

**RESUME DE L'ETUDE D'IMPACT  
PAR SIMULATION NUMERIQUE 3D  
DES REJETS ATMOSPHERIQUES  
DU SHFJ**



## Table des matières

<b>1 - INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>2 - DONNEES D'ENTREE</b> .....	<b>3</b>
2.1 - TERMES SOURCE.....	3
<b>2.1.1 - Rejets en fonctionnement normal.</b> .....	3
<b>2.1.2 - Rejet incidentel (bouffée)</b> .....	4
<b>2.1.3 - Rejet accidentel (incendie généralisé)</b> .....	4
2.2 - DONNEES METEOROLOGIQUES.....	5
<b>3 - METHODOLOGIE ET HYPOTHESES DE CALCUL</b> .....	<b>6</b>
3.1 - CHOIX DU SYSTEME DE MODELISATION .....	6
3.2 - DEMARCHE CHOISIE POUR LE CALCUL DE L'IMPACT DES REJETS .....	7
3.3 - OPTIONS DE CALCUL RETENUES.....	7
<b>3.3.1 - Météorologie à micro-échelle</b> .....	7
<b>3.3.2 - Dispersion atmosphérique et évaluation des doses</b> .....	8
<b>3.3.3 - Prise en compte du facteur pluie</b> .....	9
<b>3.3.4 - Impact pour les enfants</b> .....	11
<b>4 - RESULTAT DES CALCULS UNITAIRES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE</b> .....	<b>13</b>
4.1 - CALCULS UNITAIRES DEPUIS L'EMISSAIRE « CYCLOTRON-RADIOCHIMIE ».....	13
4.2 - CALCULS UNITAIRES DEPUIS L'EMISSAIRE « MEDECINE NUCLEAIRE ».....	13
4.3 - CALCULS UNITAIRES EN CAS D'INCENDIE GENERALISE .....	13
<b>5 - RESULTATS DE L'EVALUATION DES DOSES</b> .....	<b>13</b>
5.1 - FONCTIONNEMENT NORMAL POUR L'ANNEE 2016.....	13
5.2 - FONCTIONNEMENT NORMAL POUR UNE ANNEE QUELCONQUE SUR LA BASE DES LIMITES DE REJETS ACTUELLES.....	15
<b>5.2.1 - Cas où les doses sont évaluées à l'aide de coefficients de dose</b> .....	15
<b>5.2.2 - Cas où la dose par irradiation externe est évaluée à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement</b> .....	16
5.3 - REJET INCIDENTEL (BOUFFEE) .....	17
<b>5.3.1 - Cas où les doses sont évaluées à l'aide de coefficients de dose</b> .....	17
<b>5.3.2 - Cas où la dose par irradiation externe est évaluée à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement</b> .....	18
5.4 - REJET ACCIDENTEL (INCENDIE GENERALISE) .....	18
<b>5.4.1 - Cas où les doses sont évaluées à l'aide de coefficients de dose</b> .....	18
<b>5.4.2 - Cas où la dose par irradiation externe est évaluée à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement</b> .....	19
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>20</b>



## 1 - INTRODUCTION

De par ses activités de recherche biomédicales et de médecine nucléaire, le Service Hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ), situé à Orsay (Essonne) émet des rejets gazeux radioactifs. Le présent document est un résumé de l'étude d'impact de ces rejets gazeux. L'impact est évalué successivement pour :

- Les rejets mesurés en fonctionnement normal lors de l'année 2016,
- Les rejets en fonctionnement normal d'une année quelconque avec une activité totale rejetée correspondant à la limite fixée par l'autorisation ASN,
- Un rejet incidentel, sous la forme d'une bouffée, correspondant à une défaillance dans le procédé de radiosynthèse,
- Un rejet accidentel, résultat d'un incendie généralisé affectant l'installation.

Les particularités de cette étude sont :

- La position du SHFJ, situé au cœur de la ville d'Orsay, dans la vallée de l'Yvette, c'est-à-dire dans un environnement à la topographie et au bâti complexes,
- 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.

Un système de modélisation 3D a été choisi pour reconstruire des écoulements tenant compte de manière explicite de la présence de bâtiments. Ce système 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 et 3, les données d'entrée de l'étude d'impact et les choix retenus les calculs, notamment pour le traitement des rejets subchroniques. Les résultats des calculs d'écoulement et de dispersion sont présentés dans le chapitre 4. Le chapitre 5 montre les résultats de l'évaluation d'impact faite pour les différents types de rejets mentionnés ci-dessus.

## 2 - DONNEES D'ENTREE

### 2.1 - TERMES SOURCE

#### 2.1.1 - Rejets en fonctionnement normal.

Pour ses activités, le SHFJ a besoin de marqueurs biologiques à période courte, principalement du fluor-18 (1,83 h) et du carbone-11 (20,4 m). La fabrication de ces marqueurs à vie courte est réalisée grâce avec un cyclotron. La synthèse des traceurs marqués par l'un de ces radionucléides est réalisée à l'aide d'automates de synthèse positionnés dans des enceintes blindées en zone de radiochimie.

Malgré les systèmes de filtration et les lignes retard mis en place, ces opérations de production émettent des rejets gazeux dans l'environnement depuis un émissaire situé sur le toit du SHFJ. Les rejets annuels en  $^{11}\text{C}$  varient entre 1 et 2 TBq ; les rejets en  $^{18}\text{F}$  représentent selon les années, entre 4 et 12% de l'activité totale. De l'argon-41 (1,83 h) est également rejeté mais actuellement en quantité très inférieure aux rejets de  $^{11}\text{C}$  et  $^{18}\text{F}$  (environ  $5.10^8$  Bq/an, soit 2000 fois moins que les rejets de  $^{11}\text{C}$ ), de telle sorte que sa contribution pour l'évaluation de l'impact est négligée car très faible.

En médecine nucléaire, les examens de ventilation pulmonaire effectués sur les patients émettent des radioéléments dans l'air (6,02 h). Ces aérosols sont repris par la ventilation du laboratoire, filtrés et rejetés à l'extérieur via un émissaire. L'activité moyenne rejetée par examen est de l'ordre de 1 MBq.



Le tableau 1 indique le nombre de rejets et l'activité totale rejetée annuellement

Tableau 1 : Nombre de rejets et activité totale rejetée (en Bq/an)

Année	émissaire « cyclotron-radiochimie »				émissaire « médecine nucléaire »	
	Carbone 11		Fluor 18		Technétium 99m	
	Activité totale	Nombre de rejets	Activité totale	Nombre de rejets	Activité totale	Nombre de rejets
2010	1,07E+12	305	9,80E+10	164	8,85E+07	87
2011	8,81E+11	263	7,60E+10	151	4,94E+08	169
2012	1,18E+12	233	6,28E+10	225	1,37E+08	171
2013	1,03E+12	222	3,82E+10	200	2,29E+08	146
2014	2,03E+12	208	2,66E+11	296	4,11E+08	99
2015	1,17E+12	248	1,18E+11	235	6,99E+07	30
2016	1,89E+12	369	7,31E+10	220		

### 2.1.2 - Rejet incidentel (bouffée)

Seule une défaillance au niveau d'un automate de radiosynthèse en radiochimie est envisagée car c'est le scénario le plus probable qui conduirait à l'impact le plus important.

La nouvelle autorisation permet de porter l'activité de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$ , présente dans les nouvelles enceintes blindées à 185 GBq, ce qui correspond à l'activité maximale produite par irradiation d'une cible du cyclotron. C'est cette dernière valeur qui est retenue pour l'étude d'impact pour le  $^{11}\text{C}$  produit sous forme gazeuse. Pour le  $^{18}\text{F}$ , produit sous forme liquide, seulement 111GBq au maximum sont susceptibles d'être rejetés.

### 2.1.3 - Rejet accidentel (incendie généralisé)

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 l'installation est rejetée dans l'environnement sans rétention ni filtration.

L'activité maximale supposée mobilisable est le cumul de celles indiquées dans les deux autorisations ASN (autorisations E15003 et M91003) et est renseignée Tableau 2.

Certains des radionucléides concernés (recensés par un astérisque dans le Tableau 2) sont dans des sources scellées et donc difficilement mobilisables, même en cas d'incendie. C'est pourquoi on évalue également l'impact consécutif à l'émission des radionucléides sous forme non scellée.

