



**Résumé de l'étude d'impact sur la population des rejets atmosphériques de
l'installation MIRCen à Fontenay-aux-Roses**

SOMMAIRE

1. OBJET	3
2. DESCRIPTION DES REJETS D'EFFLUENTS ATMOSPHERIQUES CONTENANT DES RADIONUCLEIDES	3
2.1. Rejets en fonctionnement normal	3
2.2. Rejets en fonctionnement incidentel (bouffée) et accidentel (incendie)	4
3. DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DE L'INSTALLATION	4
3.1. Domaine d'étude.....	4
3.2. Populations.....	4
3.3. Lieux de vie et usages autour du site	5
3.4. Topographie et bâtiments	6
4. DONNEES METEOROLOGIQUES	6
5. TRANSFERTS DANS L'ENVIRONNEMENT	7
5.1. Transfert des radionucléides dans l'environnement.....	7
5.2. Choix du système de modélisation	8
6. METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DE LA DOSE	9
6.1. Hypothèses retenues pour le calcul des champs de vent.....	9
6.2. Dispersion atmosphérique	9
6.3. Calcul de dose	10
7. RESULTATS DES CALCULS UNITAIRES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE	13
8. RESULTATS DE L'EVALUATION DE DOSE	15
8.1. Fonctionnement normal	15
8.2. Rejet incidentel (bouffée)	17
8.2.1 Cas d'une bouffée de Carbone-11	17
8.2.2 Cas d'une bouffée de Fluor-18	18
8.3. Rejet accidentel (incendie généralisé)	19
9. CONCLUSION	21

1. OBJET

Dans le cadre de ses études sur les maladies neurodégénératives, le département MIRCen, implanté sur le site CEA de Fontenay-aux-Roses réalise des examens par tomographie à émission de positons. La production des radioligands utilisés lors de ces examens génère des rejets atmosphériques radioactifs. Le présent document est une synthèse à destination du public de l'évaluation de l'impact sanitaire de ces rejets atmosphériques radioactifs.

L'impact est évalué successivement pour :

- Les rejets en fonctionnement normal d'une année quelconque avec une activité totale rejetée correspondant à l'autorisation de rejet demandée pour les activités de radiosynthèse,
- Un rejet incidentel, sous la forme d'une bouffée, correspondant à la perte d'étanchéité d'une enceinte blindée,
- Un rejet accidentel, résultat d'un incendie généralisé affectant la zone de production de l'installation MIRCen.

Les particularités de cette étude sont :

- La position du site CEA de Fontenay-aux-Roses, dans un environnement topographique et urbain complexe,
- Le besoin d'évaluer l'impact à proximité immédiate de l'installation (quelques dizaines de mètres), en raison de la présence de lieux de vie et d'activités,
- Le caractère subchronique des rejets en fonctionnement normal.

Le système de modélisation Parallel-Micro-Swift-Spray (PMSS) qui permet de reconstruire des écoulements 3D tenant compte de manière explicite de la présence de bâtiments a été retenu pour cette étude. De plus, la méthodologie mise en place considère les rejets en fonctionnement normal comme une succession de rejets courts et non comme un rejet moyen annuel comme cela est fait dans les approches reposant sur l'utilisation de roses des vents.

Ce document présente, dans les chapitres 2 à 0, les données d'entrée de l'évaluation d'impact et les choix retenus pour la réalisation des calculs, notamment pour le traitement des rejets subchroniques. Les résultats des calculs d'écoulement et de dispersion sont présentés dans le chapitre 7. Enfin, le chapitre 0 montre les résultats de l'évaluation d'impact faite pour les différents types de rejets mentionnés ci-dessus.

2. DESCRIPTION DES REJETS D'EFFLUENTS ATMOSPHERIQUES CONTENANT DES RADIONUCLÉIDES

2.1. Rejets en fonctionnement normal

L'installation MIRCen réalise des synthèses de fluor-18 (^{18}F de période égale à 1,83 heures) et de carbone-11 (^{11}C de période égale à 20,4 minutes) pour ses activités de recherche dans le domaine des maladies neurodégénératives. La fabrication de ces marqueurs à vie courte est réalisée grâce à un cyclotron pour la production des radionucléides et par des automates dans des cellules blindées pour le couplage des radionucléides aux molécules d'intérêt. Afin de limiter les rejets atmosphériques, les enceintes blindées sont connectées à un système de compression des gaz radioactifs (SCG) qui sont libérés lors des différentes étapes des radiosynthèses. Les rejets de radionucléides à l'atmosphère sont liés à la sortie obligatoire du système de compression des gaz après une radiosynthèse pour préparer la radiosynthèse suivante.

Les trois radionucléides pouvant être rejetés à l'atmosphère sont le ^{18}F et le ^{11}C , objets des radiosynthèses, mais aussi le ^{41}Ar , produit par activation neutronique du ^{40}Ar contenu dans l'air de la casemate. Les valeurs de rejet demandées pour l'autorisation, tenant compte d'une augmentation prévue d'activité et basées sur le retour d'expérience du SHFJ qui exploite une installation similaire, figurent dans le Tableau 1.

Carbone-11		Fluor-18		Argon-41	
Activité totale	Nbre de rejets	Activité totale	Nbre de rejets	Activité totale	Nbre de rejets
1,6E+11	184	1,6E+10	138	1,0E+9	414

Tableau 1 : Nombre de rejets et activité totale rejetée (en Bq/an) par l'émissaire de l'installation MIRCen en fonctionnement normal.

2.2. Rejets en fonctionnement incidentel (bouffée) et accidentel (incendie)

En cas de perte d'étanchéité d'une enceinte blindée, le procédé s'arrête et les effluents sont repris par la ventilation et transférés vers l'émissaire de rejet.

Ont été considérées pour le fonctionnement incidentel la capacité maximale de production des cibles ^{11}C (185 GBq) et 10% de la capacité maximale de production des cibles ^{18}F , soit 18,5 GBq (^{18}F étant à l'état liquide, on suppose un taux d'évaporation de 10%).

Afin d'avoir une estimation enveloppe des conséquences radiologiques résultant d'un incendie généralisé, on suppose que l'intégralité de l'activité maximale contenue dans la zone de production de l'installation est rejetée dans l'environnement sans rétention ni filtration, *via* la porte de l'issue de secours de l'installation.

Cette hypothèse est très conservatrice car elle ne tient pas compte de la localisation de l'activité dans le bâtiment, qui dispose d'une sectorisation incendie. De plus, le fonctionnement de l'installation et notamment l'intervalle de temps prévu entre deux synthèses successives, permettant une décroissance partielle de l'activité, implique que l'activité totale contenue dans la zone de production de l'installation à un instant donné est inférieure à la somme des activités maximales de chaque radionucléide.

De façon conservatrice, le terme source considéré pour le rejet accidentel est de 185 GBq de ^{11}C et 185 GBq de ^{18}F .

3. DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DE L'INSTALLATION

3.1. Domaine d'étude

L'installation MIRCen est une installation du CEA de Fontenay-aux-Roses. Le domaine d'étude retenu est un carré de 1,2 km de côté centré sur le site. Le choix de ce domaine est un compromis entre :

- la population déjà importante vivant ou ayant des activités à l'intérieur de ce domaine,
- la taille de domaine autorisée par le logiciel d'écoulement-dispersion mis en œuvre avec la contrainte d'un maillage suffisamment résolu pour décrire correctement le bâti urbain,
- la relative faiblesse des doses attendues compte-tenu du terme-source considéré.

3.2. Populations

Au total, on estime la population vivant à l'intérieur du domaine d'étude à un peu moins de 12000 personnes.

