de dose à l'organisme entier liés à l'immersion dans un nuage et des facteurs de conversion liés à l'évolution sur un sol contaminé du « Federal Guidance Report » n°12 de l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis (US-EPA) [6,7], ainsi que les valeurs de la publication 144 de la CIPR [8].

6.3.1.3. Spécifiques à l'exposition interne

Considérant les personnes représentatives retenues et les voies d'exposition potentielles, on relève dans les textes réglementaires de référence les valeurs des débits respiratoires et des doses efficaces engagées par unité d'incorporation pour chaque type de personne.

Catégorie d'âge	< 1 an (3 mo) ¹	1 – 2 ans (1 y) ¹	2 – 7 ans (5 y) ¹	7 – 12 ans (10 y) ¹	12 – 17 ans (15 y) ¹	Adulte (sedentary worker male) ¹	Travailleurs (heavy worker male) ¹
Débit respiratoire sur une journée ¹ (m ³ /h)	0,1192	0,2167	0,365	0,6367	0,8375	0,9542	1,250
Dose efficace engagée par unité d'incorporation par ingestion (DPII) ² pour le ¹⁸ F (Sv/Bq)	5,2.10 ⁻¹⁰	3,0.10 ⁻¹⁰	1,5.10 ⁻¹⁰	9,1.10 ⁻¹¹	6,2.10 ⁻¹¹	4,9.10 ⁻¹¹	

Dose efficace engagée par unité d'incorporation par inhalation (DPUI) ² pour le ¹⁸ F (Sv/Bq)	4,2.10 ⁻¹⁰	3,1.10 ⁻¹⁰	1,5.10 ⁻¹⁰	1,0.10 ⁻¹⁰	7,3.10 ⁻¹¹	5,9.10 ⁻¹¹
Coefficient de dose efficace ⁴¹ Ar (Sv.j ⁻¹ /Bq.m ⁻³)	5,3.10 ⁻⁹					

¹ données issues de la publication n°66 de la CIPR, tableaux de l'annexe B, référencés B16A et B17