De plus, en cas d'incendie, un certain nombre de radionucléides, sont issus de l'activation des structures de l'accélérateur, et pourraient être mis en suspension (présence dans des résines de filtration et de façon résiduelle dans les liquides de nettoyage des automates et de récupération de l'eau irradiée).

Les principaux radionucléides sont  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{109}\text{Cd}/^{109\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}/^{110}\text{Ag}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  et  $^{22}\text{Na}$ . L'impact du rejet de 1 Bq de chacun des radionucléides est quantifié.

Tableau 2 : Terme source sur la base des valeurs demandées d'activités maximales autorisées dans l'installation.

Radionucléide	Activité mobilisable (en Bq)	Radionucléide	Activité mobilisable (en Bq)
Cs137 *	1,5E+09	Na22 *	5,0E+07
Sr90 *	1,0E+04	Ga67	5,0E+09
Ge68 */**	4,05E+09	In111	5,0E+09
Ga68	4,0E+09	C11 ***	1,5E+11
C14	2,0E+08	F18 ***	3,92E+11
I131	3,7E+09	H3 (HTO)	1,0E+11
P32	0	N13	3,7E+09
Mo99 (Tc99m) *	9,2E+10	O15	1,0E+09
Zr89	1,5E+09	I123	5,0E+09
Ba133 *	5,0E+07	Tc99m	8,1E+10
Co57 *	1,4E+09	Tl201	5,0E+09
Eu152 *	1,0E+04		

\* Radionucléide difficilement mobilisable

\*\* Comprend les sources scellées y compris celle contenue dans les générateurs de <sup>68</sup>Ga

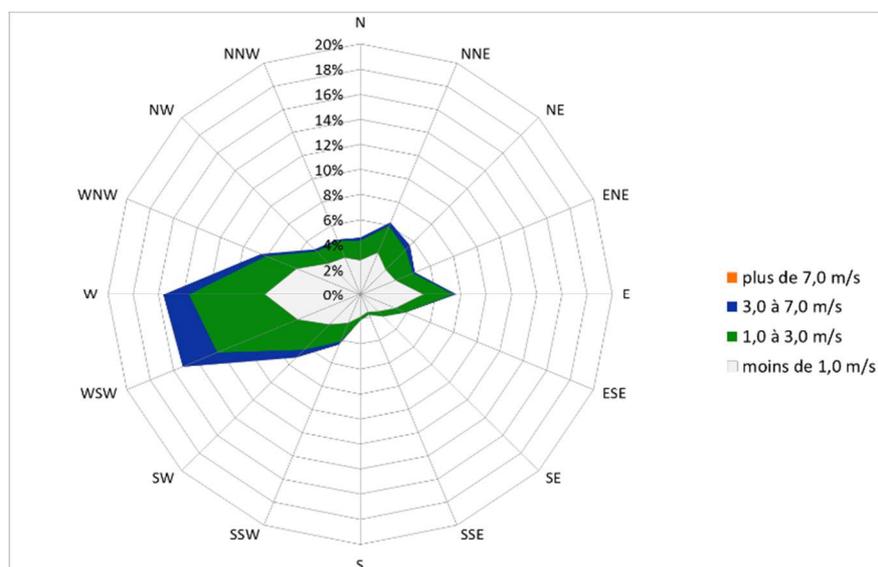
\*\*\* Comprend les sources non scellées approvisionnées pour la médecine nucléaire plus 500GBq en cumul <sup>18</sup>F et <sup>11</sup>C avec un maximum de 370GBq en <sup>18</sup>F et le complément en <sup>11</sup>C

## 2.2 - DONNEES METEOROLOGIQUES

Une station météorologique professionnelle est implantée sur le toit du SHFJ et mesure en continu la température, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, l'humidité de l'air et la quantité de précipitations. Ces données, ainsi qu'un certain nombre de grandeurs dérivées comme le point de rosée par exemple, sont enregistrées toutes les trente minutes.

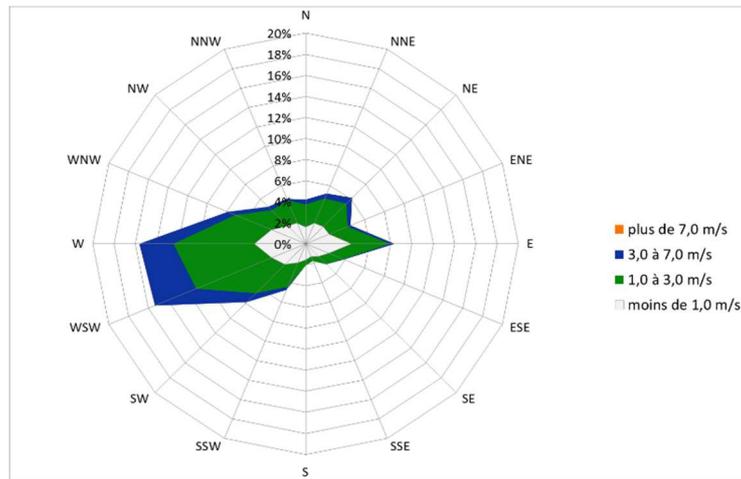
La Figure 1 montre la rose des vents calculée pour cette station sur une période de quatre ans couvrant les années 2013 à 2016

Figure 1 : Rose des vents pour la période 2013-2016.



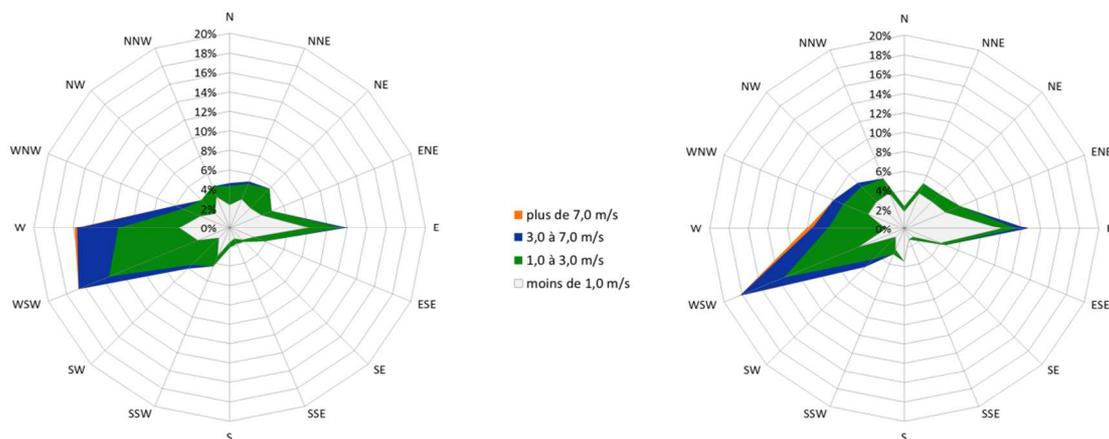
Les synthèses de radiochimie et les rejets qui en résultent ont lieu exclusivement en heures ouvrées, entre 8 et 18 heures. La rose des vents calculée sur ce créneau horaire pour la période 2013-2016 est présentée à la Figure 2. Les directions principales d'origine du vent et les occurrences associées sont identiques par rapport à la rose des vents globale calculée sur toute la journée. Les vitesses observées sont plus élevées.

Figure 2 : Rose des vents des situations diurnes (8h-18h) pour la période 2013-2016



On dispose pour chacun des rejets de l'année 2016 de la date et de l'heure à laquelle ils ont eu lieu ce qui permet de construire les roses des vents qui regroupent les conditions météorologiques qui prévalaient lorsque ces rejets ont eu lieu (cf. Figure 3).

Figure 3 : Roses des vents relatives aux périodes de rejet de  $^{11}\text{C}$  (illustration de gauche) et de  $^{18}\text{F}$  (illustration de droite) en 2016.



### 3 - METHODOLOGIE ET HYPOTHESES DE CALCUL

#### 3.1 - CHOIX DU SYSTEME DE MODELISATION

Le SHFJ a 2 émissaires : l'émissaire de la partie cyclotron-radiochimie et l'émissaire de la médecine nucléaire. Le SHFJ 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 25 m environ de l'émissaire « cyclotron-radiochimie ». Les données topographiques utilisées proviennent du produit RGE ALTI® de l'IGN (Institut Géographique National). La description du bâti urbain provient du produit BD TOPO® de l'IGN.