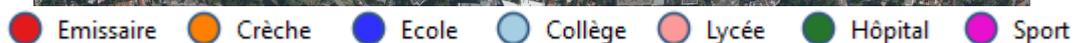
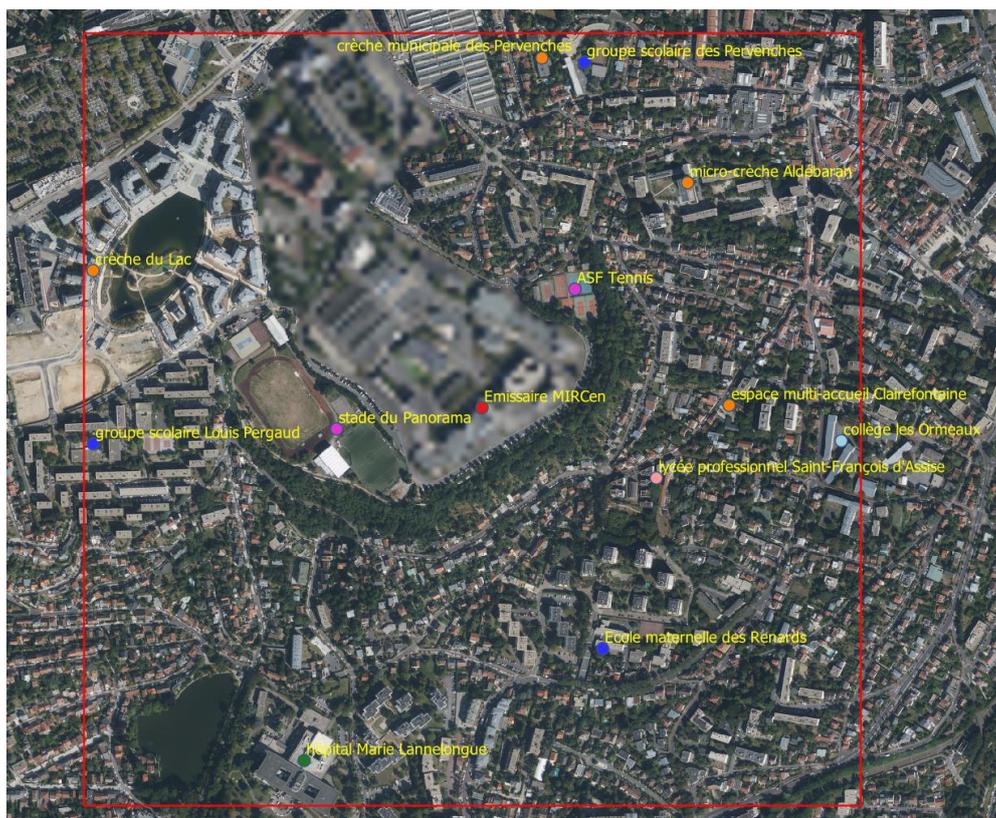
L'évaluation est basée sur les deux derniers recensements des villes de Fontenay-aux-Roses, Clamart et du Plessis-Robinson. Ces données sont complétées par celles de la base Filosofi (Fichier localisé

social et fiscal) dont la version la plus récente, fondée sur les données fiscales de 2019, a été mise en ligne en 2023. En regardant l'évolution de la population des trois communes de Fontenay-aux-Roses, Clamart et du Plessis-Robinson entre 2016 et 2022, on remarque que la population de Fontenay-aux-Roses et du Plessis-Robinson augmente peu, voire pas du tout, alors que celle de Clamart progresse de 3700 habitants. On peut penser qu'une partie de cette population supplémentaire s'est installée dans le nouveau quartier du Panorama. Compte-tenu de la densité de population observée pour des zones similaires, on estime à 1500 personnes environ la population de ce quartier présente à l'intérieur du domaine d'étude.

3.3. Lieux de vie et usages autour du site

Les établissements accueillant des enfants (crèches, écoles, collèges et lycée), ainsi que les hôpitaux et les complexes sportifs à l'intérieur du domaine d'étude ont été recensés (voir plan ci-dessous). On dénombre ainsi :

- 4 crèches (à 350m pour la plus proche),
- 3 écoles maternelles (à 400m pour la plus proche) et 2 écoles primaires (à 550m pour la plus proche),
- 1 collège (à 550 m),
- 1 lycée professionnel (à 300m),
- 1 hôpital (à 600m),
- 2 complexes sportifs en extérieur (stade et tennis à 200m environ).

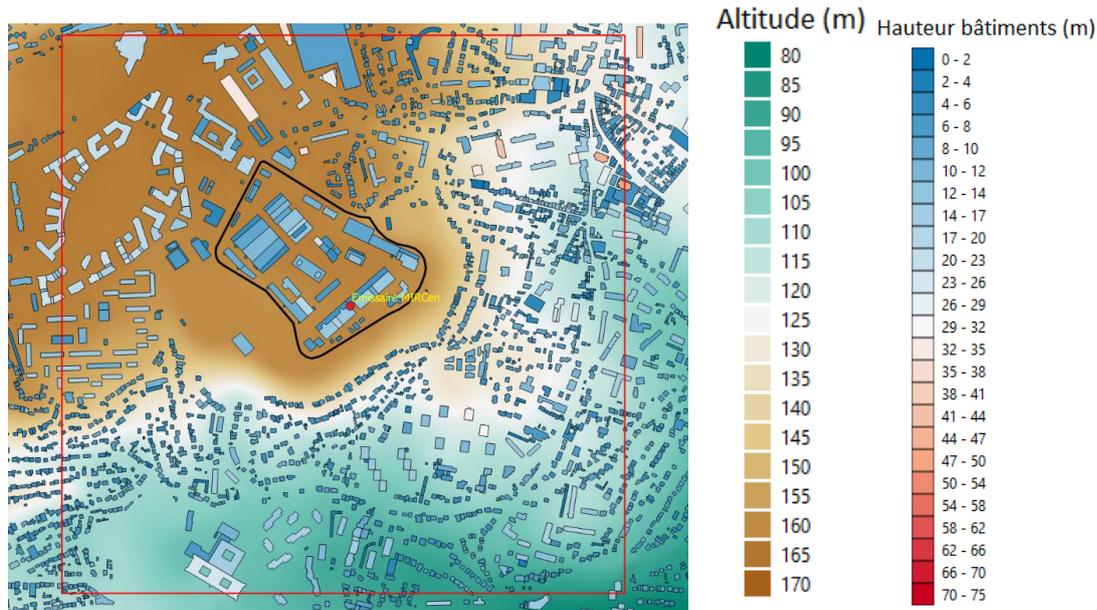


Le Registre Parcellaire Graphique de l'IGN indique qu'il n'y a pas de surfaces agricoles dans un rayon de 5 km autour du site CEA de Fontenay-aux-Roses. Par ailleurs, l'analyse des photos aériennes de la BD ORTHO® montre qu'il existe assez peu de jardins potagers dans les zones pavillonnaires autour du CEA Fontenay-aux-Roses et que, lorsqu'ils existent, la taille de ces jardins potagers est modeste. Aussi, l'autoconsommation de fruits et de légumes d'origine locale est faible.

3.4. Topographie et bâtiments

La topographie utilisée comme donnée d'entrée sur le domaine d'étude est le produit RGE ALTI® de l'IGN à 5 m de résolution. Le fichier correspondant au département des Hauts-de-Seine date du 30 juillet 2020. Sur le domaine d'étude, l'altitude varie entre 90 et 165 mètres. Un grand quart nord-ouest, dont le site CEA de Fontenay-aux-Roses, se situe sur un plateau à environ 160 m d'altitude. Les bords sud et est du domaine de calcul sont situés en contrebas.

La topographie ainsi que l'emprise au sol et la hauteur des bâtiments utilisées dans le cadre de cette étude sont représentées sur le plan ci-dessous :



4. DONNEES METEOROLOGIQUES

Dans le cadre de cette étude, ce sont les données météorologiques de la station Météo-France de Vélizy-Villacoublay, située à 5,5 km au sud-ouest qui ont été exploitées. La figure 1 montre la rose des vents calculée pour cette station sur une période de quinze ans couvrant les années 2010 à 2024. Les vents dominants soufflent du sud-ouest avec une part significative de vents soufflant du nord-est en diffusion normale (DN) et du nord-nord-ouest en diffusion faible (DF). En situation de pluie, le vent souffle essentiellement du sud-ouest. Les situations de diffusion faible représentent 23% du total des situations météorologiques, les situations de diffusion normale 69% et les situations de pluie 8%.

Sur la période 2010-2024, la pluviométrie moyenne annuelle est égale à 643,1 mm.

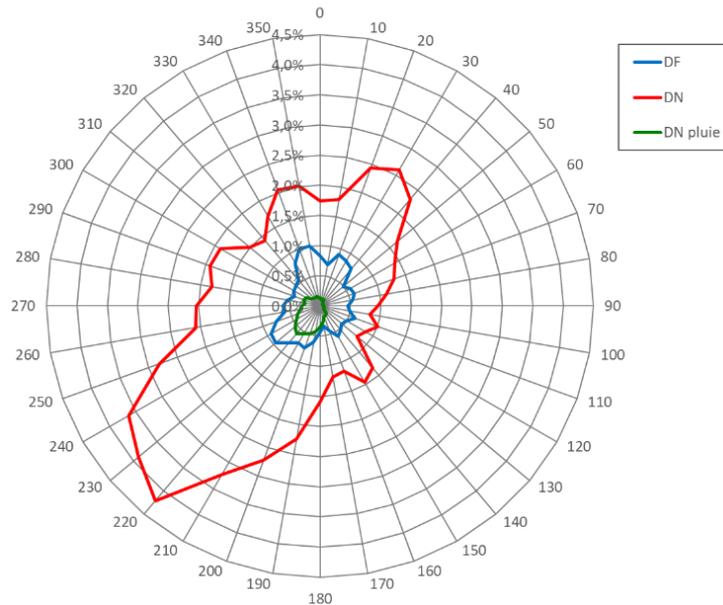


Figure 1 : Rose des vents par classe de stabilité pour la période 2010-2024 à la station Météo-France de Villacoublay.