² données issues de l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants

6.3.2. Résultats

6.3.2.1. Résultats détaillés du calcul d'impact (fonctionnement normal de l'installation)

Zone d'exposition représentative	CTA	V _{dépôt} (m/s)	Av.t (Bq/m ³ .s)		As (Bq/m ²)	Personnes représentatives	E _{inhalation} (Sv)	E _{nuage} (Sv)	E _{dépôt} (Sv)
			¹⁸ F	⁴¹ Ar					
Zone d'activité (entreprises)	9,17.10 ⁻⁴	5.10 ⁻³	2,32.10 ⁶	5,84.10 ⁵	3,91.10 ²	Enfant 13-17 ans	3,93.10 ⁻⁸	1,49.10 ⁻⁷	1,10.10 ⁻⁷
						Adulte (Travailleur)	7,48.10 ⁻⁸		
Zone résidentielle (habitations)	8,23.10 ⁻⁵	5,5.10 ⁻³	2,04.10 ⁵	5,16.10 ⁴	1,26.10 ⁻¹	Enfant < 1 an	2,83.10 ⁻⁹	1,31.10 ⁻⁸	1,08.10 ⁻⁸
						Enfant 1-2 ans	3,77.10 ⁻⁹		
						Enfant 3-7 ans	3,08.10 ⁻⁹		
						Enfant 7-12 ans	3,61.10 ⁻⁹		
						Enfant 13-17 ans	3,46.10 ⁻⁹		
						Adulte	6,58.10 ⁻⁹		
Etablissement scolaire (école)	5,32.10 ⁻⁵	5,6.10 ⁻³	1,31.10 ⁵	3,32.10 ⁴	1,19.10 ²	Enfant 1-2 ans	2,42.10 ⁻⁹	8,44.10 ⁻⁹	5,90.10 ⁻⁹
						Enfant 3-7 ans	1,98.10 ⁻⁹		
						Enfant 7-12 ans	2,32.10 ⁻⁹		
Etablissement scolaire (crèche)	2,78.10 ⁻⁵	5,81.10 ⁻³	6,74.10 ⁴	1,71.10 ⁴	6,07	Enfant < 1 an	9,36.10 ⁻¹⁰	4,34.10 ⁻⁹	3,70.10 ⁻⁹
						Enfant 1-2 ans	1,25.10 ⁻⁹		
						Adulte (Travailleur)	2,18.10 ⁻⁹		
Zone d'activité sportive	2,91.10 ⁻⁵	5,79.10 ⁻³	7,07.10 ⁴	1,80.10 ⁴	3,39.10 ²	Enfant 3-7 ans	1,07.10 ⁻⁹	4,56.10 ⁻⁹	6,79.10 ⁻¹⁰
						Enfant 7-12 ans	1,25.10 ⁻⁹		
						Enfant 13-17 ans	1,20.10 ⁻⁹		
						Adulte	2,89.10 ⁻⁹		
Autoroute	3,11.10 ⁻³	5,09.10 ⁻³	7,86.10 ⁶	1,98.10 ⁶	3,44.10 ⁴	Enfant < 1 an	1,09.10 ⁻⁷	5,06.10 ⁻⁷	5,40.10 ⁻⁸
						Enfant 1-2 ans	1,46.10 ⁻⁷		
						Enfant 3-7 ans	1,19.10 ⁻⁷		
						Enfant 7-12 ans	1,39.10 ⁻⁷		
						Enfant 13-17 ans	1,33.10 ⁻⁷		
						Adulte (Travailleur)	2,54.10 ⁻⁷		
Etablissement recevant du public (hôtel)	2,53.10 ⁻⁴	5,28.10 ⁻³	6,34.10 ⁵	1,60.10 ⁵	1,14.10 ¹	Enfant < 1 an	8,81.10 ⁻⁹	4,08.10 ⁻⁸	3,21.10 ⁻⁸
						Enfant 1-2 ans	1,17.10 ⁻⁸		
						Enfant 3-7 ans	9,60.10 ⁻⁹		
						Enfant 7-12 ans	1,12.10 ⁻⁸		
						Enfant 13-17 ans	1,08.10 ⁻⁸		
						Adulte	8,25.10 ⁻⁸		
Etablissement recevant du public (grossiste alimentaire)	1,89.10 ⁻⁴	5,22.10 ⁻³	4,74.10 ⁵	1,2.10 ⁵	1,16.10 ³	Enfant < 1 an	6,60.10 ⁻⁹	3,06.10 ⁻⁸	1,26.10 ⁻⁸
						Enfant 1-2 ans	8,78.10 ⁻⁹		
						Enfant 3-7 ans	7,18.10 ⁻⁹		
						Enfant 7-12 ans	8,06.10 ⁻⁹		
						Enfant 13-17 ans	7,19.10 ⁻⁹		
						Adulte (Travailleur)	1,53.10 ⁻⁸		
					8,19.10 ¹	Enfant 13-17 ans	7,19.10 ⁻⁹	3,06.10 ⁻⁸	2,30.10 ⁻⁸
						Adulte (Travailleur)	1,53.10 ⁻⁸		

Symboles : - CTA : coefficient de transfert atmosphérique - E_{inhalation} : dose efficace due à l'exposition interne de l'organisme par l'inhalation de particules

- $V_{\text{dépôt}}$: vitesse de dépôt
- E_{nuage} : dose efficace due à l'exposition externe de l'organisme présent dans le nuage
- $Av.t$: activité volumique
- $E_{\text{dépôt}}$: dose efficace due à l'exposition externe de l'organisme par les particules s'étant déposées à la surface du sol