### 3.2 - DEMARCHE CHOISIE POUR LE CALCUL DE L'IMPACT DES REJETS

Les rejets en fonctionnement normal du SHFJ sont subchroniques (quelques centaines de rejets par an). 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 à la date et l'heure auxquelles il est effectué et un calcul d'écoulement et de dispersion est effectué pour ce couple terme source rejeté / condition météorologique. L'impact annuel est évalué en sommant les contributions de chaque rejet.

La station météorologique renvoie des valeurs discrètes pour la direction et la vitesse du vent. En pratique, et pour éviter de multiplier le nombre de simulations à réaliser, on choisit d'effectuer un calcul d'écoulement et de dispersion par valeur de vitesse ainsi que par valeur de direction, pour un rejet unitaire.

Pour évaluer l'impact de l'année 2016, un simple 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 d'une année quelconque, la difficulté vient de la méconnaissance *a priori* des conditions météorologiques qu'il faut associer à l'ensemble des rejets dont on veut évaluer l'impact.

On y répond avec une approche statistique, c'est-à-dire que si on souhaite évaluer l'impact d'un jeu de N rejets courts étalés sur une année quelconque, on va tirer au sort, de manière aléatoire à l'intérieur de la rose des vents, K groupes de N conditions météorologiques et évaluer l'impact pour chacun de ces K groupes en suivant la méthodologie décrite ci-dessus, employée pour traiter l'année 2016. On obtient alors, pour une année quelconque, K évaluations de l'impact correspondant à K jeux de 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.

### 3.3 - OPTIONS DE CALCUL RETENUES

#### 3.3.1 - Météorologie à micro-échelle

Les calculs d'écoulement avec le modèle PNSWIFT sont effectués pour chaque condition météorologique possible, c'est-à-dire pour chaque couple (vitesse du vent ; direction du vent) donné par la station météorologique. Concrètement, dans le fichier météorologique regroupant les données d'entrée à prendre en compte pour le calcul PNSWIFT, on impose la vitesse et la direction du vent à l'endroit où se situe la station météorologique, c'est-à-dire sur le toit du SHFJ.

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 par la station météorologique à une hauteur de 2 m par rapport au sol et une vitesse égale à celle de la station météorologique au-dessus de la canopée urbaine et jusqu'au sommet de la grille de calcul.

La station météorologique ne donne qu'une valeur ponctuelle de température et ne fournit pas d'informations sur le profil vertical de température. On choisit de définir un profil de température avec un gradient vertical égal à  $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , correspondant à une atmosphère neutre à légèrement instable.

Dans PNSWIFT, la turbulence est calculée à l'aide de paramétrisations comme la somme d'une turbulence de fond, déduite de la stabilité atmosphérique et donc dépendant en partie du profil de température, 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.

De plus, on a choisi également d'activer l'option de la prise en compte de la conservation de la quantité de mouvement, récemment ajoutée dans le modèle PNSWIFT, qui produit une turbulence locale plus réaliste que lorsque cette option n'est pas activée, car le cisaillement calculé, est déduit d'un champ de vent où, à la fois, la masse et la quantité de mouvement sont conservées et non d'un champ de vent où seule la conservation de la masse est satisfaite.

### 3.3.2 - Dispersion atmosphérique et évaluation des doses

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. 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 (20,4 minutes), simulant  $^{11}\text{C}$ ,
- Un aérosol radioactif (1,83 heures), simulant  $^{18}\text{F}$ ,
- Un aérosol radioactif (6,02 heures) de diamètre aérodynamique égal à  $1\ \mu\text{m}$ , simulant  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,

On considère deux sources d'émission :

- Une source ponctuelle, de coordonnées représentant l'émissaire « cyclotron-radiochimie », depuis lequel sont émis  $^{11}\text{C}$  et  $^{18}\text{F}$ .
- Une source ponctuelle, de coordonnées représentant l'émissaire « médecine nucléaire », depuis lequel est émis  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

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 :

$$H_{\text{inh}}(I, J, K) = \left( \sum_{\text{RN}_i=\text{RN}_1}^{\text{RN}_i=\text{RN}_N} \bar{C}^{\text{RN}_i}(I, J, K) \cdot \Delta t \cdot \frac{\tau_{\text{resp}}}{3600} \cdot f_{\text{inh}}^{\text{RN}_i} \cdot 1000 \right)$$

avec :	$H_{\text{inh}}$	Dose par inhalation (en mSv)
	$\bar{C}^{\text{RN}_i}$	Concentration moyenne calculée par PSPRAY pour le radionucléide $\text{RN}_i$ (en $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )
	$\Delta t$	Durée sur laquelle la concentration est moyennée (en s)
	$\tau_{\text{resp}}$	Débit respiratoire (en $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )
	3600	Coefficient de conversion (en $\text{s}\cdot\text{h}^{-1}$ )
	$f_{\text{inh}}^{\text{RN}_i}$	Coefficient de dose efficace par inhalation de $\text{RN}_i$ (en $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ )
	1000	Coefficient de conversion (en $\text{mSv}\cdot\text{Sv}^{-1}$ )

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 :

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

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

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 :

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

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

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 1 an ou plus précisément 8766 h dans cette étude) 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 (en mSv)  
 $\tau^{RN_i}$  Période de décroissance radioactive du radionucléide  $RN_i$  (en h)  
T Durée d'exposition (en h)  
 $DD_{\text{irr dép}}^{RN_i}$  Débit de dose par irradiation externe due aux dépôts au sol pour le radionucléide  $RN_i$  (en mSv/h)

Les coefficients de dose efficace par inhalation sont ceux indiqués dans l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre de 2003. Les coefficients de dose par exposition externe proviennent du Federal Guidance n°12.

### 3.3.3 - Prise en compte du facteur pluie

Sur la période 2013-2016, la station météorologique située sur le toit du SHFJ, a enregistré 4233 occurrences de situations pluvieuses pour un cumul total de précipitations de 2307,2 mm. Compte-tenu du taux de disponibilité des données de la station entre 2013 et 2016 (96,3%), cela donne un taux de situations météorologiques avec pluie de 6,1%. La rose des vents de ces situations météorologiques avec pluie est présentée à la figure suivante. On observe que lorsqu'il pleut, les vents provenant du Sud-Sud-Ouest, de l'Ouest et du Sud-Ouest sont les plus probables, avec des vitesses comprises entre 1 et 3 m/s. Pour l'évaluation de l'impact d'un rejet incidentel de F18 lors d'événements pluvieux, on réalise des simulations pour ces trois directions d'origines du vent et huit classes de vitesse du vent, de 0,9 m/s à 4,0 m/s. Ces vingt-quatre situations météorologiques représentent près de 50% des situations pluvieuses.

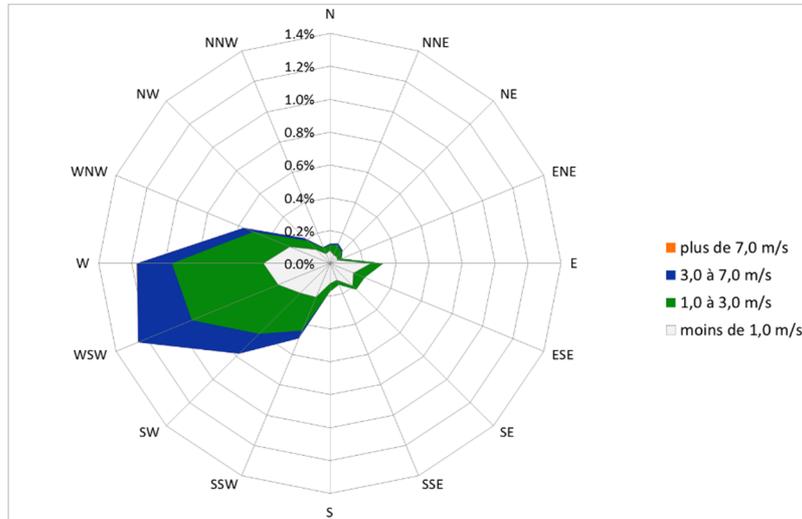


Figure 6 : Rose des vents par temps de pluie pour la période 2013-2016

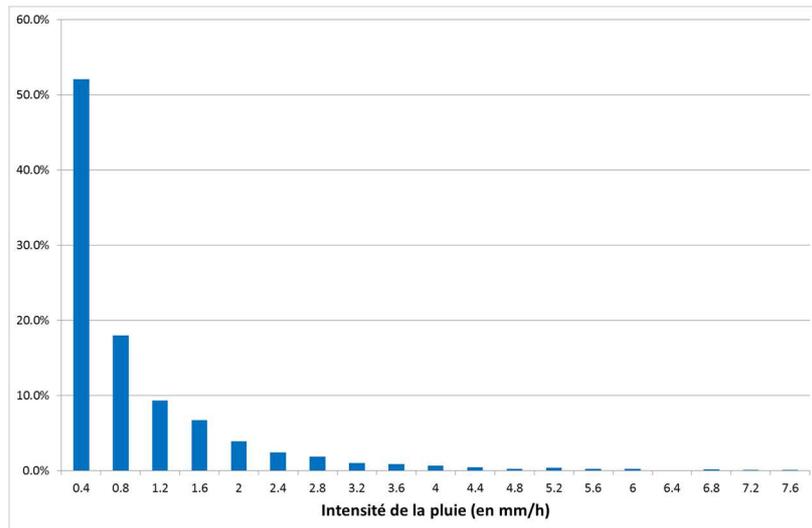


Figure 7 : Répartition de l'intensité des pluies

L'histogramme de la Figure 7 présente la répartition de l'intensité des pluies mesurées à la station météorologique et montre que 90% des occurrences correspondent à des pluies d'intensité inférieures ou égales à 2 mm/h.