5. TRANSFERTS DANS L'ENVIRONNEMENT

L'évaluation des transferts dans l'environnement repose sur l'identification des différentes voies de transfert depuis l'atmosphère vers les compartiments de l'environnement et sur la modélisation des transferts de radionucléides depuis l'émissaire jusqu'aux différentes matrices environnementales.

5.1. Transfert des radionucléides dans l'environnement

Les voies de transfert correspondent au cheminement des radionucléides dans les différents compartiments de l'environnement (sol, air, végétaux, ...) à partir des émissaires jusqu'aux populations. De façon générique, à partir du rejet à l'émissaire, les voies de transfert dans l'environnement concernent le transfert dans l'atmosphère des radionucléides ainsi que, pour les radionucléides sous forme d'aérosols ou de gaz réactifs, le dépôt sur les sols et les cultures, ainsi que le transfert aux produits d'origine animale.

Les rejets de l'installation MIRCEM sont constitués de radionucléides à vie courte (^{11}C dont la période est de l'ordre de 20 minutes ainsi que ^{18}F et ^{41}Ar , dont la période est d'environ 2 heures). Vu ces périodes radioactives courtes, il n'y a pas d'accumulation de dépôts dans l'environnement donc pas d'exposition due aux dépôts à long terme. De plus, les transferts directs vers les cultures lors du passage du panache sont très faibles et il n'y a pas de transfert racinaire depuis les dépôts au sol.

Ainsi, dans cette étude, les mécanismes pris en compte sont les suivants :

- la dispersion dans l'atmosphère en fonction de conditions météorologiques représentatives de la climatologie du site et la dilution des radionucléides par la turbulence atmosphérique ;
- le dépôt sur la surface du sol des radionucléides qui sont dans l'atmosphère à proximité du sol.

Bien que des jardins potagers soient présents à l'intérieur du domaine d'étude, on ne considère pas l'exposition par ingestion de fruits et légumes par la suite car, du fait des périodes radioactives très courtes des radionucléides rejetés, ils ne sont plus présents dans ces produits au moment de leur consommation par la population.

5.2. Choix du système de modélisation

L'installation MIRCen se situe dans un environnement topographique et bâti complexe. Les habitations les plus proches et donc les points d'impact les plus proches sont situés à 150 m environ, vers le sud-est, mais sont situés en contrebas du site CEA de Fontenay-aux-Roses. Pour tenir compte de ces particularités (topographie marquée et présence de bâtiments), nous avons choisi d'utiliser le système de modélisation PMSS. Il est composé du modèle diagnostique de reconstruction 3D des écoulements atmosphériques PNSWIFT et du code de dispersion lagrangien PSPRAY.

Le domaine d'étude est défini avec une emprise au sol de 1200 x 1200 m centrée sur l'installation MIRCen. Il est maillé horizontalement avec une résolution de 2 m. Verticalement, on définit 34 niveaux entre le sol et une altitude de 1600 m, les 10 premiers étant réguliers entre le sol et une hauteur de 20 m environ. Pour les niveaux supérieurs, on relâche le maillage jusqu'au sommet de la boîte de calcul. Les niveaux verticaux sont exprimés en coordonnée réduite de telle sorte que le maillage reste régulier mais suit la topographie à proximité du sol et est à une altitude constante au sommet du domaine de calcul. On obtient donc une grille de calcul de 601x601x34 points qui sera utilisée à la fois pour le calcul d'écoulement PNSWIFT et pour le calcul de dispersion PSPRAY.

L'impact des rejets atmosphériques de l'installation MIRCen est évalué pour l'ensemble des points du domaine de calcul défini ci-dessus mais les résultats seront présentés également aux lieux indiqués au tableau 1 pour le groupe de population concerné (adulte, enfant de 1 an ou enfant de 10 ans). Ces groupes de population ont été définis en fonction des directions principales d'origine du vent en diffusion normale (220° et 30°) et en diffusion faible (340°), mais aussi suite à un recensement des lieux de vie, des crèches et des écoles situés dans le domaine d'étude.

Lieu	Coordonnée X (RGF93)	Coordonnée Y (RGF93)	Classes d'âge
Première habitation Nord-Est	646990	6854830	Adulte Enfant 10 ans Enfant 1 an
Première habitation Sud-Est	646985	6854500	Adulte Enfant 10 ans Enfant 1 an
Première habitation Sud-Ouest	646770	6854415	Adulte Enfant 10 ans Enfant 1 an
Première habitation Nord-Ouest	646570	6854800	Adulte Enfant 10 ans Enfant 1 an
Espace multi-accueil Clairefontaine	647290	6854615	Enfant 1 an
Crèche municipale des Pervenches	647015	6855160	Enfant 1 an
Crèche du Lac	646315	6854830	Enfant 1 an
Ecole maternelle des Renards	647100	6854240	Enfant 1 an
Groupe scolaire des Pervenches	647070	6855130	Enfant 10 ans
Groupe scolaire Louis Pergaud	646310	6854560	Enfant 10 ans

Tableau 1 : Lieux retenus pour la définition des groupes de population étudiés.

6. METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DE LA DOSE

Les rejets en fonctionnement normal de l'installation MIRCen ont pour particularité d'être subchroniques (quelques centaines de rejets par an, de durée brève : de quelques minutes à quelques dizaines de minutes). On suppose que ces rejets sont suffisamment courts pour que les conditions météorologiques restent invariantes lorsqu'ils ont lieu. Chaque rejet est associé à la condition météorologique qui prévaut au moment où il est effectué et un calcul d'écoulement et de dispersion est effectué pour ce couple terme source rejeté / condition météorologique. L'impact global sur une année est évalué en sommant les contributions de chaque rejet.

Pour l'évaluation de l'impact d'une année quelconque, on utilise une approche statistique. On va tirer au sort, de manière aléatoire à l'intérieur de la rose des vents, de groupes de conditions météorologiques et évaluer l'impact pour chacun de ces groupes en sommant les contributions des rejets qui les composent. On obtient alors, pour une année quelconque, des évaluations de l'impact correspondant aux situations météorologiques possibles. De cette distribution, il est enfin possible d'extraire un quantile élevé qui donnera une évaluation de l'impact pour les situations météorologiques pénalisantes.

Pour évaluer l'impact des rejets atmosphériques en fonctionnement normal, un post-traitement permet de sommer les contributions de chaque rejet en allant récupérer dans la base de données les résultats des simulations unitaires pondérés du terme source correspondant.

Pour évaluer l'impact des rejets atmosphériques en fonctionnement incidentel, un autre post-traitement permet, en chaque point du domaine d'étude, d'identifier la condition météorologique qui conduit à la dose maximale.

6.1. Hypothèses retenues pour le calcul des champs de vent

Les calculs d'écoulement avec le modèle PNSWIFT sont effectués pour chaque condition météorologique possible, c'est-à-dire pour chaque triplet vitesse du vent, direction du vent, classe de stabilité atmosphérique. Concrètement, dans le fichier météorologique regroupant les données d'entrée à prendre en compte pour le calcul PNSWIFT, on impose, à une hauteur de 10 m au centre du domaine de calcul, la vitesse et la direction du vent correspondant à chaque classe de la rose des vents. Le modèle PNSWIFT ayant besoin a minima d'un profil de vent et d'un profil de température pour être exécuté, on définit une vitesse de vent égale à la moitié de celle donnée à 10 m à une hauteur de 2 m par rapport au sol et une vitesse égale à celle donnée à 10 m au-dessus de la canopée urbaine et jusqu'au sommet de la grille de calcul.

Dans PNSWIFT, la turbulence est calculée comme la somme d'une turbulence de fond, déduite de la stabilité atmosphérique, et d'une turbulence locale induite par la présence des bâtiments et d'éventuels reliefs. Cette turbulence locale dépend du cisaillement sur le champ de vent. On a choisi comme donnée d'entrée un profil de vitesse de vent « quasiment plat », c'est-à-dire sans cisaillement vertical, ce qui permet d'éviter de comptabiliser deux fois la turbulence de fond dans le calcul de la turbulence.