6.3.2.2. Synthèse des doses efficaces (fonctionnement normal de l'installation)

Zone d'exposition représentative	Personnes représentatives	E_{jour} ($\mu\text{Sv/j}$)	E_{an} maximale ¹ ($\mu\text{Sv/an}$)	E_{an} réaliste ² ($\mu\text{Sv/an}$)
Zone d'activité (entreprises)	Enfant 13-17 ans	0,3	66,6	15,0
	Adulte (Travailleur)	0,334	74,1	16,7
Zone résidentielle (habitations)	Enfant < 1 an	0,0267	8,36	0,721
	Enfant 1-2 ans	0,0277	8,67	0,748
	Enfant 3-7 ans	0,027	8,45	0,729
	Enfant 7-12 ans	0,0275	8,61	0,743
	Enfant 13-17 ans	0,0273	8,55	0,737
	Adulte	0,027	8,45	0,729
Etablissement scolaire (école)	Enfant 1-2 ans	0,0168	3,02	1,90
	Enfant 3-7 ans	0,0163	2,93	1,84
	Enfant 7-12 ans	0,0167	3,01	1,89
	Adulte (Travailleur)	0,0195	4,33	1,18
Etablissement scolaire (crèche)	Enfant < 1 an	0,00898	1,99	0,235
	Enfant 1-2 ans	0,00929	2,06	0,243
	Adulte (Travailleur)	0,0102	2,26	0,326
Zone d'activité sportive	Enfant 3-7 ans	0,00631	1,97	1,97
	Enfant 7-12 ans	0,00649	2,03	2,03
	Enfant 13-17 ans	0,00644	2,02	2,02
	Adulte	0,00631	1,97	1,97
Autoroute	Enfant < 1 an	0,00301	0,669	0,669
	Enfant 1-2 ans	0,00318	0,706	0,706
	Enfant 3-7 ans	0,00306	0,679	0,679
	Enfant 7-12 ans	0,00315	0,699	0,699
	Enfant 13-17 ans	0,00313	0,694	0,694
	Adulte (Travailleur)	0,00367	0,814	0,814
Etablissement recevant du public (hôtel)	Enfant < 1 an	0,0817	5,88	2,64
	Enfant 1-2 ans	0,0846	6,09	2,73
	Enfant 3-7 ans	0,0825	5,94	2,66
	Enfant 7-12 ans	0,0841	6,06	2,72
	Enfant 13-17 ans	0,0837	6,03	2,70
	Adulte	0,0825	5,94	2,66
	Adulte (Travailleur)	0,0924	20,5	4,97
Etablissement recevant du public (grossiste alimentaire)	Enfant < 1 an	0,0498	1,30	1,30
	Enfant 1-2 ans	0,0520	1,35	1,35
	Enfant 3-7 ans	0,0504	1,31	1,31
	Enfant 7-12 ans	0,0516	1,34	1,34
	Enfant 13-17 ans	0,0616	13,7	6,51
Adulte (Travailleur)	0,0689	15,3	7,28	

¹ dans l'hypothèse où le vent rabattrait le panache de rejets toute l'année, exclusivement dans la direction de la zone d'exposition représentative

² considérant la durée annuelle de vent dans la direction de la zone d'exposition représentative

6.3.2.3. Résultats détaillés du calcul d'impact (fonctionnement anormal de l'installation)

Le fonctionnement anormal de l'installation se caractérise par un volume d'activité journalier rejeté supérieur à la valeur limite journalière définie par l'entreprise (10GBq/jour). En reprenant l'historique des incidents du site on constate que deux rejets anormaux (> 10GBq/jour) ont eu lieu, l'un le 04/06/2018, l'activité rejetée sur la journée était de 15GBq de ¹⁸F et l'autre, le 10/11/2020 avec une activité rejetée de 10,163GBq de ¹⁸F sur la journée.

Ainsi, la valeur d'activité journalière maximale rejetée étant de 15GBq, c'est cette valeur qui sera retenue pour le calcul de dose.

