

Bureau Veritas
Service Risques Industriels
16 Chemin BP 26
69 571 DARDILLY CEDEX

Tél. 04 72 29 32 67
Fax. 04 78 35 63 10



Evaluation de risque sanitaire radiologique Site de Saint-Cloud

INDICE	DATE	EMETTEUR	VERIFICATEUR
0	25 avril 2012	G. VINCENT M. FOURNIER	E. COQUEUX- LEJEUNE
1	09 juin 2016	E. COQUEUX- LEJEUNE	-
2	01 juillet 2016	E. COQUEUX- LEJEUNE	Xavier TOUFFUT

SOMMAIRE

1. GLOSSAIRE	3
2. CONTEXTE.....	4
2.1. Contexte.....	4
2.2. Mise à jour de mai 2016.....	4
3. METHODE.....	5
4. DESCRIPTIONS DE L'INSTALLATION	6
4.1. Présentation de l'installation.....	6
4.2. Description des effluents rejetés	8
5. SENSIBILITE DE L'ENVIRONNEMENT ET POPULATION POTENTIELLEMENT EXPOSEES	8
5.1. Sensibilité de l'environnement (radioactivité).....	8
5.2. Descriptif de la population exposée	9
6. IMPACT DES REJETS RADIOLOGIQUES SUR L'HOMME.....	10
6.1. Généralités.....	10
6.2. Point de rejet.....	11
6.3. Description des rejets.....	11
6.4. Evaluation de l'impact radiologique.....	12
6.4.1 Choix du modèle retenu	12
6.4.2 Conditions météorologiques retenues	14
6.4.3 Topographie et bâti	15
6.4.4 Paramètres retenus.....	15
6.4.5 Résultats pour la population générale	16
6.4.6 Résultats pour les travailleurs	25
6.5. Hypothèses et sensibilité.....	27
6.5.1 Introduction	27
6.5.2 Incertitudes sur l'identification et la quantification des émissions.....	27
6.5.3 Incertitudes liées au modèle de dispersion atmosphérique	27
6.5.4 Les incertitudes sur l'exposition des populations et sur la variabilité des êtres humains aux différents facteurs.....	28
6.5.5 Conclusion sur les incertitudes.....	28
7. SYNTHESE.....	29

1. Glossaire

AAA	Advanced Accelerator Applications
AIEA	International Atomic Energy Agency
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
ERS	Evaluation des Risques Sanitaires
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
ICPE	Installations classées pour la protection de l'environnement
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

2. Contexte

2.1. Contexte

La société la société Advanced Accelerator Applications (A.A.A) S.A est un établissement pharmaceutique spécialisé dans la fabrication de radio-isotopes à partir d'un accélérateur de particules (cyclotron). Ces radioéléments sont commercialisés dans les services de médecine nucléaire.

Compte tenu de la durée de vie courte de ces radioéléments, le marché a une structure très régionale : le produit est fabriqué, transporté et utilisé quelques heures après.

Suite à une augmentation des capacités de production, la société A.A.A souhaite évaluer les impacts radiologiques sur la santé pour la population vivant autour du site, en fonctionnement normal, pour diverses situations.

Cette Evaluation des Risques Sanitaires radiologique est spécifique au site de Saint-Cloud.

N.B.

En 2004, la société A.A.A a réalisé un dossier de demande d'autorisation, dans le cadre de la réglementation ICPE, pour le site de Saint-Genis Pouilly. Ce dossier comportait une évaluation du risque sanitaire radiologique.

En 2008, ce site est passé à déclaration. De ce fait une telle étude n'est plus obligatoire dans un cadre réglementaire.

La société A.A.A a cependant souhaité réaliser une évaluation des risques sanitaires radiologiques pour l'ensemble de ses sites ayant des rejets pour évaluer le niveau de risque pour les populations.

2.2. Mise à jour de mai 2016

Suite à l'examen du rapport initial par l'ASN, cette dernière a demandé à ce que l'étude soit complétée par :

- La prise en compte de l'exposition externe des populations au panache.
- La mise en œuvre d'un modèle de dispersion plus fin en champ proche pour une meilleure précision et évaluation de l'exposition pour les habitations situées à moins de 100 m du point de rejet.

A.A.A. met en œuvre du gallium 68 : les émissions de ce radioélément seront donc également prises en compte dans cette mise à jour.

De même, les quantités susceptibles d'être émises pour chacun des radionucléides mis en œuvre ont été mises à jour.

3. Méthode

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact radiologique sur la santé des populations du site d'A.A.A de Saint-Cloud en fonctionnement normal et de comparer les résultats obtenus aux limites réglementaires. Cette évaluation se base sur les recommandations et sur les guides de l'IRSN et de l'AIEA.

L'étude se décompose en plusieurs étapes qui sont les suivantes :

- description de l'installation,
- description du site et de son environnement,
- impact sanitaire des rejets radioactifs (identification des dangers, évaluation de l'exposition et caractérisation des risques).

Conformément à l'article R1333.8 du Code de la Santé Publique, la limite de dose efficace annuelle totale, toutes voies d'exposition et tous isotopes confondus doit être inférieure à 1 mSv/an pour les personnes du public (hors exposition à la radioactivité naturelle et hors pratiques médicales). L'évaluation de l'impact radiologique sera donc réalisée vis-à-vis de cette dose limite.

L'estimation de l'impact dosimétrique est réalisée pour deux classes d'âge représentatives de la population locale, à savoir l'enfant de 1-2 ans et l'adulte.

La dose efficace annuelle reçue par les individus du public est la somme de la dose efficace reçue en une année du fait d'une exposition externe et de la dose efficace engagée due aux radionucléides incorporés au cours de cette même année. La dose efficace engagée due à l'incorporation de radionucléides est utilisée dans les estimations prospectives de dose pour les membres du public.

4. Descriptions de l'installation

4.1. Présentation de l'installation

Créée en mars 2002, la société A.A.A est un établissement pharmaceutique spécialisé dans la fabrication de médicaments radiopharmaceutiques utilisés dans les services hospitaliers de Médecine nucléaire disposant d'un système d'imagerie perfectionné appelé tomographie d'émission de positon (TEP).

Afin de produire les radio-isotopes nécessaires pour ces radiopharmaceutiques, la société A.A.A dispose d'un accélérateur de particules (cyclotron).

L'exploitation du cyclotron est aujourd'hui entièrement dédiée à la fabrication de Fluor 18 qui est utilisé principalement pour le marquage du FDG. Le [18F]FDG, commercialisé dans les services de médecine nucléaire est utilisé pour le dépistage de cellules cancéreuses.

D'autres produits radiopharmaceutiques sont en cours de développement. Ces produits font intervenir le carbone 11, le cuivre 64 et le gallium 68.

Le site est implanté sur la commune de Saint-Cloud. Le bâtiment est constitué de quatre zones :

- La zone cyclotron dédiée à la fabrication du fluor 18.
- La zone des laboratoires dédiée à la production stérile de molécules marquées, commercialisées en Médecine Nucléaire et à la production non stérile de molécules marquées (activités de recherche).
- La zone des bureaux dédiée à l'administratif
- le local technique, installé en toiture du bâtiment existant, abrite le groupe froid et la centrale de traitement d'air.

La situation du site est localisée sur le fond de carte IGN ci-après.

Site AAA de
Saint-Cloud



Figure n°1 : Situation du site

La localisation du site est repérée sur l'extrait de carte ci-après (Coordonnées Lambert II Etendu : Latitude (Y) – 2 427 392 m et Longitude (X) – 591 292 m).



Figure n°2 : localisation de la société A.A.A à Saint-Cloud

4.2. Description des effluents rejetés

Du fait de son activité de production d'un radioélément, la société A.A.A. a mis en place des procédures de contrôle des rejets qu'ils soient liquides ou gazeux. La radioactivité des effluents liquides est confinée sur le site pendant la période de décroissance. Les meilleures techniques disponibles ont été mises en place (conception des équipements et modalités de fabrication) afin de réduire les émissions atmosphériques. La radioactivité résiduelle dans les rejets atmosphériques est mesurée en continu.