La formule empirique suivante, issue du rapport de Doury [i], permet d'évaluer le taux de lavage pour des particules de diamètre aérodynamique supérieur à 1,2 µm et des intensités de pluie de 0,1 à 100 mm/h :

$$\Lambda = 1,2 \times 10^{(-2,9 G^{-1,2} - 3,3)} \left( 0,25 G^{-0,77} + 0,74 \right)$$

$$G = d_{ar} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ar}}{\rho_f}}$$

avec :

- $\Lambda$  taux de lavage de la classe granulométrique, en  $s^{-1}$ ,
- $G$  diamètre aérodynamique médian représentatif de la classe granulométrique, en  $\mu m$ ,
- $d_{ar}$  diamètre physique médian de la classe granulométrique, en  $\mu m$ ,
- $\rho_{ar}$  masse volumique de l'aérosol, en  $kg.m^{-3}$ ,



- $\rho_f$  masse volumique de l'eau en  $\text{kg.m}^{-3}$ ,
- $I$  intensité de la pluie traversée par la bouffée, en  $\text{mm.h}^{-1}$ .

Selon cette relation, le taux de lavage croît lorsque l'intensité de la pluie croît. Dans les calculs, on impose une pluie de 2 mm/h pour avoir un taux de lavage et donc un dépôt au sol qui soit majorant pour plus de 90% des situations pluvieuses réelles. Pour une taille d'aérosol égale à  $1,2 \mu\text{m}$  et une pluie d'intensité égale à 2 mm/h, cette formule donne un taux de lavage de  $3,24.10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . C'est cette valeur que l'on retient pour les simulations PSPRAY de la dispersion atmosphérique.

Le dépôt au sol maximal calculé pour l'ensemble des 24 conditions météorologiques pluvieuses considérées, est le cumul du dépôt sec et du dépôt dû à la pluie.

Ces considérations ne sont prises en compte que dans le scénario de rejet incidentel (chapitre 5.3).

### 3.3.4 - Impact pour les enfants

Les voies d'exposition considérées dans cette étude sont l'inhalation et l'exposition par irradiation externe due, soit à l'immersion dans le panache soit à la présence de dépôt au sol. Pour l'exposition par irradiation externe, il n'existe pas de distinction entre l'adulte et l'enfant dans la définition des coefficients de dose. Ainsi, les doses par irradiation externe calculées pour l'adulte dans l'étude initiale s'appliquent également pour l'enfant.

En ce qui concerne l'exposition par inhalation, le tableau ci-dessous présente les coefficients de dose respectivement pour le bébé de 3 mois, l'enfant de 1 an et l'enfant de 10 ans issus de l'arrêté de 2003. Les débits respiratoires considérés pour le cas du fonctionnement normal et accidentel ont été précisés au chapitre 3.3.2.

Dans la suite de l'étude, on présente uniquement l'évaluation de dose la plus pénalisante entre le bébé de 3 mois, l'enfant de 1 an et l'enfant de 10 ans.

#### Coefficients de dose par inhalation pour les enfants



Radionucléide	Coefficient de dose par inhalation (en Sv/Bq) et classe de solubilité associée		
	Bébé (3 mois)	Enfant (1 an)	Enfant (10 ans)
<sup>3</sup> H (12,3y)	6,4.10 <sup>-11</sup> (liq)	4,8.10 <sup>-11</sup> (liq)	2,3.10 <sup>-11</sup> (liq)
<sup>7</sup> Be (53,22d)	2,8.10 <sup>-10</sup> (S)	2,4.10 <sup>-10</sup> (S)	9,6.10 <sup>-11</sup> (S)
<sup>11</sup> C (20,37m)	1,8.10 <sup>-11</sup> (gaz)	1,2.10 <sup>-11</sup> (gaz)	4,1.10 <sup>-12</sup> (gaz)
<sup>14</sup> C (5700y)	1,9.10 <sup>-8</sup> (S)	1,7.10 <sup>-8</sup> (S)	7,4.10 <sup>-9</sup> (S)
<sup>18</sup> F (1,83h)	4,1.10 <sup>-10</sup> (M)	2,9.10 <sup>-10</sup> (M)	9,7.10 <sup>-11</sup> (M)
<sup>22</sup> Na (2,6y)	9,7.10 <sup>-9</sup> (F)	7,3.10 <sup>-9</sup> (F)	2,4.10 <sup>-9</sup> (F)
<sup>51</sup> Cr (27,7d)	2,6.10 <sup>-10</sup> (S)	2,1.10 <sup>-10</sup> (S)	6,6.10 <sup>-11</sup> (S)
<sup>54</sup> Mn (312,1d)	7,5.10 <sup>-9</sup> (M)	6,2.10 <sup>-9</sup> (M)	2,4.10 <sup>-9</sup> (M)
<sup>55</sup> Fe (2,735y)	1,9.10 <sup>-9</sup> (M)	1,4.10 <sup>-9</sup> (M)	6,2.10 <sup>-10</sup> (M)
<sup>56</sup> Co (77,3d)	2,8.10 <sup>-8</sup> (S)	2,5.10 <sup>-8</sup> (S)	1,0.10 <sup>-8</sup> (S)
<sup>57</sup> Co (271,8d)	4,4.10 <sup>-9</sup> (S)	3,7.10 <sup>-9</sup> (S)	1,5.10 <sup>-9</sup> (S)
<sup>58</sup> Co (70,86d)	9,0.10 <sup>-9</sup> (S)	7,5.10 <sup>-9</sup> (S)	3,1.10 <sup>-9</sup> (S)
<sup>60</sup> Co (5,27y)	9,2.10 <sup>-8</sup> (S)	8,6.10 <sup>-8</sup> (S)	4,0.10 <sup>-8</sup> (S)
<sup>63</sup> Ni (100,6y)	2,5.10 <sup>-9</sup> (M)	1,9.10 <sup>-9</sup> (M)	7,0.10 <sup>-10</sup> (M)
<sup>67</sup> Ga (3,26d)	1,4.10 <sup>-9</sup> (M)	1,0.10 <sup>-9</sup> (M)	3,6.10 <sup>-10</sup> (M)
<sup>68</sup> Ga (1,127h)	4,6.10 <sup>-10</sup> (M)	3,1.10 <sup>-10</sup> (M)	9,2.10 <sup>-11</sup> (M)
<sup>68</sup> Ge (270,9d)	6,0.10 <sup>-8</sup> (M)	5,0.10 <sup>-8</sup> (M)	2,0.10 <sup>-8</sup> (M)
<sup>90</sup> Sr (28,79y)	1,5.10 <sup>-7</sup> (M)	1,1.10 <sup>-7</sup> (M)	5,1.10 <sup>-8</sup> (M)
<sup>89</sup> Zr/ <sup>89m</sup> Y (3,267d/15,7s)	3,7.10 <sup>-9</sup> (M)	2,8.10 <sup>-9</sup> (M)	9,6.10 <sup>-10</sup> (M)
<sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc (2,747d/6,01h)	7,01.10 <sup>-9</sup> (S)	4,89.10 <sup>-9</sup> (S)	1,73.10 <sup>-9</sup> (S)
<sup>99m</sup> Tc (6,01h)	1,3.10 <sup>-10</sup> (M)	9,9.10 <sup>-11</sup> (M)	3,4.10 <sup>-11</sup> (M)
<sup>109</sup> Cd/ <sup>109m</sup> Ag (1,26y/39,7s)	2,7.10 <sup>-8</sup> (S)	2,1.10 <sup>-8</sup> (S)	8,9.10 <sup>-9</sup> (S)
<sup>110m</sup> Ag/ <sup>110</sup> Ag (249,8d/24,56s)	4,6.10 <sup>-8</sup> (S)	4,1.10 <sup>-8</sup> (S)	1,8.10 <sup>-8</sup> (S)
<sup>111</sup> In (2,8d)	1,5.10 <sup>-9</sup> (M)	1,2.10 <sup>-9</sup> (M)	4,1.10 <sup>-10</sup> (M)
<sup>123</sup> I (13,2h)	8,7.10 <sup>-10</sup> (F)	7,9.10 <sup>-10</sup> (F)	1,8.10 <sup>-10</sup> (F)
<sup>131</sup> I (8,02d)	7,2.10 <sup>-8</sup> (F)	7,2.10 <sup>-8</sup> (F)	1,9.10 <sup>-8</sup> (F)
<sup>133</sup> Ba (1,54y)	1,5.10 <sup>-8</sup> (M)	1,0.10 <sup>-8</sup> (M)	5,1.10 <sup>-9</sup> (M)
<sup>134</sup> Cs (2,06y)	1,1.10 <sup>-8</sup> (F)	7,3.10 <sup>-9</sup> (F)	5,3.10 <sup>-9</sup> (F)
<sup>137</sup> Cs/ <sup>137m</sup> Ba (30,04y/2,55m)	8,8.10 <sup>-9</sup> (F)	5,4.10 <sup>-9</sup> (F)	3,7.10 <sup>-9</sup> (F)
<sup>152</sup> Eu (13,5y)	1,1.10 <sup>-7</sup> (M)	1,0.10 <sup>-7</sup> (M)	4,9.10 <sup>-8</sup> (M)
<sup>201</sup> Tl (3,04d)	4,5.10 <sup>-10</sup> (F)	3,3.10 <sup>-10</sup> (F)	9,4.10 <sup>-11</sup> (F)