Zone d'exposition représentative	CTA	V _{dépôt} (m/s)	Av.t (Bq/m ³ .s)	As (Bq/m ²)	Personnes représentatives	E _{inhalation} (Sv)	E _{nuage} (Sv)	E _{dépôt} (Sv)																																																																																																																																																
Zone d'activité (entreprises)	9,17.10 ⁻⁴	5,1.10 ⁻³	1,36.10 ⁷	2,30.10 ³	Enfant 13-17 ans	2,31.10 ⁻⁷	6,66.10 ⁻⁷	6,45.10 ⁻⁷																																																																																																																																																
					Adulte (Travailleur)	4,40.10 ⁻⁷			Zone résidentielle (habitations)	8,23.10 ⁻⁵	5,5.10 ⁻³	1,20.10 ⁶	7,43.10 ⁻¹	Enfant < 1 an	1,67.10 ⁻⁸	5,86.10 ⁻⁸	6,33.10 ⁻⁸	Enfant 1-2 ans	2,22.10 ⁻⁸	Enfant 3-7 ans	1,81.10 ⁻⁸	Enfant 7-12 ans	2,12.10 ⁻⁸	Enfant 13-17 ans	2,03.10 ⁻⁸	Adulte	1,82.10 ⁻⁸	Etablissement scolaire (école)	5,32.10 ⁻⁵	5,6.10 ⁻³	7,70.10 ⁵	7,00.10 ²	Enfant 1-2 ans	1,43.10 ⁻⁸	3,76.10 ⁻⁸	4,47.10 ⁻⁸	Enfant 3-7 ans	1,17.10 ⁻⁸	Enfant 7-12 ans	1,36.10 ⁻⁸				1,43.10 ²	Adulte (Travailleur)	2,49.10 ⁻⁸	3,76.10 ⁻⁸	4,01.10 ⁻⁸	Etablissement scolaire (crèche)	2,78.10 ⁻⁵	5,81.10 ⁻³	3,96.10 ⁵	3,57.10 ¹	Enfant < 1 an	5,51.10 ⁻⁹	1,94.10 ⁻⁸	2,18.10 ⁻⁸	Enfant 1-2 ans	7,34.10 ⁻⁹			7,61.10 ¹	Adulte (Travailleur)	1,28.10 ⁻⁸	1,94.10 ⁻⁸	2,14.10 ⁻⁸	Zone d'activité sportive	2,91.10 ⁻⁵	5,79.10 ⁻³	4,16.10 ⁵	1,99.10 ³	Enfant 3-7 ans	6,30.10 ⁻⁹	2,03.10 ⁻⁸	4,00.10 ⁻⁹	Enfant 7-12 ans	7,37.10 ⁻⁹	Enfant 13-17 ans	7,07.10 ⁻⁹	Adulte	1,34.10 ⁻⁸	Autoroute	3,11.10 ⁻³	5,09.10 ⁻³	4,62.10 ⁷	2,02.10 ⁵	Enfant < 1 an	6,43.10 ⁻⁷	2,26.10 ⁻⁶	3,18.10 ⁻⁷	Enfant 1-2 ans	8,56.10 ⁻⁷	Enfant 3-7 ans	7,00.10 ⁻⁷	Enfant 7-12 ans	8,19.10 ⁻⁷	Enfant 13-17 ans	7,85.10 ⁻⁷	Adulte (Travailleur)	1,49.10 ⁻⁶	Etablissement recevant du public (hôtel)	2,53.10 ⁻⁴	5,28.10 ⁻³	3,73.10 ⁶	6,71.10 ¹	Enfant < 1 an	5,18.10 ⁻⁸	1,82.10 ⁻⁷	1,89.10 ⁻⁷	Enfant 1-2 ans	6,90.10 ⁻⁸	Enfant 3-7 ans	5,65.10 ⁻⁸	Enfant 7-12 ans	6,60.10 ⁻⁸	Enfant 13-17 ans	6,33.10 ⁻⁸		5,65.10 ⁻⁸					6,51.10 ²	Adulte (Travailleur)	1,20.10 ⁻⁷	1,83.10 ⁻⁷	Etablissement recevant du public (grossiste alimentaire)	1,89.10 ⁻⁴	5,22.10 ⁻³	2,79.10 ⁶	6,83.10 ³	Enfant < 1 an	3,88.10 ⁻⁸	1,36.10 ⁻⁷	7,44.10 ⁻⁸	Enfant 1-2 ans	5,17.10 ⁻⁸	Enfant 3-7 ans	4,22.10 ⁻⁸	Enfant 7-12 ans	4,94.10 ⁻⁸	Enfant 13-17 ans	4,74.10 ⁻⁸			4,82.10 ²	Adulte (Travailleur)	9,01.10 ⁻⁸	1,35.10 ⁻⁷	Symboles : - CTA : coefficient de transfert atmosphérique - E _{inhalation} : dose efficace due à l'exposition interne de l'organisme par l'inhalation de particules - V _{dépôt} : vitesse de dépôt - E _{nuage} : dose efficace due à l'exposition externe de l'organisme présent dans le nuage	
Zone résidentielle (habitations)	8,23.10 ⁻⁵	5,5.10 ⁻³	1,20.10 ⁶	7,43.10 ⁻¹	Enfant < 1 an	1,67.10 ⁻⁸	5,86.10 ⁻⁸	6,33.10 ⁻⁸																																																																																																																																																
					Enfant 1-2 ans	2,22.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 3-7 ans	1,81.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 7-12 ans	2,12.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 13-17 ans	2,03.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Adulte	1,82.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
Etablissement scolaire (école)	5,32.10 ⁻⁵	5,6.10 ⁻³	7,70.10 ⁵	7,00.10 ²	Enfant 1-2 ans	1,43.10 ⁻⁸	3,76.10 ⁻⁸	4,47.10 ⁻⁸																																																																																																																																																
					Enfant 3-7 ans	1,17.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 7-12 ans	1,36.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
							1,43.10 ²	Adulte (Travailleur)	2,49.10 ⁻⁸	3,76.10 ⁻⁸	4,01.10 ⁻⁸																																																																																																																																													
Etablissement scolaire (crèche)	2,78.10 ⁻⁵	5,81.10 ⁻³	3,96.10 ⁵	3,57.10 ¹	Enfant < 1 an	5,51.10 ⁻⁹	1,94.10 ⁻⁸	2,18.10 ⁻⁸																																																																																																																																																
					Enfant 1-2 ans	7,34.10 ⁻⁹																																																																																																																																																		