6.2. Dispersion atmosphérique

Nous avons vu précédemment que les rejets en fonctionnement normal et en fonctionnement incidentel (bouffée non contrôlée) sont suffisamment courts pour que les conditions météorologiques soient considérées invariantes lorsqu'ils ont lieu. On suppose cette hypothèse vérifiée également dans le cas d'un rejet accidentel (incendie). Les calculs de dispersion atmosphérique sont effectués pour chaque condition météorologique de la rose des vents et pour un rejet unitaire (1 Bq). **Dans les calculs PSPRAY, on considère trois espèces :**

- Une espèce gazeuse radioactive ($n^{\circ}1$), de période égale à 20,4 minutes, avec une vitesse de dépôt par temps sec égale à 5.10^{-3} m/s et un taux de lavage par la pluie égal à 2.10^{-4} s $^{-1}$, simulant ^{11}C ,

- Une espèce gazeuse radioactive (n°2), de période égale à 1,83 heures, avec une vitesse de dépôt par temps sec égale à 5.10^{-3} m/s et un taux de lavage par la pluie égal à 2.10^{-4} s⁻¹, simulant ¹⁸F,
- Une espèce gazeuse radioactive (n°3), de période égale à 1,83 heures, qui ne se dépose pas au sol et n'est pas lavée par la pluie, simulant ⁴¹Ar,

De plus, on considère deux sources d'émission :

- Une source ponctuelle représentant l'**émissaire de l'installation MIRCen**, depuis lequel sont émis ⁴¹Ar, ¹¹C et ¹⁸F en fonctionnement normal ou incidentel. Le rejet unitaire est simulé par l'émission de 45000 particules numériques par seconde pendant une durée de dix minutes, soit un total de 27 millions de particules numériques.
- Une **source surfacique, située devant l'installation MIRCen**, simulant les radionucléides (¹¹C et ¹⁸F) émis pendant l'incendie. Cette source représente les fuites qui auraient lieu en cas d'incendie. En effet, dans un premier temps, les filtres THE retiennent les particules radioactives produites et mises en suspension par l'incendie, la ventilation est mise à l'arrêt dès lors que le dernier niveau de filtration est endommagé. C'est pourquoi on ne retient pas le scénario d'un rejet à l'émissaire, qui disperserait beaucoup plus. Le rejet unitaire est simulé par l'émission de 45000 particules numériques par seconde, pendant une durée de dix minutes, soit un total de 27 millions de particules numériques.

Les concentrations sont échantillonnées toutes les cinq secondes mais ne sont moyennées et enregistrées qu'une seule fois, à la fin de la simulation, lorsque toutes les particules numériques ont quitté le domaine de calcul. Un fichier binaire de résultats PSPRAY va ainsi contenir cinq champs 3D de concentration :

- Un champ de concentration de l'espèce n°1 émise depuis la source n°1 (l'émissaire MIRCen),
- Un champ de concentration de l'espèce n°2 émise depuis la source n°1 (l'émissaire MIRCen),
- Un champ de concentration de l'espèce n°3 émise depuis la source n°1 (l'émissaire MIRCen),
- Un champ de concentration de l'espèce n°1 émise depuis la source n°2 (au sol devant l'installation MIRCen),
- Un champ de concentration de l'espèce n°2 émise depuis la source n°2 (au sol devant l'installation MIRCen),

Enregistrer un champ de concentration, moyenne de la concentration vue en chaque point du domaine de calcul, uniquement en fin de simulation, suffit pour réaliser l'évaluation des doses car la formulation de celles-ci ne dépend que de l'intégrale de la concentration atmosphérique sur la durée de passage du panache. Une conséquence en est que la cinétique du rejet n'influe pas sur la concentration intégrée calculée, les conditions météorologiques étant considérées invariantes pendant la durée de la simulation (égale à une heure, soit une durée suffisante pour considérer que le panache est sorti du domaine de calcul, quelle que soit la condition météorologique simulée). Le choix fait ici de simuler des rejets constants pendant une durée de dix minutes n'influence donc pas le résultat du calcul de doses. C'est pour cette raison, mais aussi parce qu'on ne réalise qu'un seul calcul PMSS par condition météorologique, simulant la dispersion depuis les deux sources de rejet (émissaire et issue de secours), que la durée du rejet en cas d'incendie a également été fixée à dix minutes.

6.3. Calcul de dose

On estime des doses efficaces qui prennent en compte les modes d'exposition suivants :

- l'exposition externe : les radionucléides sont dans un compartiment de l'environnement en dehors de l'individu (atmosphère, sol). Leurs rayonnements atteignent l'individu. On prend en compte l'exposition externe qui est due à l'irradiation par le panache et à l'irradiation par les radionucléides déposés sur le sol.
- l'exposition interne : les radionucléides sont dans l'organisme de l'individu après incorporation. On prend en compte l'inhalation des radionucléides présents dans l'atmosphère. Comme indiqué précédemment, la voie ingestion n'est pas prise en compte dans cette étude du fait des courtes périodes radioactives des radionucléides rejetés.

La dose efficace est calculée à partir de l'activité volumique dans l'air pour l'immersion dans le panache, des activités surfaciques sur les sols pour l'irradiation par le dépôt et des activités incorporées pour l'exposition interne par l'utilisation respectivement de coefficients de dose externe et des coefficients de doses engagées par unité d'incorporation (DPUI).

Les coefficients de dose utilisés pour les calculs de dose sont :

- pour l'exposition externe, les valeurs de la publication 144 de la CIPR ;
- pour l'exposition interne, les valeurs des DPUI de l'arrêté du 16 novembre 2023.

Les doses calculées pour l'ensemble des personnes représentatives sont à mettre en regard de la valeur limite de 1 mSv/an pour la population (Art R. 1333-11 du code de la santé publique) pour le fonctionnement normal de l'installation.

L'impact est évalué en calculant les doses reçues, ici selon deux voies principales : l'exposition par inhalation et l'exposition par irradiation externe.

L'exposition par inhalation s'exprime selon la relation suivante, pour une personne immobile située en un point (I, J, K) du domaine de calcul :

$$H_{inh}(I, J, K) = \left(\sum_{RN_i=RN_1}^{RN_i=RN_N} \bar{C}^{RN_i}(I, J, K) \cdot \Delta t \cdot \frac{\tau_{resp}}{3600} \cdot f_{inh}^{RN_i} \cdot 1000 \right)$$

avec :

H_{inh}	Dose par inhalation	mSv
C^{RN_i}	Concentration moyenne calculée par PSPRAY pour le radionucléide RN_i	Bq.m ⁻³
Δt	Durée sur laquelle la concentration est moyennée	s
τ_{resp}	Débit respiratoire	m ³ .h ⁻¹
3600	Coefficient de conversion	s.h ⁻¹
$f_{inh}^{RN_i}$	Coefficient de dose efficace par inhalation de RN_i	Sv.Bq ⁻¹
1000	Coefficient de conversion	mSv.Sv ⁻¹

On rappelle que la concentration telle qu'elle est calculée par PSPRAY s'exprime comme suit :

$$C(I, J, K) = \frac{\int_{t_{deb}}^{t_{fin}} C(I, J, K, t) \cdot dt}{\Delta t}$$

Pour une activité physique modérée, on considère le débit respiratoire moyen égal à 1,2 m³.h⁻¹ pour l'adulte, 0,9 m³.h⁻¹ pour l'enfant de 10 ans et 0,31 m³.h⁻¹ pour l'enfant de 1 an.

De la même façon, l'exposition par irradiation externe due au passage du panache s'exprime selon la relation suivante, pour une personne immobile située en un point (I, J, K) du domaine de calcul :

$$H_{irr\ ext}(I, J, K) = \left(\sum_{RN_i=RN_1}^{RN_i=RN_N} \bar{C}^{RN_i}(I, J, K) \cdot \Delta t \cdot f_{irr\ ext}^{RN_i} \cdot 1000 \right)$$

avec :

$H_{irr\ ext}$	Dose par irradiation externe due au passage du panache	mSv
$f_{irr\ ext}^{RN_i}$	Coefficient de dose efficace par irradiation externe de RN_i	(Sv/s).(Bq/m ³)

Juste après le passage du panache, le débit de dose par irradiation externe dû aux dépôts au sol est maximal et s'exprime selon la relation :

$$DD_{irr\ dép}(I, J) = \left(\sum_{RN_i=RN_1}^{RN_i=RN_N} D_{dép}^{RN_i}(I, J) \cdot f_{irr\ dép}^{RN_i} \cdot 1000 \cdot 3600 \right)$$

avec :

$DD_{irr\ dép}$	Débit de dose par irradiation externe due aux dépôts au sol	mSv/h
$D_{dép}^{RN_i}$	Dépôt au sol juste après le passage du panache	(Bq/m ²)
$f_{irr\ dép}^{RN_i}$	Coefficient de dose efficace par irradiation externe due au dépôt au sol pour le radionucléide RN_i	(Sv/s).(Bq/m ²)

La dose par irradiation externe aux dépôts au sol est déduite de la relation précédente en l'intégrant sur la durée d'exposition T (prise égale à 48 h dans cette étude car compte-tenu des périodes radioactives

très courtes des radionucléides concernés, la dose n'augmente plus lorsque la durée d'exposition est supérieure à quelques heures) et s'écrit :

$$H_{\text{irr dép}}(I, J) = \left(\sum_{RN_i=RN_1}^{RN_i=RN_N} DD_{\text{irr dép}}^{RN_i}(I, J) \cdot \frac{\tau^{RN_i}}{\ln 2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\ln 2 \cdot T / \tau^{RN_i}\right) \right) \right)$$

avec :

$H_{\text{irr dép}}$	Dose par irradiation externe due aux dépôts au sol	mSv
$DD_{\text{irr dép}}^{RN_i}$	Débit de dose par irradiation externe due aux dépôts au sol pour le radionucléide RN_i	mSv/h
τ^{RN_i}	Période de décroissance radioactive du radionucléide RN_i	h
T	Durée d'exposition	h

Le tableau 2 donne les coefficients de dose par inhalation utilisés dans le cadre de cette étude, le Tableau 3, les coefficients de dose par irradiation externe due au passage du panache et le tableau 4 les coefficients de dose par irradiation externe due aux dépôts au sol.