#### 4 - RESULTAT DES CALCULS UNITAIRES DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE

##### 4.1 - CALCULS UNITAIRES DEPUIS L'EMISSAIRE « CYCLOTRON-RADIOCHIMIE »

Le 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 « cyclotron-radiochimie ».

Pour un vent quasi-nul (0,1 m/s) soufflant du nord, la valeur maximale du coefficient de transfert atmosphérique à proximité du sol s'élève à  $2 \cdot 10^{-3} s/m^3$ , à une centaine de mètres environ au sud du SHFJ. Toutes conditions météorologiques confondues, le coefficient de transfert atmosphérique maximal s'élève à 0,043  $s/m^3$ , et est obtenu à une centaine de mètres environ au sud du SHFJ et correspond à un vent soufflant du nord-nord-ouest à une vitesse de 1,8 m/s.

##### 4.2 - CALCULS UNITAIRES DEPUIS L'EMISSAIRE « MEDECINE NUCLEAIRE »

Le coefficient de transfert atmosphérique maximal (ou le taux de dilution minimal) est plus important et est observé à une distance plus proche de l'émissaire que dans le cas des rejets depuis l'émissaire « cyclotron-radiochimie », pour une condition météorologique donnée.

L'émissaire « médecine nucléaire » est situé à une hauteur inférieure à celle de l'émissaire « cyclotron-radiochimie » et ses rejets sont soumis à une influence plus importante des bâtiments l'entourant.

##### 4.3 - CALCULS UNITAIRES EN CAS D'INCENDIE GENERALISE

En cas d'incendie, les rejets ne sont plus effectués en hauteur, au-dessus des toits des bâtiments, mais au niveau des différentes ouvertures (portes, fenêtres) du bâtiment 830. C'est au niveau de ces zones de rejet, autour du bâtiment 830, que le coefficient de transfert atmosphérique est le plus important.

#### 5 - RESULTATS DE L'EVALUATION DES DOSES

##### 5.1 - FONCTIONNEMENT NORMAL POUR L'ANNEE 2016

L'évaluation des doses pour les rejets en fonctionnement normal de  $^{11}C$  et de  $^{18}F$  est effectuée en sommant les contributions de chacun des 369 rejets de  $^{11}C$  et des 220 rejets de  $^{18}F$  de l'année 2016.

Ces valeurs sont à rapprocher de la valeur limite de dose pour le public (1 mSv).

- La dose par inhalation consécutive aux rejets de  $^{11}C$  vaut au maximum 0,9  $\mu Sv$ , à une centaine de mètres au sud du SHFJ. Elle dépasse 0,1  $\mu Sv$  uniquement à la proximité des bâtiments, là où les conditions météorologiques peuvent produire des zones de faible circulation à cause d'effets de déventement. La dose maximale par irradiation externe due au passage du panache pour les rejets de  $^{11}C$  s'élève à 77  $\mu Sv$ , au même endroit que le maximum observé pour la dose par inhalation. Elle dépasse 10  $\mu Sv$  le long de la façade ouest du Centre Hospitalier d'Orsay mais est de l'ordre de 0,1  $\mu Sv$  le long de sa façade est.
- La dose maximale par inhalation pour les rejets de  $^{18}F$  et la dose par irradiation externe due au passage du panache sont atteintes à une centaine de mètres au sud-sud-ouest du point de rejet (mais pas au même endroit que pour le  $^{11}C$ ) et valent 1,2  $\mu Sv$  pour la dose par inhalation et 3,9  $\mu Sv$  pour la dose par irradiation externe.



L'évaluation des doses est également effectuée pour le bébé de 3 mois, l'enfant de 1 an et l'enfant de 10 ans. La dose par inhalation s'élève au maximum à 2,2  $\mu\text{Sv}$  alors que la dose efficace totale s'élève au maximum à 79  $\mu\text{Sv}$ . Par rapport à l'adulte, la dose pour l'enfant de 1 an est supérieure de 1% environ.

Pour l'année 2016, la dose maximale vaut 78  $\mu\text{Sv}$  pour l'adulte et 79  $\mu\text{Sv}$  pour l'enfant. Elle est atteinte à une centaine de mètres au sud du SHFJ. Cette valeur à proximité du sol est maximale par rapport aux valeurs obtenues à des hauteurs supérieures.

Les zones où la dose efficace totale est supérieure à 10  $\mu\text{Sv}$  (1/100<sup>ème</sup> de la dose admissible pour la population) se limitent aux abords de certains bâtiments situés dans un rayon de 400 m autour du SHFJ. La superficie totale cumulée ces petites zones n'excède pas quelques centaines de mètres carrés.

La dose maximale de 78  $\mu\text{Sv}$  est largement pénalisante, dans la mesure où :

- La voie d'exposition prépondérante pour ces rejets de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  est l'exposition par irradiation externe due au passage du panache ;
- Cette exposition externe est calculée comme étant le produit de la concentration intégrée par un coefficient de dose par irradiation externe ;
- Le coefficient de dose par irradiation externe a été évalué en supposant un milieu infini et une concentration en radionucléides uniformément répartie ;
- En réalité, le champ de concentration intégrée est loin d'être uniforme et, lorsqu'on fait le calcul en un point correspondant à un maximum local dans la répartition spatiale de la concentration intégrée, on surestime largement la dose calculée en ce point en effet, dès que l'on s'éloigne de ce point de quelques mètres, la concentration intégrée est inférieure d'un facteur 3 à 4.

Un calcul détaillé de l'exposition par irradiation externe tenant compte des obstacles (effets d'ombrage) et de la répartition spatiale réelle du panache a été effectué pour les rejets de l'année 2016 :

- La dose maximale par irradiation externe due au passage du panache pour les rejets de  $^{11}\text{C}$  est observée à proximité immédiate du SHFJ, entre le bâtiment 830 et la ligne RER et vaut 6,2  $\mu\text{Sv}$ . C'est la partie du panache située à la sortie de la cheminée, c'est-à-dire la plus concentrée, qui fait que la dose maximale se situe à cet endroit.

Au point où le calcul de la dose par irradiation externe avec la méthode du coefficient de dose donnait une valeur de 77  $\mu\text{Sv}$ , la dose calculée est inférieure à 1  $\mu\text{Sv}$ . Ce point est entouré de bâtiments et l'ombrage qu'ils apportent atténue l'exposition par irradiation externe.