						7,61.10 ¹	Adulte (Travailleur)	1,28.10 ⁻⁸	1,94.10 ⁻⁸	2,14.10 ⁻⁸																																																																																																																																														
Zone d'activité sportive	2,91.10 ⁻⁵	5,79.10 ⁻³	4,16.10 ⁵	1,99.10 ³	Enfant 3-7 ans	6,30.10 ⁻⁹	2,03.10 ⁻⁸	4,00.10 ⁻⁹																																																																																																																																																
					Enfant 7-12 ans	7,37.10 ⁻⁹																																																																																																																																																		
					Enfant 13-17 ans	7,07.10 ⁻⁹																																																																																																																																																		
					Adulte	1,34.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
Autoroute	3,11.10 ⁻³	5,09.10 ⁻³	4,62.10 ⁷	2,02.10 ⁵	Enfant < 1 an	6,43.10 ⁻⁷	2,26.10 ⁻⁶	3,18.10 ⁻⁷																																																																																																																																																
					Enfant 1-2 ans	8,56.10 ⁻⁷																																																																																																																																																		
					Enfant 3-7 ans	7,00.10 ⁻⁷																																																																																																																																																		
					Enfant 7-12 ans	8,19.10 ⁻⁷																																																																																																																																																		
					Enfant 13-17 ans	7,85.10 ⁻⁷																																																																																																																																																		
					Adulte (Travailleur)	1,49.10 ⁻⁶																																																																																																																																																		
Etablissement recevant du public (hôtel)	2,53.10 ⁻⁴	5,28.10 ⁻³	3,73.10 ⁶	6,71.10 ¹	Enfant < 1 an	5,18.10 ⁻⁸	1,82.10 ⁻⁷	1,89.10 ⁻⁷																																																																																																																																																
					Enfant 1-2 ans	6,90.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 3-7 ans	5,65.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 7-12 ans	6,60.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 13-17 ans	6,33.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					5,65.10 ⁻⁸																																																																																																																																																			
		6,51.10 ²	Adulte (Travailleur)	1,20.10 ⁻⁷	1,83.10 ⁻⁷																																																																																																																																																			
Etablissement recevant du public (grossiste alimentaire)	1,89.10 ⁻⁴	5,22.10 ⁻³	2,79.10 ⁶	6,83.10 ³	Enfant < 1 an	3,88.10 ⁻⁸	1,36.10 ⁻⁷	7,44.10 ⁻⁸																																																																																																																																																
					Enfant 1-2 ans	5,17.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 3-7 ans	4,22.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 7-12 ans	4,94.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
					Enfant 13-17 ans	4,74.10 ⁻⁸																																																																																																																																																		
						4,82.10 ²		Adulte (Travailleur)	9,01.10 ⁻⁸	1,35.10 ⁻⁷																																																																																																																																														
Symboles : - CTA : coefficient de transfert atmosphérique - E _{inhalation} : dose efficace due à l'exposition interne de l'organisme par l'inhalation de particules - V _{dépôt} : vitesse de dépôt - E _{nuage} : dose efficace due à l'exposition externe de l'organisme présent dans le nuage																																																																																																																																																								