Concernant la gestion des déchets, le laboratoire A.A.A. a mis en place des procédures strictes de tri des déchets (déchets non dangereux, déchets dangereux et déchets contenant des radioéléments).

5. Sensibilité de l'environnement et population potentiellement exposées

5.1. SENSIBILITE DE L'ENVIRONNEMENT (RADIOACTIVITE)

Le principal site « nucléaire » à proximité de l'installation de Saint-Cloud est le centre de Fontenay aux Roses (CEA et IRSN) situé à environ 8 km au sud-est du site de A.A.A.

Les balises du réseau de mesures de la radioactivité dans l'environnement de l'IRSN les plus proches sont situées à Nanterre (5 km au nord nord Est) et à Boulogne-Billancourt (3 km au Sud-Est).

Ces balises fournissent des débits d'équivalents de dose moyen en nanoSv par heure. Ces débits sont compris, pour l'année 2011, entre 70 et 90 nSv/h. En France, ces débits sont compris entre 10 et 250 nSv/h selon les régions.

Il peut donc être considéré que ces débits d'équivalents de dose moyen sont normaux.

Sur la base de 8 776 heures dans une année, une estimation peut être effectuée pour déterminer une dose annuelle. Cette dose serait comprise entre 0,6 et 0,8 mSv/an.

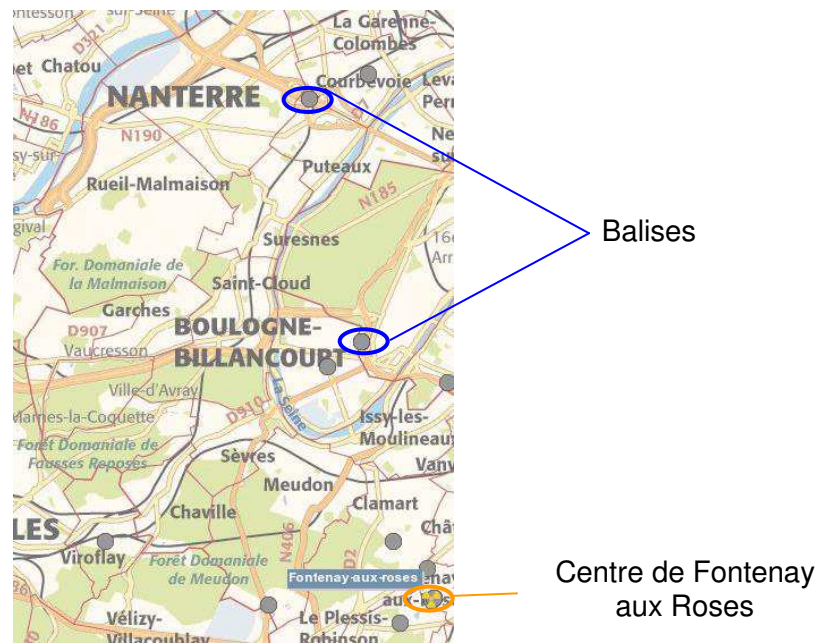


Figure n°3 : localisation des balises du réseau de mesures de la radioactivité dans l'environnement de l'IRSN

5.2. DESCRIPTIF DE LA POPULATION EXPOSEE

Le site A.A.A de Saint-Cloud est situé en zone très fortement urbanisée, qui comprend de ce fait de nombreux établissements sanitaires.

Du fait de son activité, le site A.A.A est de fait inclut au sein d'un établissement sanitaire (Hôpital René Huguenin - Institut Curie, centre de lutte contre le cancer).

Les cibles retenues sont :

- **D'une part les travailleurs / personnels du centre hospitalier : adultes.** Notons que dans l'établissement de santé (Hôpital René Huguenin – Institut Curie), les occupants (patients, travailleurs, personnel soignant) ne sont pas présents 100 % du temps.
- **D'autre part les logements collectifs situés à proximité immédiate du site et potentiellement les plus exposés : adultes et enfants.**

6. Impact des rejets radiologiques sur l'Homme

6.1. Généralités

Les rejets de radioéléments du site A.A.A. peuvent être de 2 types :

Les effluents liquides potentiellement radioactifs : ces effluents sont confinés sur le site jusqu'à décroissance des radioéléments. Par conséquent le risque d'exposition interne (par ingestion) ou externe (par contact) sur les populations n'est pas retenu.

Concernant les effluents gazeux potentiellement radioactifs, le risque d'exposition de la population est retenu car :

- Le module de synthèse est susceptible de présenter des traces de fluor 18, de carbone 11, de cuivre 64 **et de gallium 68** sous forme gazeuse provenant de la phase liquide (on admet qu'un certain pourcentage de la phase liquide est susceptible de passer sous forme gazeuse lors de cette étape de synthèse) ;
- Il existe une voie de transfert de cette phase gazeuse vers l'environnement du fait du réseau d'extraction aéraulique du module de synthèse ;

Bien que ce réseau soit pourvu d'un système de récupération des gaz du module (qui a pour but de temporiser le rejet au sein d'un isolateur confiné afin d'obtenir la décroissance du fluor 18, du carbone 11, du cuivre 64 **et du gallium 68**) le rejet final est susceptible de présenter une activité résiduelle.

Dans le cas de l'étude de dispersion d'un radioélément, la décroissance de l'activité est prise en compte grâce au paramètre de demi-vie.

S'agissant d'effluents gazeux de radioéléments ayant une période de demi-vie courte, les voies de contamination considérées sont :

- L'exposition interne par inhalation du panache ;
- **L'exposition externe par submersion dans le panache.**

En effet, les voies de contaminations par l'exposition externe aux dépôts radioactifs au sol et l'exposition interne par ingestion d'aliments contaminés ne sont pas considérées comme pertinentes du fait de demi-vie courte et de la forme gazeuse des radioéléments.

6.2. Point de rejet

Les rejets gazeux radioactifs s'effectuent au niveau de la cheminée du site de Saint-Cloud. Les caractéristiques de ce point de rejet ainsi que les conditions de rejets et la localisation géographique (X,Y) en coordonnées Lambert II étendu sont présentées dans le tableau n°3.

Données	Point de rejet
X (m)	591 292
Y (m)	2 427 392
Hauteur (m)	20,7
Débit (m ³ /h)	10 195
Surface (m ²)	0,54
Température (°C)	20°C +/- 2°C
Vitesse d'éjection (m/s)	5,3

Tableau n°1 : Caractéristiques du point de rejet des effluents gazeux

6.3. Description des rejets

Les effluents gazeux produits par l'installation durant son exploitation en fonctionnement normal contiennent du fluor 18, du carbone 11, du cuivre 64 et du gallium 68.

La quantification des émissions a été réalisée sur la base de la répartition de l'activité du radionucléide utilisé (et surtout mise en œuvre), de l'expérience des rejets sur le site depuis le démarrage de l'activité et des connaissances sur le processus chimique.

Plusieurs scénarios ont été retenus afin de représenter la situation actuelle autorisée (Scénario 1) et une situation majorante accidentelle (Scénario 2).

Radionucléide	Activité maximale annuelle rejetée (GBq/an)	
	Scénario 1	Scénario 2
Fluor 18	800	1600
Carbone 11	100	200
Cuivre 64	50	100
Gallium 68	50	100

Tableau n°2 : Terme source pour les rejets gazeux

Les données relatives à ces radioéléments et nécessaire à l'évaluation de l'impact radiologiques des populations sont reprises dans le tableau n°5. Il s'agit :

- Des coefficients de dose par inhalation pour l'organisme entier sont issus de la Directive Européenne 96/29/EURATOM. Elles considèrent un temps d'intégration de 50 ans pour l'adulte et jusqu'à l'âge de 70 ans pour l'enfant et des débits respiratoires moyens respectifs de 0,9 m³.h⁻¹ et de 0,2 m³.h⁻¹.