- La dose maximale par irradiation externe due au passage du panache pour les rejets de  $^{18}\text{F}$  est observée à proximité immédiate du SHFJ, entre le bâtiment 830 et la ligne RER et vaut 0,3  $\mu\text{Sv}$ . Par comparaison, la dose maximale obtenue avec le modèle du coefficient de dose vaut 3,9  $\mu\text{Sv}$  à une centaine de mètres au sud-sud-ouest du point de rejet.

La dose efficace totale, somme de la dose par inhalation et de la dose par irradiation externe pour les rejets de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  vaut 6,5  $\mu\text{Sv}$  et elle est atteinte à quelques mètres du SHFJ, entre le bâtiment 830 et la ligne RER. L'utilisation de ce module pour calculer la dose par irradiation externe a pour conséquence de diminuer la valeur maximale de la dose efficace, d'un facteur 10 environ.



## 5.2 - FONCTIONNEMENT NORMAL POUR UNE ANNEE QUELCONQUE SUR LA BASE DES LIMITES DE REJETS ACTUELLES

### 5.2.1 - Cas où les doses sont évaluées à l'aide de coefficients de dose.

L'évaluation de l'impact des rejets en fonctionnement normal pour une année type est effectuée sur la base de la limite fixée par l'autorisation de rejet. Celle-ci s'élève à 3,25 TBq. La répartition imposée par l'autorisation ASN est de 3 TBq pour le  $^{11}\text{C}$  et 0,25 TBq pour le  $^{18}\text{F}$ .

Les dernières années indiquent aussi un nombre annuel de rejets de  $^{11}\text{C}$  compris entre 200 et 370 et un nombre annuel de rejets de  $^{18}\text{F}$  compris entre 150 et 300. Parmi ces rejets, on dénombre un petit nombre de rejets (bouffées incidentelles) où la quantité rejetée est largement supérieure à celle des autres rejets. Pour notre année type, on choisit de répartir :

- Les 3 TBq de  $^{11}\text{C}$  en 5 rejets de 75 GBq et 195 rejets de 13,5 GBq
- Les 0,25 TBq de  $^{18}\text{F}$  en 5 rejets de 8,5 GBq et 145 rejets de 1,4 GBq.

On applique ensuite la méthodologie décrite à la section 3.2 - pour réaliser l'évaluation de l'impact radiologique. Concrètement, on construit deux jeux de respectivement 200 (correspondant aux rejets de  $^{11}\text{C}$  à simuler) et 150 (correspondant aux rejets de  $^{18}\text{F}$  à simuler) situations météorologiques en les tirant au sort de manière aléatoire dans la rose des vents de la Figure 2, c'est-à-dire en respectant les occurrences de chaque condition météorologique. On calcule ensuite la dose efficace totale consécutive à ces 200 + 150 = 350 rejets. On recommence l'opération un grand nombre de fois (ici 2000), en tirant au sort à chaque fois deux nouveaux jeux de situations météorologiques.

Avec cette base de données de 2000 évaluations de l'impact, on dispose, en chaque point du domaine de calcul et pour un rejet annuel situé à la limite de l'autorisation de rejet, d'une distribution composée de 2000 évaluations de la dose efficace correspondant à 2000 jeux différents de conditions météorologiques.

Retenir le 99<sup>ème</sup> centile de cette distribution revient à considérer comme seuil une valeur de dose telle que, dans 99% des cas, l'évaluation de l'impact des rejets normaux annuels conduira à une valeur de dose inférieure à ce seuil. Cela revient également à considérer cette dose comme correspondant à des conditions météorologiques particulièrement pénalisantes en termes d'impact radiologique.

Pour les conditions météorologiques les plus défavorables, la dose efficace totale consécutive aux rejets de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  d'une année type vaut au maximum 0,47 mSv à une centaine de mètres au sud du SHFJ.

L'impact réel est surévalué dans la mesure où, à l'image de ce qui a été obtenu pour l'évaluation de l'impact des rejets de l'année 2016, un calcul plus réaliste de la dose par irradiation externe à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement, conduirait certainement à une dose maximale très inférieure à la dose maximale présentée dans cette section. Cette réévaluation de l'impact est proposée à la section suivante.

La zone où le 99<sup>ème</sup> centile de la dose efficace totale, consécutive aux rejets de  $^{11}\text{C}$  et  $^{18}\text{F}$ , dépasse la valeur de 0,1 mSv (1/10<sup>ème</sup> de la valeur limite de dose admissible pour la population), s'étend sur à peine quelques dizaines de mètres carrés,

La zone où le 99<sup>ème</sup> centile de la dose efficace totale consécutive aux rejets d'une année type dépasse la valeur de 10  $\mu\text{Sv}$  (1/100<sup>ème</sup> de la valeur limite de dose admissible pour la population) s'étend sur une surface plus grande jusqu'à une distance supérieure à 500 m de l'émissaire « cyclotron-radiochimie ».



Si on avait considéré les rejets de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  comme des rejets chroniques, c'est-à-dire des rejets constants et continus sur la période considérée (de 8 à 18 heures tous les jours de l'année), la dose efficace maximale en moyenne serait de **206,7  $\mu\text{Sv}$**  à une centaine de mètres au sud du SHFJ.

L'évaluation des doses est également effectuée pour le bébé de 3 mois, l'enfant de 1 an et l'enfant de 10 ans. Dans ce cas, c'est l'exposition calculée pour l'enfant de 1 an qui est la plus pénalisante. La dose efficace totale s'élève au maximum à **209,8  $\mu\text{Sv}$** . Par rapport à l'adulte, la dose pour l'enfant de 1 an est supérieure de 1,5% environ (206,7  $\mu\text{Sv}$  pour l'adulte).

L'impact des rejets de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  depuis l'émissaire « médecine nucléaire » a aussi été évalué pour une année type, en considérant un rejet cumulé annuel de 1 GBq, réparti en 30 rejets ponctuels et égaux.

On applique la même méthodologie que pour les rejets de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  d'une année type, en effectuant 2000 évaluations de doses pour ces 30 rejets en leur associant à chaque fois un jeu différent de 30 conditions météorologiques tirées aléatoirement dans la rose des vents. Du fait du nombre plancher choisi de 30 rejets, les quantiles élevés des distributions obtenues donnent une estimation pénalisante de la dose efficace totale.

Dans ces conditions, la valeur maximale atteinte pour la dose efficace due au rejet annuel de 1 GBq de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , est de 0,2  $\mu\text{Sv}$ . Cette valeur est inférieure d'un facteur 1000 environ à la dose maximale consécutive aux rejets normaux de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  et confirme que la contribution à la dose des rejets de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  peut être négligée.

### 5.2.2 - Cas où la dose par irradiation externe est évaluée à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement

L'utilisation des coefficients de dose par irradiation externe pour l'évaluation de l'impact conduit à surévaluer l'impact au point où il est maximal dans la mesure où l'utilisation des coefficients de dose suppose une atmosphère contaminée uniformément dans un rayon de quelques centaines de mètres autour du point calculé, ce qui n'est pas vérifié pour les simulations de dispersion atmosphérique effectuées dans le cadre de cette étude. On effectue donc un calcul plus réaliste de la dose par irradiation externe.

La répartition spatiale du 99<sup>ème</sup> centile des distributions de la dose efficace consécutive aux rejets de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  d'une année type, qui correspond aux conditions météorologiques les plus défavorables, montre que la dose efficace totale consécutive aux rejets d'une année type vaut au maximum 21  $\mu\text{Sv}$  à une centaine de mètres au sud du SHFJ.

Comparée avec la méthode de calcul utilisant les coefficients de dose, la valeur maximale de dose est environ 20 fois plus faible mais le champ de dose est plus homogène (la valeur minimale est à environ 1  $\mu\text{Sv}$  contre 0,1  $\mu\text{Sv}$ ) signe que c'est bien l'irradiation externe, par son action à distance, qui est la voie principale d'exposition. Quelle que soit la méthode de calcul, les doses obtenues sont très faibles. La zone où le 99<sup>ème</sup> centile de la dose efficace totale, consécutive aux rejets de  $^{11}\text{C}$  et  $^{18}\text{F}$ , dépasse la valeur de 10  $\mu\text{Sv}$  (1/100<sup>ème</sup> de la valeur limite de dose admissible pour la population), s'étend sur à peine quelques centaines de mètres carrés autour du SHFJ.