- Av.t : activité volumique

- E_{dépôt} : dose efficace due à l'exposition externe de l'organisme par les particules s'étant déposées à la surface du sol

6.3.2.4. Synthèse des doses efficaces (fonctionnement anormal de l'installation)

Zone d'exposition représentative	Personnes représentatives	E _{incident} (μSv/j)
Zone d'activité (entreprises)	Enfant 13-17 ans	1,54
	Adulte (Travailleur)	1,75
Zone résidentielle (habitations)	Enfant < 1 an	0,139
	Enfant 1-2 ans	0,144
	Enfant 3-7 ans	0,140
	Enfant 7-12 ans	0,143
	Enfant 13-17 ans	0,142
	Adulte	0,140
Etablissement scolaire (école)	Enfant 1-2 ans	0,0866
	Enfant 3-7 ans	0,0840
	Enfant 7-12 ans	0,0860
	Adulte (Travailleur)	0,1030
Etablissement scolaire (crèche)	Enfant < 1 an	0,0467
	Enfant 1-2 ans	0,0485
	Adulte (Travailleur)	0,0536
Zone d'activité sportive	Enfant 3-7 ans	0,0306
	Enfant 7-12 ans	0,0317
	Enfant 13-17 ans	0,0314
	Adulte	0,0378
Autoroute	Enfant < 1 an	0,0145
	Enfant 1-2 ans	0,0154
	Enfant 3-7 ans	0,0148
	Enfant 7-12 ans	0,0153
	Enfant 13-17 ans	0,0151
	Adulte (Travailleur)	0,0183
Etablissement recevant du public (hôtel)	Enfant < 1 an	0,0518
	Enfant 1-2 ans	0,0690
	Enfant 3-7 ans	0,0565
	Enfant 7-12 ans	0,0660
	Enfant 13-17 ans	0,0633
	Adulte	0,0565
	Adulte (Travailleur)	0,4860
Etablissement recevant du public (grossiste alimentaire)	Enfant < 1 an	0,0498
	Enfant 1-2 ans	0,0520
	Enfant 3-7 ans	0,0504
	Enfant 7-12 ans	0,0516
	Enfant 13-17 ans	0,3190
	Adulte (Travailleur)	0,3620

6.4. Somme des contributions à la dose

À la suite du calcul des doses, on retient trois personnes représentatives pour lesquelles on considère que toutes leurs habitudes de vie les amènent à se trouver tout au long de l'année à moins de 1km du site. On comparera ainsi les valeurs d'exposition de ces personnes représentatives à la valeur limite d'exposition réglementaire pour le fonctionnement normal de l'installation. Enfin, on discutera de l'impact éventuel d'un fonctionnement anormal de l'installation sur leur niveau d'exposition.