Radionucléide	Coefficient de dose par inhalation (en Sv/Bq) et classe de solubilité associée		
	Adulte	Enfant 10 ans	Enfant 1 an
^{11}C (20,37m)	$2,2 \cdot 10^{-12}$ (gaz)	$4,1 \cdot 10^{-12}$ (gaz)	$1,2 \cdot 10^{-11}$ (gaz)
^{18}F (1,83h)	$5,6 \cdot 10^{-11}$ (M)	$9,7 \cdot 10^{-11}$ (M)	$2,9 \cdot 10^{-10}$ (M)
^{41}Ar (1,83h)	-	-	-

Tableau 2 : Coefficients de dose par inhalation.

Radionucléide	Coefficient de dose par irradiation externe due au panache (en (Sv/s)/(Bq/m ³))		
	Adulte	Enfant 10 ans	Enfant 1 an
^{11}C (20,37m)	$4,25 \cdot 10^{-14}$	$4,53 \cdot 10^{-14}$	$4,97 \cdot 10^{-14}$
^{18}F (1,83h)	$4,11 \cdot 10^{-14}$	$4,39 \cdot 10^{-14}$	$4,81 \cdot 10^{-14}$
^{41}Ar (1,83h)	$6,08 \cdot 10^{-14}$	$6,42 \cdot 10^{-14}$	$6,86 \cdot 10^{-14}$

Tableau 3 : Coefficients de dose par irradiation externe due au passage du panache.

Radionucléide	Coefficient de dose par irradiation externe due aux dépôts (en (Sv/s)/(Bq/m ²))		
	Adulte	Enfant 10 ans	Enfant 1 an
^{11}C (20,37m)	$6,25 \cdot 10^{-16}$	$6,92 \cdot 10^{-16}$	$8,22 \cdot 10^{-16}$
^{18}F (1,83h)	$6,08 \cdot 10^{-16}$	$6,69 \cdot 10^{-16}$	$7,97 \cdot 10^{-16}$
^{41}Ar (1,83h)	-	-	-

Tableau 4 : Coefficients de dose par irradiation externe due aux dépôts au sol.

Le calcul de l'exposition externe comme exposé ci-dessus, c'est-à-dire comme étant le produit de la concentration intégrée par un coefficient de dose par irradiation externe donnerait des résultats peu réalistes pour des domaines d'étude de petite taille et fortement bâti comme celui autour du CEA Fontenay-aux-Roses. Aussi, dans le cadre de cette étude, les doses par irradiation externe sont calculées à l'aide de l'outil SprayShine, développé par CEA/DASE/SRCE/LIRC.

Pour les résultats d'impact présentés aux sections suivantes, les calculs de doses par irradiation externe, que ce soit suite au passage des panaches ou consécutivement à l'exposition aux dépôts au sol, sont effectués avec le programme SprayShine.

7. RESULTATS DES CALCULS UNITAIRES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE

La Figure montre, pour une condition météorologique choisies parmi les 1044 conditions simulées, la répartition spatiale à proximité du sol du coefficient de transfert atmosphérique. Ce coefficient de transfert atmosphérique, exprimé en s/m^3 , équivaut à la concentration intégrée sur la durée de passage du panache pour un rejet unitaire de 1 Bq depuis l'émissaire « MIRCen ».

La coupe verticale de la figure 3 montrent un exemple d'influence des bâtiments sur l'étalement vertical du panache.

Enfin, la Figure 4 montre, pour la situation avec un vent soufflant à 4 m/s depuis la direction 230° (c'est-à-dire la condition la plus probable en cas de pluie), la répartition spatiale du coefficient de transfert surfacique pour une des classes de stabilité atmosphérique considérées (diffusion faible, diffusion normale par temps sec et diffusion normale par temps de pluie).

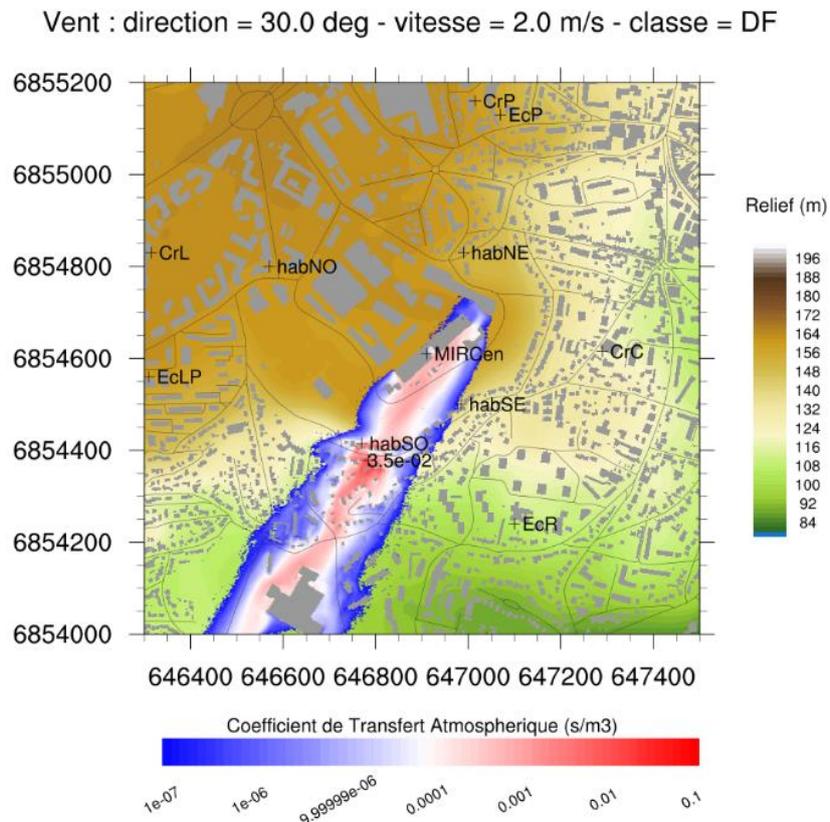


Figure 2 : Coefficient de transfert atmosphérique pour un rejet unitaire depuis l'émissaire « MIRCen » et quelques conditions météorologiques de la rose des vents.

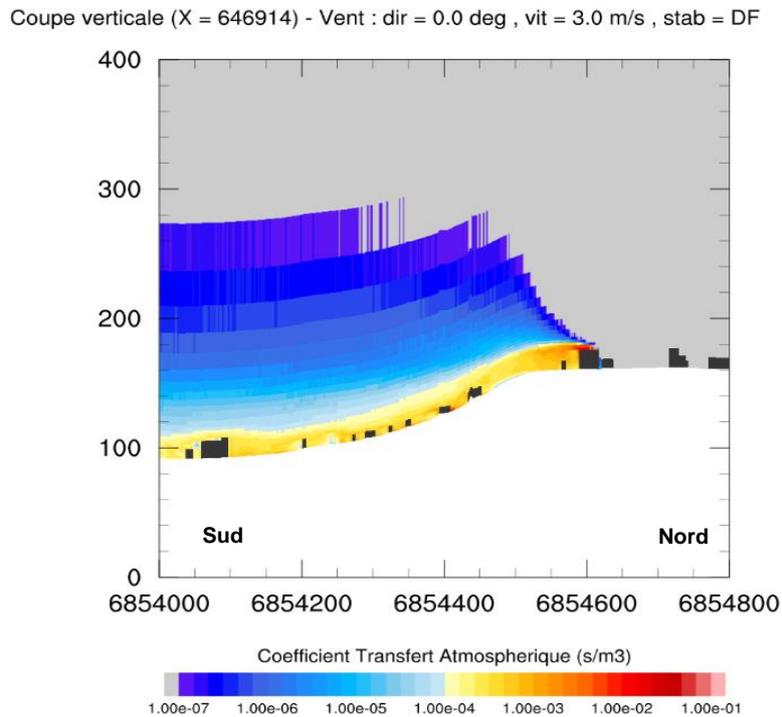


Figure 3 : Coupe verticale du coefficient de transfert atmosphérique pour un rejet unitaire depuis l'émissaire « MIRGen » avec vent du nord (illustrations du haut) et vent du sud (illustrations du bas).