- Du coefficient de dose externe par submersion dans le panache qui est issu du rapport *Federal Guidance report n°12* de 1993.

Paramètre		Fluor 18	Carbone 11	Cuivre 64	Gallium 68	
Période		1,83 h 6 586 s	20,3 mn 1 218 s	12,7 h 45 720 s	1,13 h 4068 s	
Coefficient de dose par inhalation pour l'organisme entier (Sv.Bq-1)	Enfant (1-2 ans)	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$5,8 \cdot 10^{-10}$	$3,10 \cdot 10^{-10}$	
	Adulte	$5,9 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$4,80 \cdot 10^{-11}$	
Coefficient de dose externe par immersion dans le panache pour l'organisme entier (Sv.Bq ⁻¹ .s.m ⁻³)		-	$4,9 \cdot 10^{-14}$	$4,89 \cdot 10^{-14}$	$9,10 \cdot 10^{-15}$	$4,58 \cdot 10^{-14}$

Tableau n°3 : Caractéristiques des radioéléments

A titre d'information, ces radioéléments sont des radionucléides de groupe 4, c'est-à-dire qu'ils appartiennent au groupe des radionucléides de radiotoxicité faible (Décret 66-450 du 20 juin 1966 modifié).

6.4. Evaluation de l'impact radiologique

6.4.1 Choix du modèle retenu

Compte tenu du contexte, nous avons retenu un modèle 3D permettant une très bonne précision de calcul en champ très proche : le modèle MSS (Micro SWIFT/SPRAY), Lagrangien à particules avec obstacle.

Celui-ci permet un très bon compromis entre le maillage qui doit être suffisamment fin pour intégrer de façon précise les effets de turbulence et de sillage des bâtiments sous l'effet du vent et des temps de calculs suffisamment courts pour permettre de simuler la dispersion des émissions de la cheminée pour les conditions de vents les plus défavorables.

Les concentrations sont calculées sur un maillage dense de points permettant de créer des iso-contours de concentrations précis.

- **Modèle Micro-SWIFT :**

Le modèle SWIFT est issu du modèle MINERVE (EDF) dont ARIA a fait évoluer les algorithmes et les paramétrisations physiques pour permettre son utilisation en présence d'obstacles, avec la création de Micro-SWIFT.

Il permet de prendre en compte de façon fine le relief, l'occupation des sols et les obstacles, tout en garantissant la conservation de la masse dans le domaine. Il calcule et met en forme les données pour les modèles de dispersion à savoir : les champs 3D de vent, pression, température, vapeur d'eau, eau liquide, mais également les champs turbulents : énergie cinétique turbulente, hauteur de couche limite, vitesse de frottement au sol, longueur de Monin-Obukhov nécessaires au modèle de dispersion.

Il se décompose en trois étapes de calcul distinctes :

- Interpolation des données météorologiques pour fournir une première ébauche des champs de vent et de température recherchés ;
- Introduction de modifications du champ de vent interpolé décrivant au premier ordre l'effet des obstacles à l'aide de paramétrisations analytiques (zone de déventement amont, de sillage et de recirculation au voisinage des obstacles).
- Ajustement itératif du champ vent par une méthode variationnelle destinée à créer un champ de vitesses à divergence nulle, en prenant en compte les contraintes imposées par la stabilité atmosphérique, les caractéristiques du sol, et les mailles pleines éventuelles correspondant aux obstacles.

Le champ de vent 3D obtenu à l'issue de l'étape d'ajustement :

- Respecte les valeurs fournies en entrée au voisinage des points de données ;
- Satisfait l'équation de continuité sous sa forme incompressible (divergence nulle) ;
- Restitue l'influence de la stabilité atmosphérique sur les déviations du vent ;
- Comporte un champ de vitesse verticale cohérent avec la topographie et avec les obstacles ;
- Comporte un champ de turbulence représentant l'évolution diurne de la couche de mélange.

- **SPRAY :**

SPRAY est un **modèle de dispersion tridimensionnel de type lagrangien à particules** développé conjointement par ARIA Technologies et sa filiale ARIANET (Milan, Italie), fondée par les chercheurs de l'ENEL qui avaient contribué au développement initial du modèle.

Le code simule le transport et la dispersion d'espèces gazeuses ou d'aérosol chimiquement inertes dans des conditions réelles complexes (temps calme, terrain complexe, vent cisaillé, etc...), caractérisées par les différences spatiales et temporelles des variables météorologiques et de diffusion (cisaillements verticaux de vent, brises induites par des effets de pente ou des contrastes thermiques du terrain). Il est possible de simuler des émissions provenant de sources ponctuelles, linéaires ou volumiques, continues ou discontinues.

Dans un modèle de dispersion lagrangien à particules, les émissions dans l'atmosphère sont simulées à l'aide d'un certain nombre de particules fictives, représentant chacune une masse donnée de polluant ; on suppose que ces particules suivent de manière passive le mouvement turbulent des particules d'air dans lesquelles elles sont introduites ; à partir de leur distribution spatiale à un instant donné, on peut donc reconstituer la concentration de substance émise.

Nota : Le mot particule désigne ici une portion de fluide contenant la substance émise, suffisamment petite pour suivre le mouvement des plus petits tourbillons existant dans l'atmosphère.

SPRAY permet de calculer des concentrations moyennes et instantanées sur un maillage tridimensionnel défini par l'utilisateur, en différenciant le calcul des concentrations par polluant et par source. La vitesse de déplacement des particules est caractérisée par une composante moyenne de transport, fournie par la vitesse moyenne du vent local et par une composante stochastique simulant la diffusion et reproduisant les conditions de la turbulence atmosphérique.

Il permet de tenir compte :

- des différences verticales et horizontales de la turbulence,
- de l'asymétrie des distributions verticales de la vitesse dans des conditions instables,
- des corrélations croisées entre les différentes composantes de la vitesse.

Ce modèle présente l'avantage de ne pas avoir de limitations pour les petites échelles.

Un modèle Lagrangien à particules comme SPRAY est universellement reconnu comme supérieur sur le plan physique aux modèles de dispersion gaussiens ou lagrangiens à bouffées gaussiennes, qu'ils soient de première ou de seconde génération. Cela est vrai en particulier pour les problèmes caractérisés par la présence d'un grand nombre de grandes sources ponctuelles ou la prise en compte explicite des obstacles.

6.4.2 Conditions météorologiques retenues

Compte tenu des temps de calculs, il n'est pas envisageable de simuler la dispersion avec MSS pour une année complète d'enregistrements des paramètres météorologiques horaires.

L'approche retenue consiste à réaliser une bibliothèque de cas météorologiques considérés comme potentiellement les plus pénalisants susceptibles de conduire aux concentrations maximales au niveau des riverains.

Les cas retenus sont les suivants :

Cas	Vitesse du vent	Direction du vent	Classe de stabilité de Pasquill	Commentaire / justification des choix
1	1 m/s	30°	Neutre (D)	Vent faible, peu propice à la dispersion atmosphérique. Classe de stabilité généralement la plus fréquemment rencontrée.
2	1 m/s	30°	Très stable (F)	Vent faible. Classe de stabilité correspondant, par exemple, à une nuit claire : le sol se refroidit par rayonnement plus rapidement que les couches d'air adjacentes. Les transferts turbulents sont faibles, particulièrement dans la direction verticale. Ce cas est particulièrement peu propice à la dispersion atmosphérique.
3	3 m/s	30°	Instable (B)	Vitesse de vent généralement la plus fréquente. Classe de stabilité correspondant, par exemple, à une journée relativement ensoleillée : possibilité de mouvements convectifs verticaux.
4	3 m/s	30°	Neutre (D)	Vitesse de vent généralement la plus fréquente. Classe de stabilité généralement la plus fréquemment rencontrée.
5	5 m/s	30°	Neutre (D)	Vent relativement fort (possibilité de phénomène de rabattement du panache lié au bâti de la cheminée et des bâtiments). Classe de stabilité généralement la plus fréquemment rencontrée.