La première personne représentative retenue est l'**enfant de 1-2ans** vivant tout au long de l'année à Lisses, qui habiterait le logement le plus proche du site toute l'année, qui séjournerait à la crèche se trouvant à proximité du site cinq jours par semaine pendant toute la durée de travail de ses parents, qui circulerait deux fois par jour sur l'autoroute bordant le site et qui accompagnerait ses parents en courses dans le supermarché du grossiste alimentaire se trouvant à côté du site au moins une fois toutes les deux semaines.

La deuxième personne représentative retenue est l'**enfant de 7-12ans** vivant tout au long de l'année à Lisses qui habiterait le logement le plus proche du site toute l'année, qui irait dans l'école la plus proche du site cinq jours par semaine, qui ferait au moins 3h30 de sport par semaine dans le stade le plus proche du site, qui circulerait deux fois par jour sur l'autoroute bordant le site et qui accompagnerait ses parents en courses dans le supermarché du grossiste alimentaire se trouvant à côté du site au moins une fois toutes les deux semaines.

La troisième personne représentative retenue est l'**adulte (travailleur)** vivant tout au long de l'année à Lisses qui habiterait le logement le plus proche du site toute l'année, qui travaillerait dans le bâtiment voisin du site, qui ferait au moins 3h30 de sport par semaine dans le stade le plus proche du site, qui circulerait deux fois par jour sur l'autoroute bordant le site et qui irait faire ses courses dans le supermarché du grossiste alimentaire se trouvant à côté du site au moins une fois toutes les deux semaines.

En reprenant les valeurs de doses efficaces réalistes présentées au point 4.3.2.2. ci-dessus et en les cumulant, on arrive pour chaque personne représentative à une dose efficace totale annuelle de :

- $E_{\text{totale}} \text{ enfant de 1-2ans} = 3,1\mu\text{Sv/an}$
- $E_{\text{totale}} \text{ enfant de 7-12ans} = 6,7\mu\text{Sv/an}$
- $E_{\text{totale}} \text{ adulte (travailleur)} = 27,5\mu\text{Sv/an}$

La valeur limite de la dose annuelle pour la population est de 1mSv, soit 1000 μ Sv.

On constate donc que les doses efficaces calculées pour les différentes personnes représentatives (doses majorées compte tenu des hypothèses de calcul retenues) sont très inférieures à la limite réglementaire d'exposition. Elles représentent respectivement, 0,3% de la valeur de la dose limite annuelle pour l'enfant de 1-2ans, 0,7% de cette même valeur pour l'enfant de 7-12ans et 2,8% de cette dose limite pour l'adulte (travailleur).

Au-delà du régime de fonctionnement normal de l'installation, on peut considérer l'exposition de la population à des rejets accidentels.

Ainsi, compte tenu de l'historique du site répertoriant deux évènements de rejets ayant dépassé la limite journalière définie par l'entreprise sur les cinq dernières années, on peut considérer le cas d'une année lors de laquelle la population se retrouverait exposée aux rejets liés au fonctionnement normal de l'installation et à un rejet incidentel.

En se reportant aux valeurs des tableaux de résultats des points 4.3.2.2. et 4.3.2.4, on obtiendrait donc :

- $E_{\text{totale}} \text{ enfant de 1-2ans} + E_{\text{incident}} \text{ enfant de 1-2ans} = 3,1\mu\text{Sv} + 0,26\mu\text{S} = 3,36\mu\text{Sv/an}$
- $E_{\text{totale}} \text{ enfant de 7-12ans} + E_{\text{incident}} \text{ enfant de 7-12ans} = 6,7\mu\text{Sv} + 0,33\mu\text{Sv} = 7,0\mu\text{Sv/an}$
- $E_{\text{totale}} \text{ adulte (travailleur)} + E_{\text{incident}} \text{ adulte (travailleur)} = 27,5\mu\text{Sv} + 2,31\mu\text{Sv} = 29,81\mu\text{Sv/an}$

On constate qu'une exposition incidentelle induit une augmentation du niveau d'exposition annuel global de l'ordre de 5% à 8,5% selon la personne représentative considérée.