### 5.3 - REJET INCIDENTEL (BOUFFEE)

L'étude d'impact a été réalisée dans le cas d'un rejet d'une bouffée de 127 GBq de  $^{11}\text{C}$  et 127 GBq de  $^{18}\text{F}$ . Les résultats présentés en 5.3.1 et 5.3.2 sont données pour :

- Une bouffée 185 GBq de  $^{11}\text{C}$  : activité maximale qui pourrait être produite sous forme gazeuse dans une cible du cyclotron et transférée dans une enceinte blindée de radiochimie, soit 100% de l'activité produite,
- Une bouffée 111 GBq de  $^{18}\text{F}$  : estimation sur la base du retour d'expérience sur les 10 dernières années du rejet incidentel maximal pour une activité produite de 185 GBq sous forme liquide au niveau d'une cible du cyclotron et transférée dans une enceinte blindée de radiochimie, soit 60% de l'activité produite.

#### 5.3.1 - Cas où les doses sont évaluées à l'aide de coefficients de dose

Une défaillance dans le procédé de production de radiopharmaceutique peut conduire au rejet dans l'atmosphère, via l'émissaire « cyclotron-radiochimie », de la totalité de l'activité contenue dans les enceintes blindées dans le cas du  $^{11}\text{C}$ . Il est peu probable qu'une quantité équivalente en  $^{18}\text{F}$  puisse être rejetée (synthèse en phase liquide essentiellement) ; on effectue néanmoins aussi l'évaluation de l'impact en cas de rejet incidentel pour ce radionucléide car il est plus pénalisant que le carbone 11 en termes d'impact radiologique.

L'impact radiologique est, ici aussi, 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 304 conditions météorologiques pour lesquelles des calculs unitaires ont été effectués.

L'évaluation des doses, toutes conditions météorologiques confondues, dans le cas d'un rejet d'une bouffée montre que la dose efficace totale maximale est atteinte à une centaine de mètres au sud du SHFJ et vaut **0,395 mSv dans le cas du carbone 11 et 0,306 mSv dans le cas du fluor 18**.

L'évaluation des doses également effectuée pour le bébé de 3 mois, l'enfant de 1 an et l'enfant de 10 ans. C'est l'exposition calculée pour l'enfant de 1 an qui est la plus pénalisante. La dose efficace totale s'élève au maximum à **330  $\mu\text{Sv}$  pour une bouffée de 111 GBq de  $^{18}\text{F}$** . Par rapport à l'adulte, la dose pour l'enfant de 1 an est supérieure de 8% environ (la dose efficace pour l'adulte s'élève au maximum à 306  $\mu\text{Sv}$ ). Pour un rejet de **185 GBq de  $^{11}\text{C}$ , la dose est estimée à 427  $\mu\text{Sv}$** .

Lors d'événement pluvieux, le dépôt sec maximal s'élève à  $9,3 \cdot 10^{-5}$  (Bq/m<sup>2</sup>)/(Bq émis) le long de la façade ouest de l'hôpital, le dépôt pluie maximal s'élève à  $2,0 \cdot 10^{-5}$  (Bq/m<sup>2</sup>)/(Bq émis) au pied du SHFJ, à proximité de la cheminée de rejet. Si le dépôt sec au sol est proportionnel à la concentration dans l'air près du sol, le dépôt pluie, quant à lui, est proportionnel à la concentration dans la colonne d'air située au-dessus du point considéré. Ainsi, le dépôt total, somme du dépôt sec et du dépôt pluie, est maximal le long de la façade ouest de l'hôpital et s'élève à  $9,6 \cdot 10^{-5}$  (Bq/m<sup>2</sup>)/(Bq émis).

L'appauvrissement du panache par la pluie augmente à mesure qu'on s'éloigne du point de rejet, mais la comparaison des concentrations atmosphériques entre une situation météorologique avec pluie et la même situation météorologique sans pluie montre qu'il reste suffisamment faible dans le domaine d'étude choisi pour que l'on considère que la concentration atmosphérique est identique entre les deux situations météorologiques. Aussi, pour une évaluation de l'impact consécutif à un rejet incidentel de 111 GBq de F18 qui envisage aussi les situations pluvieuses les plus probables, la dose efficace maximale en chaque point du domaine d'étude est égale à la dose efficace calculée dans l'étude initiale

à laquelle on ajoute la dose par irradiation externe due au dépôt pluie. La dose par irradiation externe due au dépôt pluie maximale s'élève à 25  $\mu\text{Sv}$  au pied du SHFJ et reste supérieure à 1  $\mu\text{Sv}$  uniquement dans l'enceinte du SHFJ et entre le SHFJ et le Centre hospitalier.

La dose efficace maximale qui intègre la dose par irradiation externe due au dépôt pluie, s'élève au maximum à 0,306 mSv à une centaine de mètres au sud du SHFJ (à cet endroit la dose due au dépôt pluie des situations météorologiques supplémentaires considérées est nulle).

### 5.3.2 - Cas où la dose par irradiation externe est évaluée à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement

Les conséquences d'un rejet d'une bouffée incidentelle de  $^{11}\text{C}$  et de  $^{18}\text{F}$  sont réévaluées en utilisant une méthode adaptée au calcul de rayonnement pour le calcul de l'exposition par irradiation externe due au passage du panache. De la même façon que pour les rejets subchroniques d'une année-type, des calculs simplifiés, où les effets d'ombrage du rayonnement par le bâti et la topographie ne sont pas pris en compte, ont été menés pour les 304 conditions météorologiques possibles.

Le résultat montre que, toutes conditions météorologiques confondues, la dose par irradiation externe maximale est obtenue à une centaine de mètres au sud de l'émissaire « cyclotron-radiochimie » du SHFJ et s'élève à 6  $\mu\text{Sv}$ .

L'estimation de la dose par inhalation est identique à celle présentée à la section précédente avec un maximum de 5  $\mu\text{Sv}$  à une centaine de mètres au sud-sud-est de l'émissaire « cyclotron-radiochimie » du SHFJ. La valeur maximale de 5  $\mu\text{Sv}$  correspond à un vent de 1,8 m/s soufflant du nord-nord-ouest, condition météorologique pénalisante uniquement sur une petite zone à une centaine de mètres au sud du SHFJ.

La dose efficace totale la plus élevée, toutes conditions météorologiques confondues, est obtenue à une centaine de mètres au sud-sud-est de l'émissaire « cyclotron-radiochimie » du SHFJ et s'élève à 7,1  $\mu\text{Sv}$ . Pour 111 GBq de  $^{18}\text{F}$ , la dose efficace totale maximale s'élève à environ 76  $\mu\text{Sv}$  à une centaine de mètres au sud du SHFJ.

## 5.4 - REJET ACCIDENTEL (INCENDIE GENERALISE)

### 5.4.1 - Cas où les doses sont évaluées à l'aide de coefficients de dose

- Dose par inhalation et dose par irradiation externe due au passage du panache,

Selon la même méthodologie que celle employée pour traiter le rejet incidentel, l'impact radiologique consécutif au rejet de tous les radionucléides présents en cas d'incendie généralisé au bâtiment 830, 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.

Dans un premier temps, les calculs unitaires effectués à la section 4.3 sont utilisés et post-traités pour déterminer, le coefficient de transfert atmosphérique maximal, toutes conditions météorologiques confondues. Dans un deuxième temps, la dose efficace, somme de la dose par inhalation et de la dose par irradiation externe due au passage du panache, est évaluée sur la base des relations exposées à la section 3.3.2 - pour le terme source du Tableau 2.

La dose efficace totale maximale, toutes conditions météorologiques confondues, qui serait atteinte autour du SHFJ en cas d'incendie généralisé, n'excède pas 7,5 mSv en face du SHFJ. Cette dose correspond à un terme source incluant la totalité de l'activité susceptible d'être présente dans l'installation, y compris les radionucléides difficilement mobilisables. En excluant du terme source les radionucléides difficilement mobilisables car se trouvant dans des sources scellées, la dose efficace totale, toutes conditions météorologiques confondues, n'excède pas 3,8 mSv.

L'évaluation des doses également effectuée pour le bébé de 3 mois, l'enfant de 1 an et l'enfant de 10 ans. C'est l'exposition calculée pour l'enfant de 1 an qui est la plus pénalisante. Comme pour l'évaluation de l'impact faite pour l'adulte, la dose maximale est atteinte au niveau du boulevard Dubreuil, en face du SHFJ et s'élève à 9 mSv (contre 7,5 mSv pour l'adulte, soit une dose 20% supérieure).