Tableau n°4 : Cas météorologiques retenus

Pour chacun des cas, 3 directions de vent ont été retenues :

- 230° : direction des vents poussant le panache vers les immeubles d'habitations situés au nord-est du point de rejet (rue Gaston Latouche) ;
- 270° : direction des vents poussant le panache vers les immeubles d'habitation situés à l'Est du point de rejet, de l'autre côté de la rue Gaston Latouche ;
- 320° : direction des vents poussant le panache vers les immeubles d'habitation situés au Sud Est du point de rejet, de l'autre côté de la place du passage de Saint-Cloud ;

Les situations pluvieuses n'ont pas été représentées car elles conduisent au lessivage des panaches qui diminue fortement les concentrations près des zones de rejet.

6.4.3 Topographie et bâti

La topographie de la zone d'étude a été intégrée au modèle. Il s'agit du Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 100 mètres issu des données satellites SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) fournies gratuitement sur le site de CGIAR Consortium for Spatial Information.

Le bâti a été intégré au modèle via une maquette 3D des bâtiments du site. La résolution horizontale de la maquette 3D du bâti est de 2 m pour une meilleure précision des résultats. Selon la verticale, la résolution est très fine dans les 30 premiers mètres, de l'ordre de grandeur du mètre, puis plus espacée jusqu'à atteindre une altitude de 450 m.

La représentation ci-après permet de visualiser le relief et le bâti tels qu'ils sont intégrés dans le modèle.

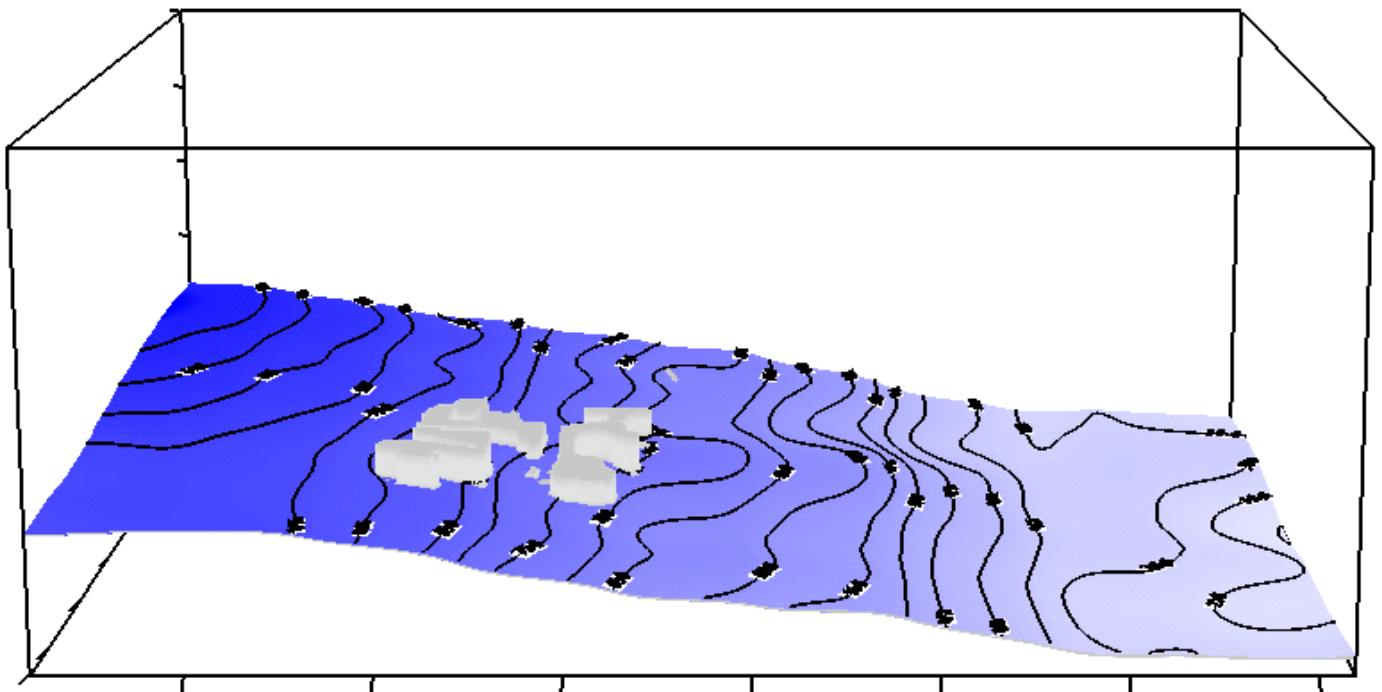


Figure n°3 : Représentation de la topographie et des bâtiments pris en compte

6.4.4 Paramètres retenus

Les principales options de calcul retenues pour cette modélisation sont :

- La prise en compte du relief et des bâtiments,
- Le calcul des concentrations en moyenne horaire sur des mailles de 2m x 2m x 2m.

L'occupation des sols a été intégrée au modèle. Elle est issue de la base de données géographique européenne CORINE Land Cover 2006 disponible à une résolution de 25 m. Sur le domaine étudié, un seul type d'occupation des sols est présente : tissus urbain discontinu.

Ces paramètres permettent de déduire les grandeurs nécessaires au calcul de la turbulence.

Le rejet étant horizontal et émis à température ambiante, il n'a pas été calculé de surhauteur d'élévation du panache au-dessus du point de rejet.

6.4.5 Résultats pour la population générale

- **Scénario d'exposition :**

Les cibles considérées correspondent aux logements collectifs situés à proximité immédiate du site et potentiellement les plus exposés.

Les personnes exposées peuvent être des adultes et des enfants.

Le temps d'exposition est considéré potentiellement à 100 % (c'est-à-dire qu'il n'est pas considéré de déplacements hors du logement). Cette hypothèse est considérée majorante.

- **Résultats de la modélisation :**

Les résultats de la modélisation montrent que la condition météorologique conduisant aux concentrations atmosphériques les plus importantes est 1F (cas 2) :

- vitesse de vent = 1 m/s
- stabilité de l'atmosphère = F (très stable)

Les cartes d'iso-activités pour le fluor 18 et pour les conditions les plus pénalisantes sont présentées ci-après. Il s'agit de « coupes » parallèles au sol à une hauteur de près de 18 m. Il s'agit de la hauteur pour laquelle les concentrations modélisées sont les plus défavorables avec présence d'étages de logements collectifs situés à proximité immédiate.

Notons que les cartes pour les autres radioéléments ont des panaches de forme similaire.