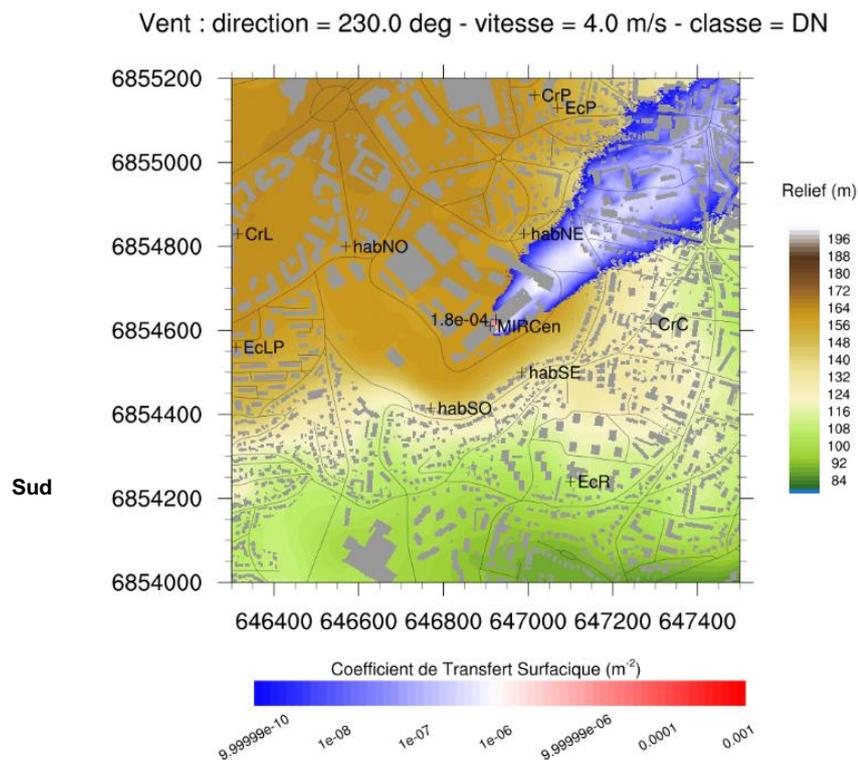


Figure 4 : Coefficient de transfert surfaccique pour un rejet unitaire depuis l'émissaire « MIRGen » et les conditions météorologiques avec un vent à 4 m/s soufflant de la direction 230°.

8. RESULTATS DE L'EVALUATION DE DOSE

8.1. Fonctionnement normal

L'évaluation des doses pour les rejets en fonctionnement normal est effectuée sur la base de la limite demandée pour l'autorisation de rejet annuelle (160 GBq en ^{11}C , 16 GBq en ^{18}F et 1 GBq en ^{41}Ar), en sommant les contributions de chacun des 736 rejets qui sont supposés avoir lieu au cours d'une année.

La moyenne de la distribution de la dose efficace pour l'adulte, consécutive aux rejets atmosphériques en fonctionnement normal de l'installation MIRCen pour une année type est calculée en chaque point du domaine d'étude situé à l'extérieur de l'enceinte du CEA Fontenay-aux-Roses. Le maximum est atteint avec une dose égale à 0,65 μSv . Pour l'enfant de 10 ans et l'enfant de 1 an cette valeur maximale de la moyenne de la dose efficace est un peu plus élevée avec respectivement 0,79 μSv et 0,85 μSv . Sur l'ensemble du domaine d'étude, la dose efficace totale est partout supérieure à 0,001 μSv .

Parmi les groupes de population définis, celui correspondant à la « première habitation Sud-Est » reçoit la dose la plus élevée avec 0,2 μSv pour l'adulte, 0,22 μSv pour l'enfant de 10 ans et 0,25 μSv pour l'enfant de 1 an (cf. tableau 5).

Pour évaluer l'impact de conditions météorologiques qui auraient été particulièrement pénalisantes, on s'intéresse aux centiles élevés de la distribution de la dose efficace pour les rejets d'une année-type. Ils sont supérieurs à la dose efficace moyenne d'un facteur compris entre 1,2 et 1,8 au maximum. Par exemple, pour le groupe « première habitation Sud-Est », le centile 90 de la dose efficace totale vaut 0,24 μSv pour l'adulte, 0,26 μSv pour l'enfant de 10 ans et 0,30 μSv pour l'enfant de 1 an. Le centile 99 de la dose efficace totale vaut 0,28 μSv pour l'adulte, 0,31 μSv pour l'enfant de 10 ans et 0,35 μSv pour l'enfant de 1 an.

Lieu	Classes d'âge	Dose efficace (μSv) moyenne	Dose efficace (μSv) centile 90	Dose efficace (μSv) centile 99
Maximum dans la zone d'étude	Adulte	0,65	0,92	1,09
	Enfant 10 ans	0,79	1,12	1,33
	Enfant 1 an	0,85	1,21	1,44
Première habitation Nord-Est	Adulte	0,069	0,085	0,098
	Enfant 10 ans	0,076	0,093	0,11
	Enfant 1 an	0,085	0,10	0,12
Première habitation Sud-Est	Adulte	0,20	0,24	0,28
	Enfant 10 ans	0,22	0,26	0,31
	Enfant 1 an	0,25	0,30	0,35
Première habitation Sud-Ouest	Adulte	0,046	0,058	0,071
	Enfant 10 ans	0,052	0,065	0,079
	Enfant 1 an	0,058	0,072	0,088
Première habitation Nord-Ouest	Adulte	0,019	0,026	0,034
	Enfant 10 ans	0,021	0,029	0,038
	Enfant 1 an	0,023	0,032	0,042
Espace multi-accueil Clairefontaine	Enfant 1 an	0,038	0,053	0,065
Crèche municipale des Pervenches	Enfant 1 an	0,014	0,019	0,023
Crèche du Lac	Enfant 1 an	0,008	0,012	0,017
Ecole maternelle des Renards	Enfant 1 an	0,026	0,034	0,041
Groupe scolaire des Pervenches	Enfant 10 ans	0,025	0,035	0,045
Groupe scolaire Louis Pergaud	Enfant 10 ans	0,005	0,007	0,009

Tableau 5 : Moyenne, 90^{ème} et 99^{ème} centile de la dose efficace totale (μSv) des différents groupes de population pour l'ensemble des jeux de données météorologiques de l'année type.

Le tableau 6 présente la ventilation par voie d'exposition de la moyenne de la dose efficace calculée pour une année de rejets en fonctionnement normal pour les différents groupes de population. Selon le groupe de population considéré, la dose par inhalation représente entre 6 et 18% de la dose efficace totale, la dose par irradiation externe due au passage du panache entre 36 et 68% de la dose efficace totale et la dose par irradiation externe due au dépôt au sol entre 22 et 52% de la dose efficace totale.

Lieu	Classes d'âge	Dose efficace (μSv) moyenne	Inhalation (μSv)	Irradiation externe panache (μSv)	Exposition externe aux dépôts (μSv)
Première habitation Nord-Est	Adulte	0,069	0,005	0,042	0,023
	Enfant 10 ans	0,076	0,006	0,045	0,026
	Enfant 1 an	0,085	0,006	0,049	0,030
Première habitation Sud-Est	Adulte	0,20	0,022	0,077	0,097
	Enfant 10 ans	0,22	0,029	0,082	0,107
	Enfant 1 an	0,25	0,029	0,090	0,128
Première habitation Sud-Ouest	Adulte	0,046	0,007	0,025	0,014
	Enfant 10 ans	0,052	0,009	0,027	0,015
	Enfant 1 an	0,058	0,009	0,029	0,018
Première habitation Nord-Ouest	Adulte	0,019	0,001	0,012	0,005
	Enfant 10 ans	0,021	0,002	0,013	0,005
	Enfant 1 an	0,023	0,002	0,015	0,006
Espace multi-accueil Clairefontaine	Enfant 1 an	0,038	0,005	0,019	0,014
Crèche municipale des Pervenches	Enfant 1 an	0,014	0,001	0,009	0,004
Crèche du Lac	Enfant 1 an	0,008	0,001	0,005	0,002
Ecole maternelle des Renards	Enfant 1 an	0,026	0,002	0,016	0,008
Groupe scolaire des Pervenches	Enfant 10 ans	0,025	0,004	0,012	0,009
Groupe scolaire Louis Pergaud	Enfant 10 ans	0,005	0,0005	0,0035	0,001

Tableau 6 : Moyenne de la dose efficace totale (μSv) des différents groupes de population pour l'ensemble des jeux de données météorologiques de l'année type et répartition selon les trois voies d'exposition considérées.

Le tableau 7 présente la ventilation par radionucléide du terme-source de la moyenne de la dose efficace calculée pour une année de rejets en fonctionnement normal pour les différents groupes de population. Il montre que, quel que soit le groupe de population, la contribution du ^{11}C à la dose efficace totale est comprise entre 70 et 80%, celle du ^{18}F est comprise entre 20 et 30% et celle de ^{41}Ar vaut environ 0,5%.

Au point d'impact maximal, la contribution du ^{18}F à la dose efficace totale est équivalente à celle du ^{11}C , bien que les rejets de ^{18}F soient 10 fois inférieurs à ceux du ^{11}C .