Toutefois, l'exposition à un rejet incidentel ne remet pas en cause le fait que le niveau d'exposition annuel reste alors très inférieur à la limite réglementaire d'exposition de la population tel que nous l'avons précédemment constaté.

7. Conclusion

L'évaluation dosimétrique réalisée dans cette étude nous permet donc de constater que pour la personne représentative potentiellement la plus exposée, l'adulte (travailleur), le niveau d'exposition annuel est de l'ordre de 30 μ Sv considérant un scénario d'exposition réaliste et compte tenu d'hypothèses de calcul tout de même majorantes.

Le résultat confirme ainsi un niveau d'impact limité pour la population à hauteur de 3% de la limite annuelle d'exposition du public.

En conséquence, la valeur limite annuelle d'activité rejetée prise en considération dans cette étude (1TBq) semble donc bien adaptée au respect des principes de limitation des doses et d'optimisation des expositions compte tenu des moyens de prévention mis en œuvre par PETNET Solutions.

Sources

- **Réglementation :**
 - Code de la santé publique
 - ICRP Publication 66 – Human Respiratory Tract – Model for Radiological Protection, Annals of the ICRP, Volume 24 N° 1-3 1994, Pergamon.
 - ICRP Publication 71 - Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4, Inhalation Doses Coefficients, Annals of the ICRP, Volume 25 N° 3-4 1995, Pergamon.

- **Rapports / guides / fiches :**
 - ASN – Fiche d'information du public n°2 « Les principes de la radioprotection »
 - DOSIMEX – Manuel DOSIMEX 3.0, sept. 2019
 - DOSIMEX – Dossier de validation DOSIMEX-I 3.0, sept. 2019
 - EDP Sciences – « Guide pratique : Radionucléides & Radioprotection », 2006
 - IBA – Technical report “Air activation in Cyclone 18/9 Vault”, 24/10/2008
 - INRS / IRSN – ED 4311, “Fiche Radioprotection : Radionucléides « Fluor-18 »”, 03/2013
 - IRSN – Rapport IRSN N° 2022-00193, « Eléments méthodologiques pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation cyclotron »
 - IRSN – Rapport sur l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants – Bilan 2014-2019
 - Siemens medical – Radiation Safety Aspects of the Eclipse cyclotron [4.10 Air Activation Hazard]

- **Sites internet :**
 - Autorité de Sûreté Nucléaire : <https://www.asn.fr/l-asn-informe/dossiers-pedagogiques>
 - Ffepgv – barometre-sport-sante.pdf : <https://ffepgv.fr/>
 - Google earth : <https://earth.google.com/web/>
 - ICRP : <https://www.icrp.org/>
 - Infoclimat : <https://www.infoclimat.fr/>
 - IGN – Géoportail : <https://www.ign.fr/>
 - INRS : <https://portaildocumentaire.inrs.fr/>
 - IRSN – Base de connaissances : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Pages/Home.aspx>
 - Légifrance : <https://www.legifrance.gouv.fr/>
 - Meteoblue – licence Creative Commons “Attribution + Non-commercial (BY-NC)” : https://www.meteoblue.com/en/weather/week/lisses_france_2998105
 - Meteofrance : <https://meteofrance.com/>
 - Nucleide.org- Laraweb : <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>

PETNET Solutions

15 Rue des Pyrénées
91090 LISSES

Téléphone : +33 (0)1 78 05 40 40

Site Internet : www.siemens-healthineers.com