- **Dose par irradiation externe aux dépôts au sol par inhalation et dose par irradiation externe due au passage du panache**

Seule la décroissance radioactive est prise en compte pour l'évolution du débit de dose avec le temps ; d'autres phénomènes de décroissance comme le lavage des dépôts par la pluie par exemple ne sont pas considérés dans le cadre de cette étude.

Le débit de dose par irradiation externe aux dépôts au sol le plus élevé s'observe sous les fenêtres de la façade sud du bâtiment 830 avec une valeur de 0,32 mSv/h juste après l'accident. Cette valeur décroît très vite car elle est à 80% due au rayonnement des dépôts de  $^{18}\text{F}$  (1,83 heures).

La dose par irradiation externe aux dépôts à un an s'élève à 18,9 mSv au maximum sous les fenêtres du bâtiment 830 (dans le périmètre du SHFJ) et est majoritairement due au rayonnement des dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  (54,4%). Le  $^{99}\text{Mo}$ , le  $^{18}\text{F}$ , le  $^{57}\text{Co}$  et le  $^{22}\text{Na}$  sont les quatre autres radionucléides dont la contribution est supérieure à 1 mSv.

La répartition par radionucléide en pourcentage de la dose totale est la même en tout point du domaine d'étude. La condition météorologique qui donne la dose par irradiation externe aux dépôts à un an maximal est la même que celle qui donne la dose efficace maximale. Sous les fenêtres du SHFJ, la valeur de 18 mSv obtenue l'est pour un vent soufflant du nord-ouest à 0,4 m/s.

#### **5.4.2 - Cas où la dose par irradiation externe est évaluée à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement**

Les conséquences d'un rejet accidentel consécutif à un incendie à l'intérieur du bâtiment 830 sont réévaluées à l'aide de méthode adaptée au calcul de rayonnement pour le calcul de la dose par irradiation externe due au passage du panache.

Les calculs réalisés sont des calculs simplifiés, où les effets d'ombrage du rayonnement par le bâti et la topographie ne sont pas pris en compte. Ils sont donc majorants par rapport aux résultats que l'on obtiendrait avec un calcul complet comme celui effectué pour les rejets subchroniques de l'année 2016.

Ces calculs ont été effectués pour chacune des 304 conditions météorologiques possibles. La dose par inhalation, quant à elle, est calculée de la même manière qu'à la section précédente. Contrairement à la section précédente, où la répartition par radionucléides de la dose efficace totale était identique quel que soit le point du domaine d'étude considéré, ce n'est plus le cas ici.



En effet, si la dose par inhalation en un point est proportionnelle à la concentration intégrée en ce point, la dose par irradiation externe due au passage du panache dépend de la répartition spatiale de la concentration intégrée dans un rayon de quelques centaines de mètres autour de ce point. De plus, ce rayon varie avec l'énergie du rayonnement considéré, donc varie pour les différents radionucléides du terme source.

En cas d'incendie généralisé, la dose efficace totale maximale, toutes conditions météorologiques confondues, n'excéderait pas 5 mSv en face du SHFJ et serait due pour l'essentiel à la dose par inhalation. La zone où la dose efficace totale serait supérieure à 1 mSv se limiterait à quelques centaines de mètres carrés autour du SHFJ. La dose efficace totale dépasserait 0,1 mSv dans un rayon de 150 mètres environ au maximum autour du bâtiment 830.

En excluant du terme source les radionucléides difficilement mobilisables car se trouvant dans des sources scellées, la dose efficace totale toutes conditions météorologiques confondues n'excède pas 1,4 mSv à l'extérieur du site.

## **CONCLUSION**

Cette étude est consacrée à l'évaluation d'impact radiologique des rejets atmosphériques du SHFJ à Orsay, toutes activités confondues, et considère :

- Les rejets en fonctionnement normal lors de l'année 2016, sur la base des quantités réelles,
- Les rejets en fonctionnement normal, sur la base d'une année type, des quantités de rejet maximales autorisées;
- Un rejet incidentel de type bouffée
- Un rejet accidentel, résultat d'un incendie généralisé affectant l'installation,

En raison des effets de site attendus, les simulations ont été réalisées à l'aide d'un système de modélisation 3D présentant un caractère réaliste de la topographie, de l'ensemble des bâtiments de la ville d'Orsay, 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. Néanmoins, l'évaluation de doses proposée est majorante dans la mesure où un certain nombre d'hypothèses conservatives ont été retenues :

- L'évaluation statistique pour une année type est effectuée sur la base d'une chronique de rejets pénalisante en termes d'impact (un nombre minimum de rejets d'une quantité maximum de radionucléides) lorsqu'on retient les quantiles élevés des distributions obtenues ;
- Le calcul de l'exposition par irradiation externe repose sur l'utilisation de coefficients de dose déterminés pour des milieux infinis où la concentration est uniforme et surestime les doses effectives dans les zones de plus fortes concentrations.

Cette dernière hypothèse étant particulièrement majorante vis-à-vis des doses maximales calculées, une évaluation de l'exposition externe plus réaliste mais aussi plus coûteuse en temps de calcul a aussi été menée à l'aide d'une méthode adaptée au calcul de rayonnement, pour l'ensemble des situations traitées dans le cadre de cette étude.



Un calcul complet tenant compte des effets d'ombrage par les bâtiments et la topographie a été effectué pour le traitement des rejets en fonctionnement normal de l'année 2016. Seuls des calculs simplifiés ne considérant pas les effets d'ombrage ont été effectués pour les autres situations (rejets en fonctionnement normal d'une année-type et rejet incidentel).

Les résultats de l'étude d'impact exprimés en dose efficace maximale constatée sur le domaine public sont synthétisés dans le tableau 6.

Tableau 6 – Doses efficaces maximales (en mSv)

Types de rejets	Calcul 1	Calcul 2	
	Adulte	Adulte	Enfant
Rejets en fonctionnement normal (année 2016)	0,0065	0,078	0,079
Rejets en fonctionnement normal d'une année type (rejet subchronique)	0,021	0,47	-
Rejets en fonctionnement normal d'une année type (rejet chronique)	-	0,207	0,210
Rejet incidentel d'une bouffée de 185 GBq de 11C*	0,0071	0,395	0,427
Rejet incidentel d'une bouffée de 111 GBq de 18F**	0,076	0,306	0,330
Rejet accidentel (incendie généralisé, tous radionucléides)	5,0	7,5	9,0
Rejet accidentel (incendie généralisé, radionucléides facilement mobilisables uniquement)	1,4	3,8	4,9

calcul 1 : exposition externe calculée avec le module SPRAYSHINE

calcul 2 : exposition externe calculée avec des coefficients de dose déterminés pour des milieux infinis

Les valeurs maximales pour les rejets en fonctionnement normal et les rejets incidentels d'une bouffée ont été localisées à une centaine de mètres au sud du SHFJ. Pour les rejets accidentels, le maximum est observé au plus près du SHFJ.

La dose sur la population riveraine des rejets radiologiques atmosphériques émis par le SHFJ en 2016 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. L'association la plus pénalisante de conditions météorologiques et de chroniques de rejet pour une année quelconque conduirait également à une dose inférieure à 1 mSv, c'est-à-dire à un impact non préoccupant des rejets atmosphériques de l'installation.

Les activités mentionnées ci-dessus sont des valeurs maximales, par définition géographiquement très ponctuelles. Ainsi, les zones où la dose est comprise entre le tiers de la dose maximale et la dose maximale sont peu étendues, quelques dizaines de mètres carrés au maximum.

Hors périmètre SHFJ et quel que soit le scénario incidentel ou accidentel considéré, les doses sont toutes inférieures ou égale à 10 mSv qui est la première valeur repère indiquée dans l'article R1333-84 du Code de la Santé Publique. Il n'y aurait donc pas lieu de prévoir la mise en œuvre de mesures de protection de la population.

La dose par irradiation externe aux dépôts à un an s'élève à 18,9 mSv au maximum sous les fenêtres du bâtiment 830 dans le périmètre du SHFJ (seule la décroissance radioactive est prise en compte pour le calcul de cette dose; d'autres phénomènes de décroissance comme le lavage des dépôts par la pluie ne sont pas pris en compte).

[i] A. Doury, Le vadémécum des transferts atmosphériques, rapport CEA-DSN n°440, 1981