Lieu	Classes d'âge	Dose efficace (μSv) moyenne	Contribution ^{11}C (%)	Contribution ^{18}F (%)	Contribution ^{41}Ar (%)
Première habitation Nord-Est	Adulte	0,069	78,5%	21,0%	0,5%
	Enfant 10 ans	0,076	77,8%	21,8%	0,5%
	Enfant 1 an	0,085	77,7%	21,9%	0,4%
Première habitation Sud-Est	Adulte	0,20	71,7%	28,0%	0,3%
	Enfant 10 ans	0,22	70,8%	28,9%	0,3%
	Enfant 1 an	0,25	70,9%	28,8%	0,3%

Lieu	Classes d'âge	Dose efficace (μSv) moyenne	Contribution ¹¹ C (%)	Contribution ¹⁸ F (%)	Contribution ⁴¹ Ar (%)
Première habitation Sud-Ouest	Adulte	0,046	73,7%	25,6%	0,6%
	Enfant 10 ans	0,052	72,5%	26,9%	0,6%
	Enfant 1 an	0,058	72,7%	26,7%	0,6%
Première habitation Nord-Ouest	Adulte	0,019	80,4%	19,1%	0,5%
	Enfant 10 ans	0,021	79,5%	20,0%	0,5%
	Enfant 1 an	0,023	79,5%	20,0%	0,5%
Espace multi-accueil Clairefontaine	Enfant 1 an	0,038	73,8%	25,8%	0,4%
Crèche municipale des Pervenches	Enfant 1 an	0,014	79,5%	19,9%	0,5%
Crèche du Lac	Enfant 1 an	0,008	77,6%	21,9%	0,5%
Ecole maternelle des Renards	Enfant 1 an	0,026	79,8%	19,7%	0,6%
Groupe scolaire des Pervenches	Enfant 10 ans	0,025	71,7%	27,8%	0,4%
Groupe scolaire Louis Pergaud	Enfant 10 ans	0,005	79,8%	19,6%	0,6%

Tableau 7 : Moyenne de la dose efficace totale (μSv) des différents groupes de population pour l'ensemble des jeux de données météorologiques de l'année type et répartition selon les trois radionucléides du terme-source.

8.2. Rejet incidentel (bouffée)

8.2.1 Cas d'une bouffée de Carbone-11

L'impact radiologique consécutif au rejet d'une bouffée de 185 GBq de ¹¹C est évalué toutes conditions météorologiques confondues. Concrètement, pour chaque point du domaine de calcul, on retient la condition météorologique qui conduit à la dose la plus forte, parmi les 1044 conditions météorologiques de la rose des vents, pour lesquelles des calculs unitaires d'écoulement-dispersion ont été effectués avec le code de calcul PMSS.

La dose efficace totale correspond à la somme de la dose par inhalation, de la dose par irradiation externe due au passage du panache et de la dose par irradiation externe aux dépôts intégrée sur une durée de 1 an, toutes conditions météorologiques confondues, pour un rejet de 185 GBq de ¹¹C émis depuis l'émissaire « MIRCEM ».

La valeur maximale est de 28 μSv pour un adulte. Pour l'enfant de 10 ans et l'enfant de 1 an, la dose maximale est de 33 μSv pour l'enfant de 10 ans et 37 μSv pour l'enfant de 1 an.

Le tableau 8 montre les doses efficaces totales maximales, toutes conditions météorologiques confondues, pour un rejet de 185 GBq de ¹¹C émis depuis l'émissaire « MIRCEM ». Parmi les groupes de population retenus, elles sont comprises entre 0,33 μSv, pour l'enfant de 10 ans du « groupe scolaire Louis Pergaud », et 4,86 μSv pour l'enfant de 1 an à la « première habitation Sud-Est ». Pour la plupart des groupes de population, ce sont des conditions de diffusion faible avec des vents faibles (entre 1 et 2 m/s) qui conduisent à la dose maximale. Seul le groupe des enfants de 1 an à la crèche municipale des Pervenches et le groupe des enfants de 1 an à l'école maternelle des Renards reçoivent une dose maximale pour une condition de diffusion normale avec pluie et un vent soufflant à 1,5 m/s.

Pour la plupart des groupes de population, la dose est essentiellement due à l'irradiation externe (au panache et aux dépôts au sol). La dose par inhalation est significative (respectivement 35% et 20% de la dose totale) à l'endroit où l'impact est maximal et à la première habitation Sud-Ouest.

Lieu	Classes d'âge	Dose efficace (μSv) moyenne	Inhalation (μSv)	Irradiation externe panache (μSv)	Exposition externe aux dépôts (μSv)
Maximum dans la zone d'étude	Adulte	28,1	9,2	1,6	17,3
	Enfant 10 ans	33,0	12,8	1,7	19,2
	Enfant 1 an	37,1	12,9	1,9	22,3
Première habitation Nord-Est	Adulte	1,57	0,07	1,14	0,36
	Enfant 10 ans	1,71	0,09	1,21	0,40
	Enfant 1 an	1,90	0,09	1,33	0,48
Première habitation Sud-Est	Adulte	3,82	0,26	1,31	2,26
	Enfant 10 ans	4,25	0,36	1,40	2,50
	Enfant 1 an	4,86	0,36	1,53	2,97
Première habitation Sud-Ouest	Adulte	1,33	0,26	0,84	0,24
	Enfant 10 ans	1,52	0,37	0,89	0,26
	Enfant 1 an	1,66	0,37	0,98	0,31
Première habitation Nord-Ouest	Adulte	1,07	0,05	0,78	0,23
	Enfant 10 ans	1,17	0,08	0,83	0,26
	Enfant 1 an	1,30	0,08	0,91	0,31
Espace multi-accueil Clairefontaine	Enfant 1 an	1,94	0,20	1,04	0,71
Crèche municipale des Pervenches	Enfant 1 an	0,55	0,01	0,21	0,33
Crèche du Lac	Enfant 1 an	0,58	0,05	0,39	0,14
Ecole maternelle des Renards	Enfant 1 an	0,89	0,02	0,32	0,55
Groupe scolaire des Pervenches	Enfant 10 ans	1,26	0,17	0,56	0,52
Groupe scolaire Louis Pergaud	Enfant 10 ans	0,33	0,02	0,26	0,06

Tableau 8 : Dose efficace maximale (μSv) et répartition par voie d'exposition, toutes conditions météorologiques confondues, consécutive au rejet incidentel d'une bouffée de 185 GBq de ¹¹C, pour les différents groupes de population définis.

8.2.2 Cas d'une bouffée de Fluor-18

L'impact radiologique consécutif au rejet d'une bouffée de 18,5 GBq de ¹⁸F est également évalué toutes conditions météorologiques confondues.

La dose efficace totale est la somme de la dose par inhalation, de la dose par irradiation externe due au passage du panache et de la dose par irradiation externe aux dépôts intégrée sur une durée de 1 an, toutes conditions météorologiques confondues, pour un rejet de 18,5 GBq de ¹⁸F émis depuis l'émissaire « MIRCen ». La dose maximale est de 31 μSv pour un adulte, de 39 μSv pour l'enfant de 10 ans et 41 μSv pour l'enfant de 1 an.

Le tableau 9 montre les doses efficaces totales maximales, toutes conditions météorologiques confondues, pour un rejet de 18,5 GBq de ¹⁸F émis depuis l'émissaire « MIRCen ». Parmi les groupes de population retenus, elles sont comprises entre 0,13 μSv, pour l'enfant de 10 ans du « groupe scolaire Louis Pergaud », et 2,53 μSv pour l'enfant de 1 an à la « première habitation Sud-Est ». Pour la moitié des groupes de population, ce sont des conditions de diffusion faible avec des vents faibles (entre 1 et 2 m/s) qui conduisent à la dose maximale. Pour l'autre moitié des groupes de population, ce sont des conditions de diffusion normale avec pluie et un vent soufflant à 1,5 m/s qui conduisent à la dose maximale.

Pour les groupes de population où la dose maximale est due à une condition météorologique de diffusion normale avec pluie, la dose par inhalation représente environ 15% de la dose totale. Pour les groupes de population où la dose maximale est due à une condition météorologique de diffusion faible, la dose par inhalation représente entre 35 et 75% de la dose totale.