Scénario 1 - Vents 1F - direction 230°

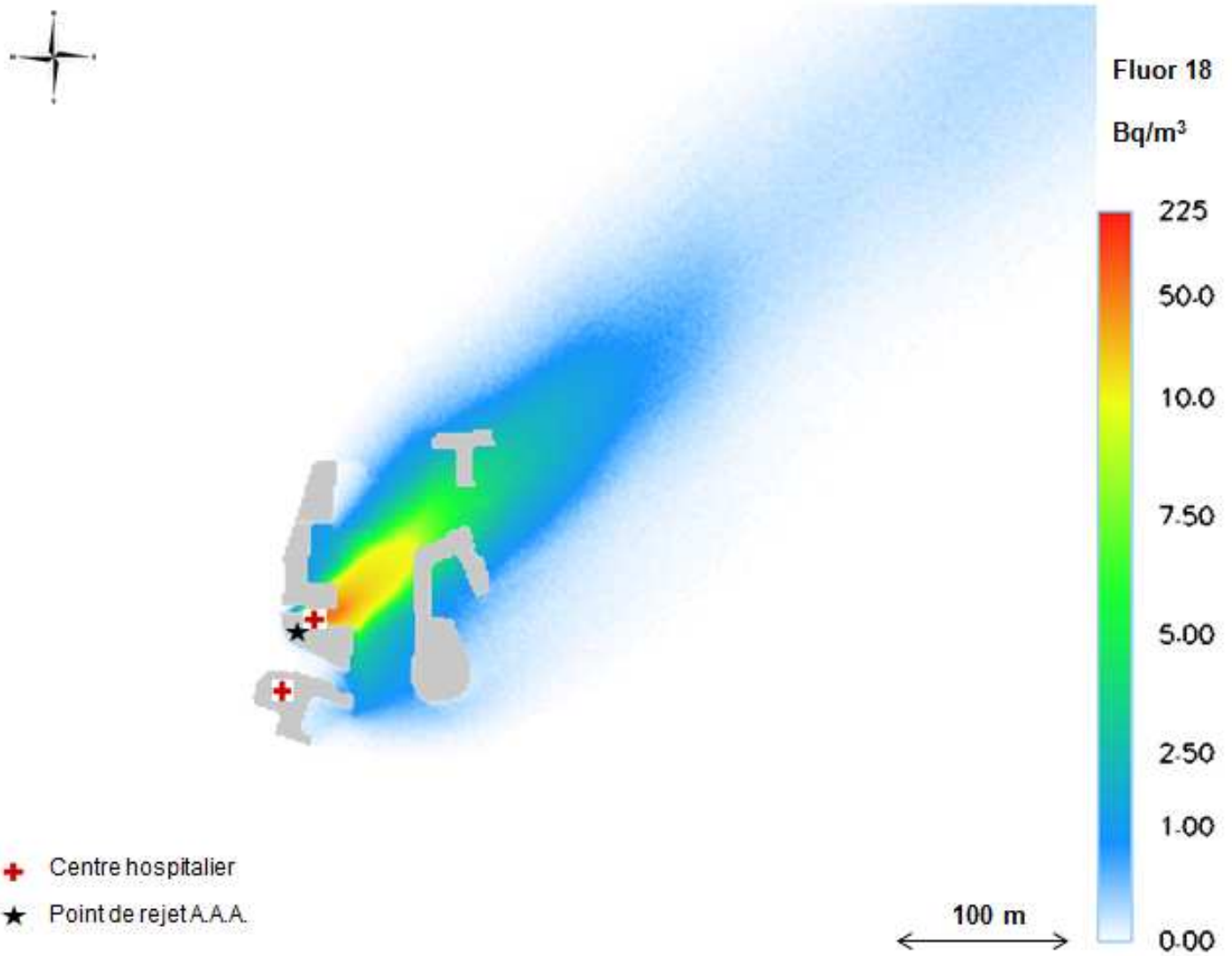


Figure n°4 : Carte des iso-activités, scénario 1, F18

Scénario 1 - Vents 1F - direction 270°

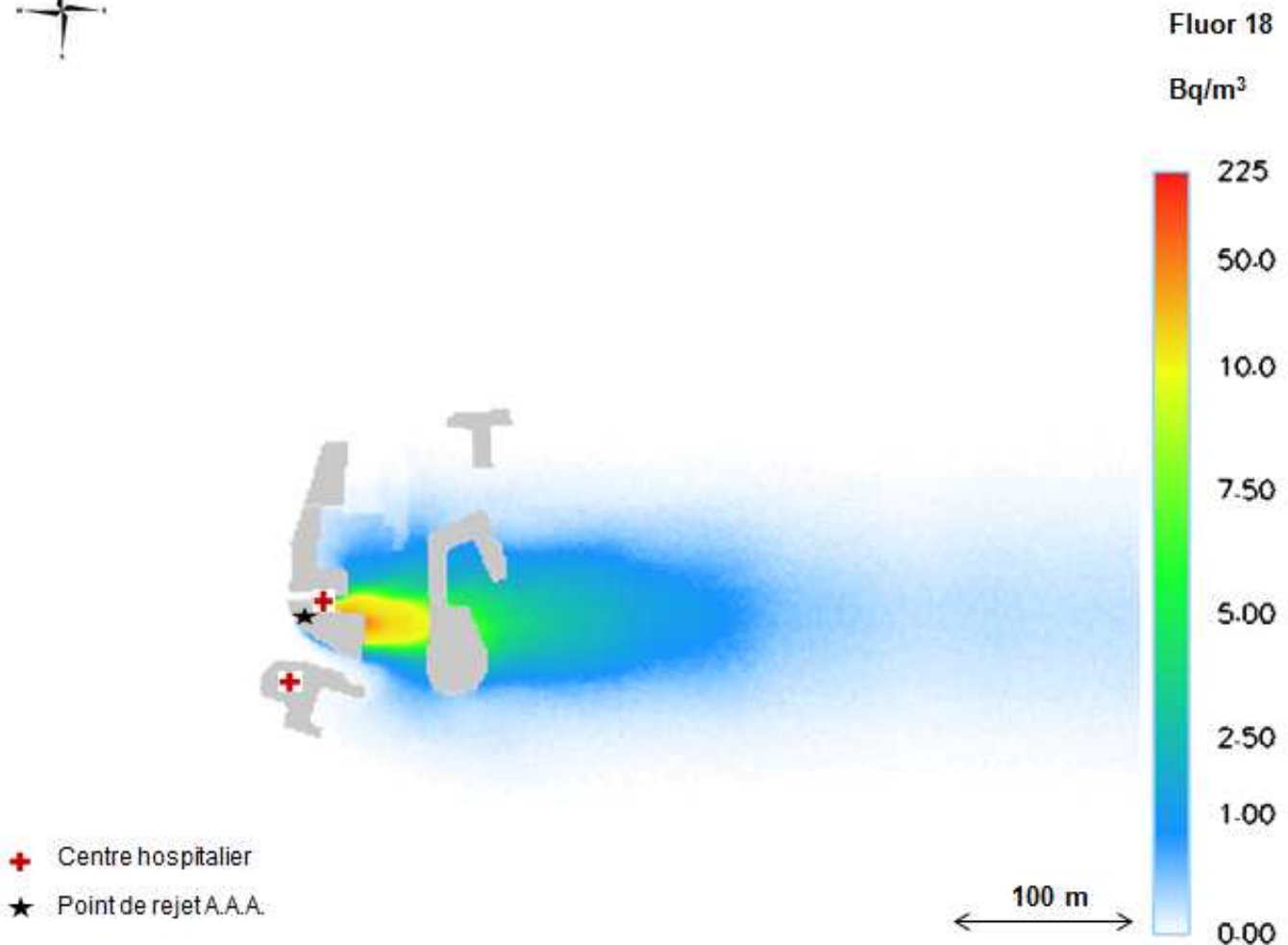


Figure n°5 : Carte des iso-activités, scénario 1, F18

Scénario 1 - Vents 1F - direction 320°

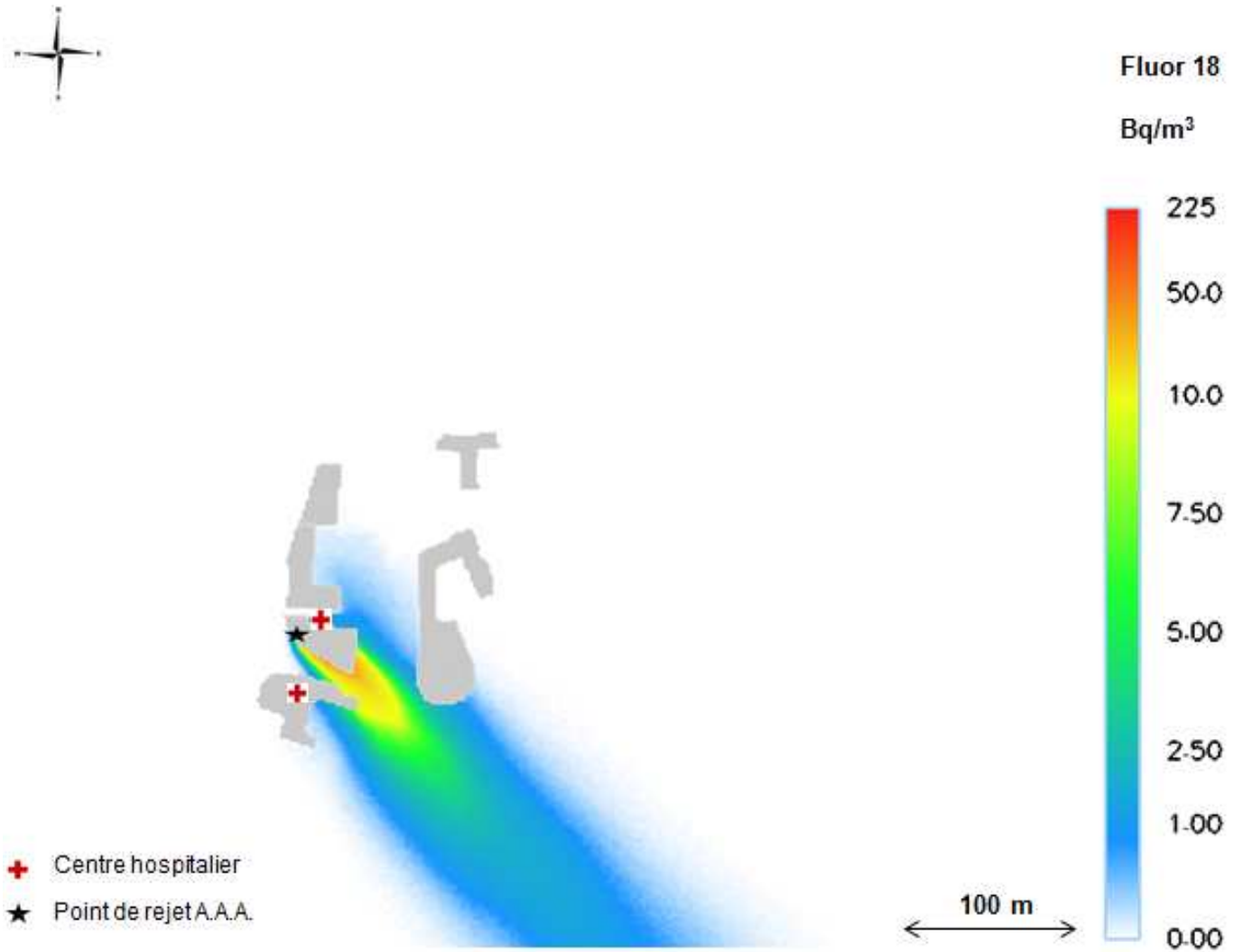


Figure n°6 : Carte des iso-activités, scénario 1, F18

Scénario 1 - Vents 1F - direction 230°