Lieu	Classes d'âge	Dose efficace (μSv) moyenne	Inhalation (μSv)	Irradiation externe panache (μSv)	Exposition externe aux dépôts (μSv)
Maximum dans la zone d'étude	Adulte	30,9	22,2	0,4	8,3
	Enfant 10 ans	38,6	28,9	0,5	9,2
	Enfant 1 an	41,0	29,5	0,5	11,0
Première habitation Nord-Est	Adulte	0,54	0,07	0,05	0,41
	Enfant 10 ans	0,61	0,10	0,05	0,45
	Enfant 1 an	0,70	0,10	0,06	0,54
Première habitation Sud-Est	Adulte	1,93	0,65	0,13	1,15
	Enfant 10 ans	2,25	0,85	0,14	1,26
	Enfant 1 an	2,53	0,87	0,15	1,51
Première habitation Sud-Ouest	Adulte	0,87	0,67	0,08	0,12
	Enfant 10 ans	1,09	0,87	0,09	0,13
	Enfant 1 an	1,15	0,90	0,09	0,16
Première habitation Nord-Ouest	Adulte	0,38	0,06	0,03	0,29
	Enfant 10 ans	0,43	0,08	0,04	0,31
	Enfant 1 an	0,49	0,08	0,04	0,38
Espace multi-accueil Clairefontaine	Enfant 1 an	0,93	0,47	0,10	0,36
Crèche municipale des Pervenches	Enfant 1 an	0,21	0,02	0,02	0,17
Crèche du Lac	Enfant 1 an	0,25	0,04	0,02	0,19
Ecole maternelle des Renards	Enfant 1 an	0,35	0,04	0,03	0,28
Groupe scolaire des Pervenches	Enfant 10 ans	0,72	0,41	0,05	0,26
Groupe scolaire Louis Pergaud	Enfant 10 ans	0,13	0,02	0,01	1,0

Tableau 9 : Dose efficace maximale (μSv) et répartition par voie d'exposition, toutes conditions météorologiques confondues, consécutive au rejet incidentel d'une bouffée de 18,5 GBq de ¹⁸F, pour les différents groupes de population définis.

8.3. Rejet accidentel (incendie généralisé)

Selon la même méthodologie que celle employée pour traiter le rejet incidentel, l'impact radiologique, consécutif au rejet d'un certain nombre de radionucléides en cas d'incendie généralisé affectant la zone de production de l'installation MIRCen, est évalué en considérant toutes les conditions météorologiques de la rose des vents et en retenant, en chaque point du domaine de calcul, la condition météorologique conduisant à la dose la plus élevée. Le terme source rejeté à l'atmosphère est considéré égal à 185 GBq de ¹¹C et 185 GBq de ¹⁸F. Le rejet est supposé avoir lieu au sol, devant les portes de l'installation MIRCen. Les calculs sont effectués sans prendre en compte de surhauteur liée aux effets thermiques dans le panache, ce qui est très conservatif dans l'évaluation des doses.

La dose efficace totale est la somme de la dose par inhalation, de la dose par irradiation externe due au passage du panache et de la dose par irradiation externe aux dépôts intégrée sur une durée de 1 an, toutes conditions météorologiques confondues, en cas d'incendie généralisé à l'installation « MIRCen ». La dose maximale est de 318 μSv pour un adulte, de 406 μSv pour l'enfant de 10 ans et 424 μSv pour l'enfant de 1 an.

Le tableau 10 montre les doses efficaces totales maximales, toutes conditions météorologiques confondues, pour un rejet de 185 GBq de ^{11}C et 185 GBq de ^{18}F , émis au sol devant l'installation « MIRCen ». Parmi les groupes de population retenus, elles sont comprises entre 1,6 μSv , pour l'enfant de 1 an à la « crèche municipale des Pervenches », et 28,5 μSv pour l'enfant de 1 an à la « première habitation Sud-Ouest ». Pour une majorité des groupes de population, ce sont des conditions de diffusion normale avec pluie et un vent soufflant à 1,5 m/s qui conduisent à la dose maximale. Pour quatre groupes de population, ce sont des conditions de diffusion faible avec des vents faibles (entre 1 et 2 m/s) qui conduisent à la dose maximale. On note que pour certains groupes de population, ce n'est pas la même condition météorologique que dans le cas du rejet incidentel qui conduit à la dose maximale.

Pour les groupes de population où la dose maximale est due à une condition météorologique de diffusion normale avec pluie, la dose par inhalation représente 8 à 15% de la dose totale. Pour les groupes de population où la dose maximale est due à une condition météorologique de diffusion faible, la dose par inhalation représente entre 35 et 75% de la dose totale.

Lieu	Classes d'âge	Dose efficace (μSv) moyenne	Inhalation (μSv)	Irradiation externe panache (μSv)	Exposition externe aux dépôts (μSv)
Maximum dans la zone d'étude	Adulte	318	279	8,8	30,2
	Enfant 10 ans	406	363	9,4	33,6
	Enfant 1 an	424	374	10,3	39,7
Première habitation Nord-Est	Adulte	4,70	0,48	0,73	3,50
	Enfant 10 ans	5,25	0,62	0,78	3,86
	Enfant 1 an	6,08	0,64	0,85	4,59
Première habitation Sud-Est	Adulte	11,5	3,79	1,71	6,00
	Enfant 10 ans	13,4	4,93	1,82	6,61
	Enfant 1 an	14,9	5,08	2,00	7,87
Première habitation Sud-Ouest	Adulte	21,7	14,9	2,90	3,86
	Enfant 10 ans	26,8	19,5	3,10	4,26
	Enfant 1 an	28,5	20,0	3,40	5,07
Première habitation Nord-Ouest	Adulte	4,01	0,53	0,58	2,90
	Enfant 10 ans	4,51	0,69	0,62	3,19
	Enfant 1 an	5,20	0,71	0,68	3,80
Espace multi-accueil Clairefontaine	Enfant 1 an	3,55	0,52	0,46	2,58
Crèche municipale des Pervenches	Enfant 1 an	1,58	0,13	0,26	1,19
Crèche du Lac	Enfant 1 an	2,49	0,31	0,28	1,90
Ecole maternelle des Renards	Enfant 1 an	3,26	0,26	0,42	2,58
Groupe scolaire des Pervenches	Enfant 10 ans	5,97	2,79	0,93	2,25
Groupe scolaire Louis Pergaud	Enfant 10 ans	1,83	0,23	0,23	1,37

Tableau 10 : Dose efficace maximale (μSv) et répartition par voie d'exposition, toutes conditions météorologiques confondues, consécutive au rejet en cas d'incendie généralisé à l'installation MIRCEN, pour les différents groupes de population définis.

9. CONCLUSION

Cette étude est consacrée à l'évaluation de l'impact radiologique des rejets atmosphériques de l'installation MIRCEM à Fontenay-aux-Roses et considère :

- les rejets en fonctionnement normal, suite aux activités de radiosynthèse d'une année type, sur la base des quantités maximales estimées ;
- un rejet incidentel de 185 GBq de ^{11}C et un rejet incidentel de 18,5 GBq de ^{18}F ;
- un rejet accidentel en cas d'incendie généralisé au bâtiment MIRCEM.

En raison des effets de site attendus, les simulations ont été réalisées à l'aide du système de modélisation PMSS. Elles présentent un caractère réaliste car la topographie et l'ensemble des bâtiments de la zone où se situe le site CEA de Fontenay-aux-Roses sont pris en compte dans le calcul 3D des écoulements et de la dispersion atmosphérique. De plus, les rejets normaux, subchroniques, sont effectivement traités comme tel, c'est-à-dire comme une succession de rejets brefs.

Pour le scénario accidentel, l'évaluation de doses proposée est majorante dans la mesure où les effets thermiques responsables de la surélévation du panache dans l'atmosphère ne sont pas modélisés.

Pour les rejets en fonctionnement normal, la dose maximale est de **0,65 μSv** pour l'adulte, **0,79 μSv** pour l'enfant de 10 ans et **0,85 μSv** pour l'enfant de 1 an. Elle est due autant au rejet de ^{11}C qu'au rejet de ^{18}F . Ainsi, la dose sur la population riveraine des rejets radiologiques atmosphériques émis en fonctionnement normal par l'installation MIRCEM est très largement inférieure à la limite d'exposition du public de 1 mSv par an, valeur qui est indiquée dans le code de la santé publique.

Le rejet incidentel d'une bouffée de 185 GBq de ^{11}C conduit, quelle que soit la condition météorologique envisagée, au maximum à une dose de **28 μSv** pour l'adulte. Cette dose est plus élevée pour l'enfant de 10 ans (**33 μSv**) et pour l'enfant de 1 an (**37 μSv**).

Le rejet incidentel d'une bouffée de 18,5 GBq de ^{18}F conduit, quelle que soit la condition météorologique envisagée, au maximum à une dose de **31 μSv** pour l'adulte. Cette dose est plus élevée pour l'enfant de 10 ans (**39 μSv**) et pour l'enfant de 1 an (**41 μSv**).

Le rejet accidentel en cas d'incendie généralisé de l'installation « MIRCEM » conduit, quelle que soit la condition météorologique envisagée, au maximum à une dose de **318 μSv** pour l'adulte. Cette dose est plus élevée pour l'enfant de 10 ans (**406 μSv**) et pour l'enfant de 1 an (**424 μSv**).

Quel que soit le scénario incidentel ou accidentel considéré, les doses sont, toutes, inférieures à 10 mSv qui est le premier niveau d'intervention présenté dans le code de la santé publique. Il n'y aurait donc pas lieu de prévoir la mise en œuvre de mesures de protection des populations.