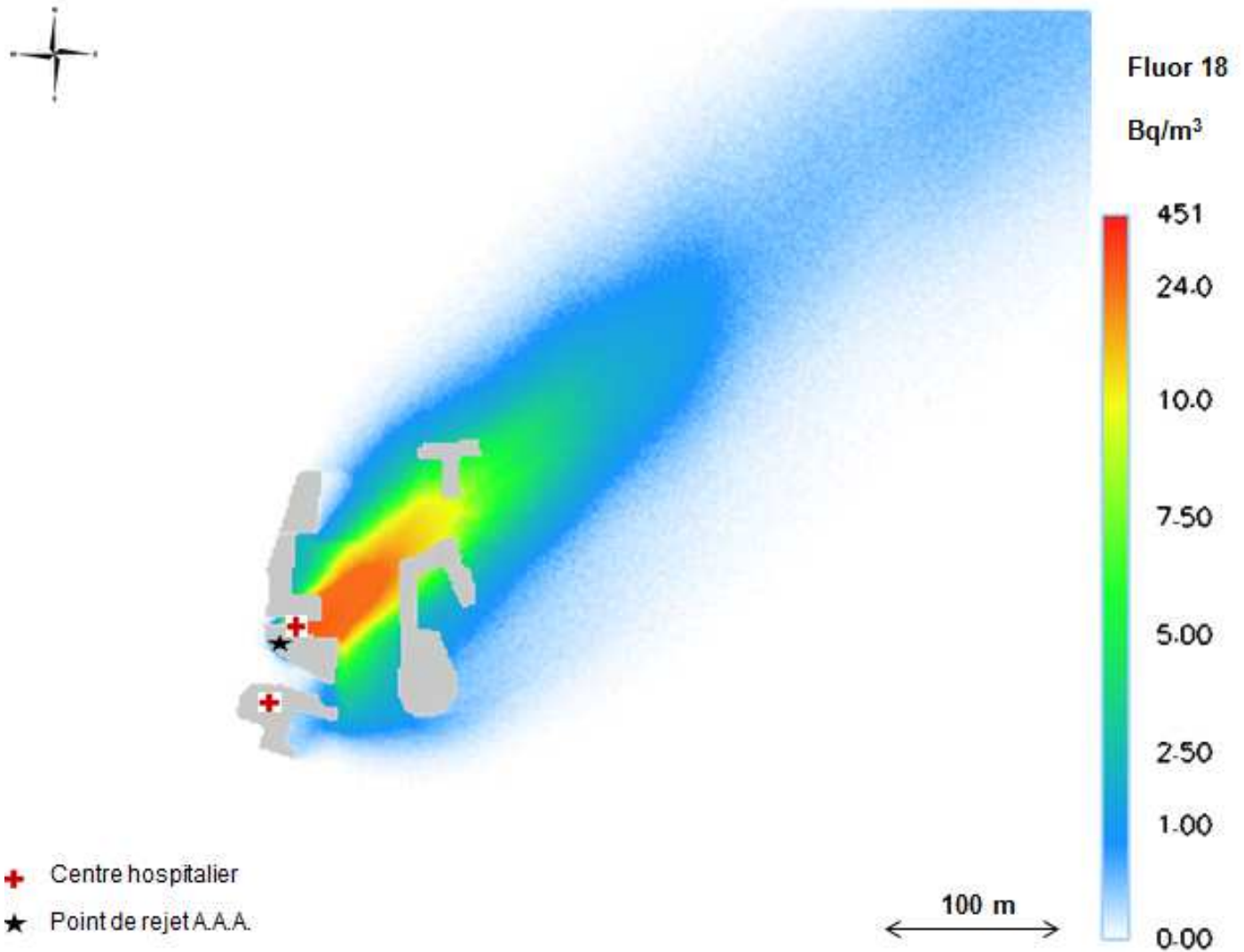


Figure n°7 : Carte des iso-activités, scénario 2, F18

Scénario 2 - Vents 1F - direction 270°

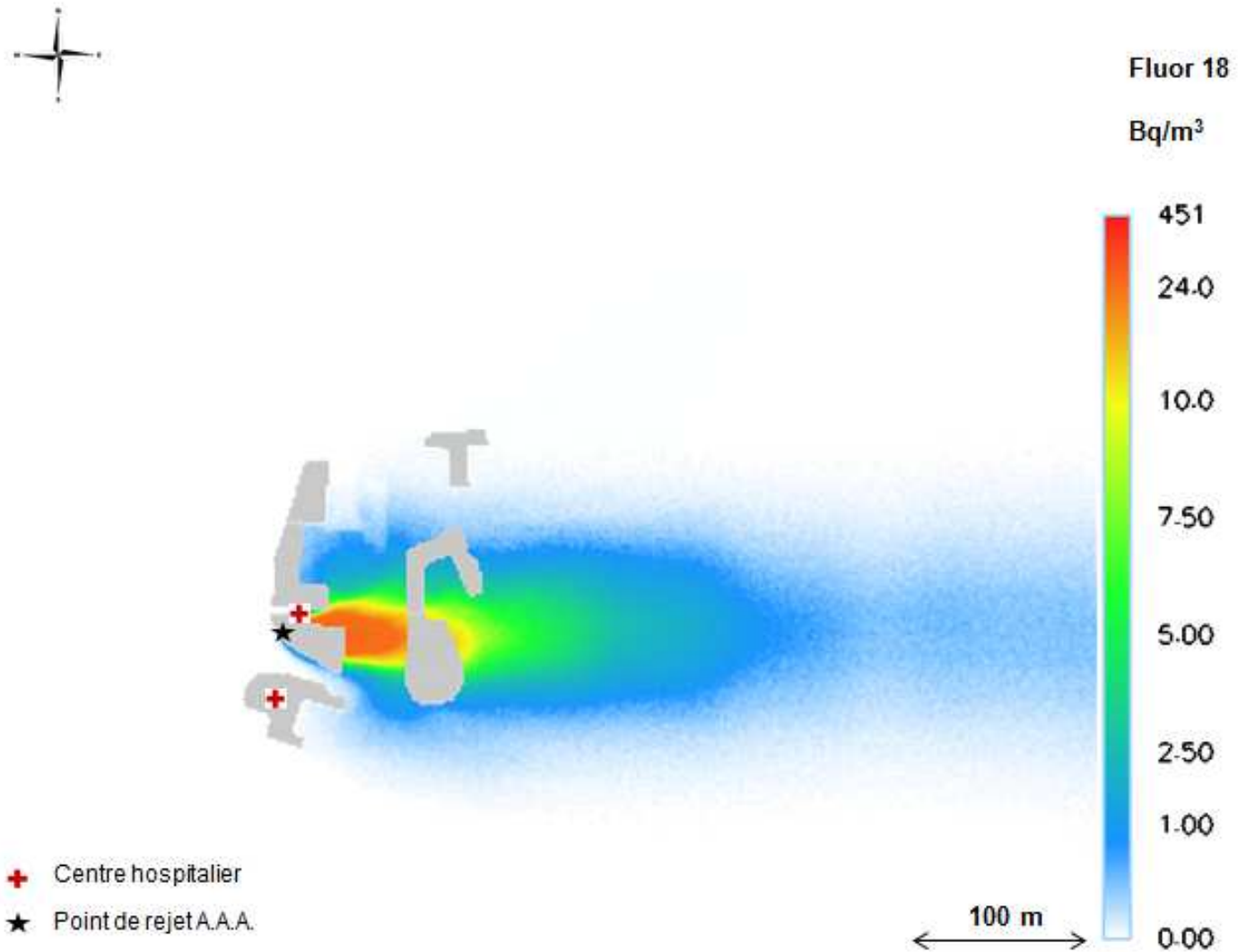


Figure n°8 : Carte des iso-activités, scénario 2, F18

Scénario 2 - Vents 1F - direction 320°

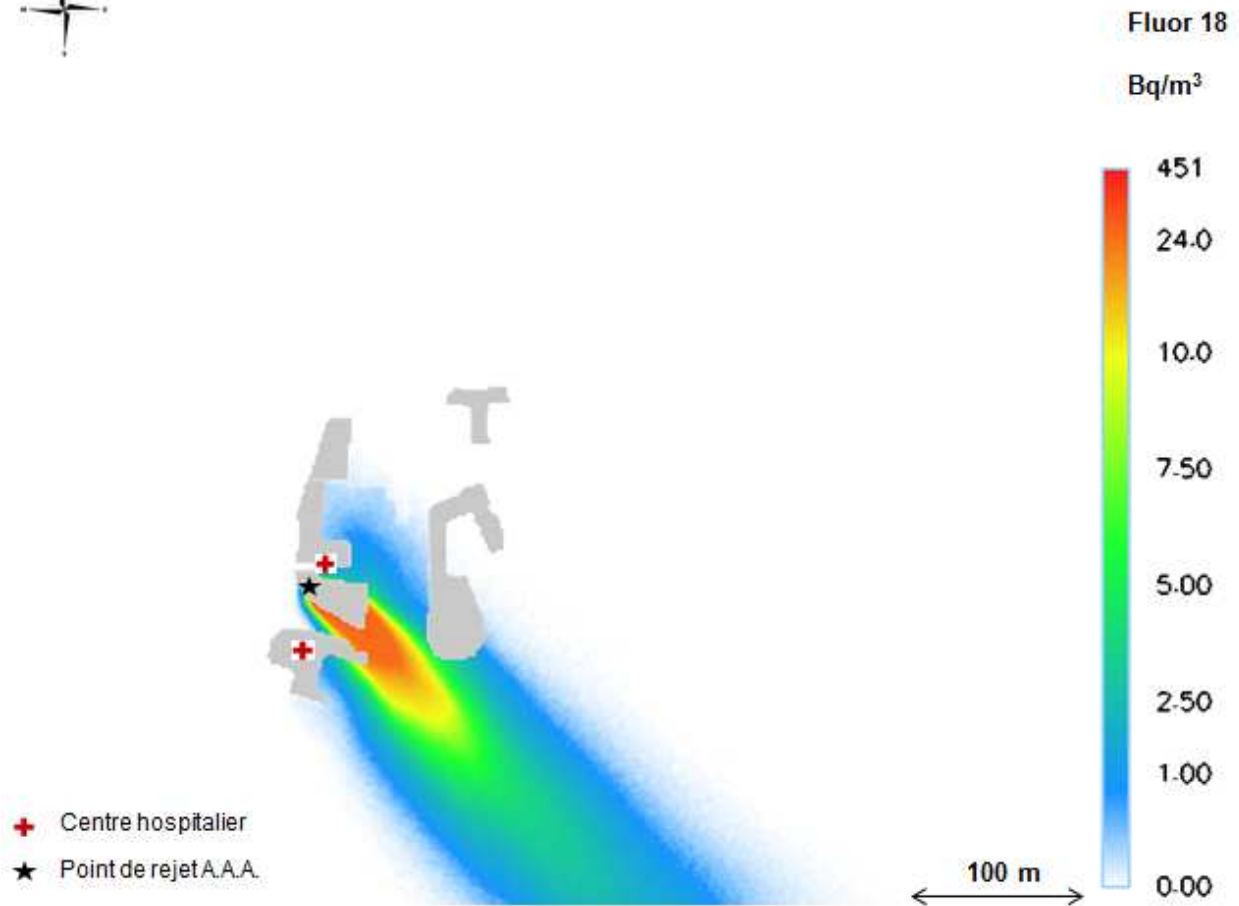


Figure n°9 : Carte des iso-activités, scénario 2, F18

- Activités maximales modélisées :**

Les activités maximales obtenues par le modèle de dispersion sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Fluor 18	Carbone 11	Cuivre 64	Gallium 68
Scénario 1	12,0	1,5	0,7	0,7
Scénario 2	23,0	2,9	1,4	1,4

Tableau n°5 : Activités maximales (Bq.m⁻³)

- Doses efficaces par voie d'exposition interne par inhalation :**

Le tableau n°7 présente les valeurs de doses efficaces par voie d'exposition interne par inhalation pour le groupe de référence le plus exposé.

Scénario	Contribution des voies d'atteinte par inhalation	Enfant (1-2 ans)	Adulte
Scénario 1	Fluor 18	6,52E-06	5,59E-06
	Carbone 11	2,89E-07	2,13E-07
	Cuivre 64	7,12E-07	6,63E-07
	Gallium 68	3,80E-07	2,65E-07
	Exposition par inhalation (Sv/an)	7,90E-06	6,73E-06
	Exposition par inhalation (mSv/an)	7,90E-03	6,73E-03
Scénario 2	Fluor 18	1,25E-05	1,07E-05
	Carbone 11	5,59E-07	4,12E-07
	Cuivre 64	1,42E-06	1,33E-06
	Gallium 68	7,61E-07	5,30E-07
	Exposition par inhalation (Sv/an)	1,52E-05	1,30E-05
	Exposition par inhalation (mSv/an)	1,52E-02	1,30E-02

Tableau n°6 : Dose efficace par voie d'exposition interne par inhalation (mSv/an)

- Doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache :**

Le tableau n°8 présente les valeurs de doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache pour le groupe de référence le plus exposé.

Scénario	Contribution des voies d'atteinte par submersion dans le panache	Enfant (1-2 ans)	Adulte
Scénario 1	Fluor 18	1,85E-05	1,85E-05
	Carbone 11	2,31E-06	2,31E-06
	Cuivre 64	2,01E-07	2,01E-07
	Gallium 68	1,01E-06	1,01E-06
	Exposition par submersion (Sv/an)	2,21E-05	2,21E-05
	Exposition par submersion (mSv/an)	2,21E-02	2,21E-02
Scénario 2	Fluor 18	3,55E-05	3,55E-05
	Carbone 11	4,47E-06	4,47E-06
	Cuivre 64	4,02E-07	4,02E-07
	Gallium 68	2,02E-06	2,02E-06
	Exposition par submersion (Sv/an)	4,24E-05	4,24E-05
	Exposition par submersion (mSv/an)	4,24E-02	4,24E-02

Tableau n°7 : Dose efficace par voie d'exposition externe par submersion dans le panache (mSv/an)

- Doses efficaces totale reçue :**

Le tableau ci-dessous présente la contribution des isotopes à la dose efficace totale en mSv/an pour le groupe de référence le plus exposé.

Dose efficace totale reçue (mSv/an)	Enfant (1-2 ans)	Adulte
Scénario 1	3,00E-02	2,88E-02
Scénario 2	5,77E-02	5,54E-02

Tableau n°8 : Dose efficace totale d'exposition (mSv/an)

En conclusion, **la dose maximale reçue par les populations lors du rejet des effluents radioactifs de l'installation A.A.A est inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique pour le scénario 1 (situation actuelle autorisée) et pour le scénario 2 (en cas de situation accidentelle).**

Notons que la balise du réseau de mesures de la radioactivité dans l'environnement de l'IRSN les plus proches du site sont situées à Nanterre (5 km au nord-nord-est du site A.A.A.) et à Boulogne-Billancourt (3 km au Sud-Est du site). Ces balises fournissent des débits d'équivalents de dose moyen compris entre 70 et 90 nSv/h, soit une dose annuelle équivalente comprise entre 0,6 et 0,8 mSv/an.

Les doses estimées attribuables à A.A.A. pour un fonctionnement normal (Scénario 1) sont inférieures à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique, y compris avec le bruit de fond de la radioactivité dans l'environnement.

6.4.6 Résultats pour les travailleurs

- Scénario d'exposition :**

Les cibles considérées correspondent aux travailleurs du centre hospitalier. Il s'agit donc d'adultes (les enfants ne seront donc pas considérés pour ce scénario).

Le temps d'exposition considéré est : 47 semaines de 39 h chacune, soit 1833 h d'exposition par an.

- Activités maximales modélisées :**

Les activités maximales modélisées correspondent aux activités présentes à 20 m de hauteur (c'est-à-dire à l'altitude la plus pénalisante pour le bâtiment le plus exposé au rejet A.A.A.) au droit de la cheminée.

Les activités maximales modélisées et retenues pour évaluer l'exposition des travailleurs sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Fluor 18	Carbone 11	Cuivre 64	Gallium 68
Scénario 1	87	12	6	6
Scénario 2	174	24	12	12

Tableau n°9 : Activités maximales (Bq.m⁻³)

- Doses efficaces par voie d'exposition interne par inhalation :**

Le tableau n°10 présente les valeurs de doses efficaces par voie d'exposition interne par inhalation pour les travailleurs les plus exposés.

Scénario	Contribution des voies d'atteinte par inhalation	Adulte
Scénario 1	Fluor 18	4,05E-05
	Carbone 11	1,70E-06
	Cuivre 64	5,68E-06
	Gallium 68	2,27E-06
	Exposition par inhalation (Sv/an)	5,02E-05
	Exposition par inhalation (mSv/an)	5,02E-02
Scénario 2	Fluor 18	8,10E-05
	Carbone 11	3,41E-06
	Cuivre 64	1,14E-05
	Gallium 68	4,54E-06
	Exposition par inhalation (Sv/an)	1,00E-04
	Exposition par inhalation (mSv/an)	1,00E-01

Tableau n°10 : Dose efficace par voie d'exposition interne par inhalation (mSv/an)

• **Doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache :**

Le tableau n°11 présente les valeurs de doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache pour les travailleurs les plus exposés.

Scénario	Contribution des voies d'atteinte par submersion dans le panache	Adulte
Scénario 1	Fluor 18	2,81E-05
	Carbone 11	3,87E-06
	Cuivre 64	3,60E-07
	Gallium 68	1,81E-06
	Exposition par submersion (Sv/an)	3,42E-05
	Exposition par submersion (mSv/an)	3,42E-02
Scénario 2	Fluor 18	5,63E-05
	Carbone 11	7,74E-06
	Cuivre 64	7,21E-07
	Gallium 68	3,63E-06
	Exposition par submersion (Sv/an)	6,84E-05
	Exposition par submersion (mSv/an)	6,84E-02

Tableau n°11 : Dose efficace par voie d'exposition externe par submersion dans le panache (mSv/an)

• **Doses efficaces totale reçue :**

Le tableau ci-dessous présente la contribution des isotopes à la dose efficace totale en mSv/an pour les travailleurs les plus exposés.

Dose efficace totale reçue (mSv/an)	Adulte
Scénario 1	8,43E-02
Scénario 2	1,69E-01

Tableau n°12 : Dose efficace totale d'exposition (mSv/an)

En conclusion, la dose maximale reçue par les travailleurs lors du rejet des effluents radioactifs de l'installation A.A.A est inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique pour le scénario 1 (situation actuelle autorisée) et pour le scénario 2 (en cas de situation accidentelle).

Les doses estimées attribuables à A.A.A. pour un fonctionnement normal (Scénario 1) sont inférieures à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique, y compris avec le bruit de fond de la radioactivité dans l'environnement.

6.5. Hypothèses et sensibilité

6.5.1 Introduction

Cette Evaluation du Risque Sanitaire (ERS) radiologique a été conduite en utilisant dans un principe de prudence et de proportionnalité, les méthodes et les données recommandées par les organismes experts.

Néanmoins, la démarche d'ERS s'accompagne nécessairement d'une part d'incertitudes qui proviennent de lacunes ou d'imprécisions des données et de l'obligation de fixer des hypothèses.

Les hypothèses ont été fixées autant que possible dans le sens de la sécurité, dans le but de privilégier une surestimation des risques radiologiques.

Les principales sources d'incertitudes qui sous-estiment ou surestiment les risques sont :

- Les incertitudes sur l'identification et la quantification des émissions,
- Les incertitudes liées au modèle de dispersion atmosphérique utilisé,
- Les incertitudes sur l'exposition des populations et sur la variabilité des êtres humains aux différents facteurs.

Il n'est pas envisageable actuellement de quantifier l'incertitude sur le risque sanitaire final. L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales incertitudes, certaines surestiment le risque, d'autres le sous-estiment.

L'évaluation quantitative du risque sanitaire est une estimation du risque potentiel fondé sur les connaissances à la date d'élaboration de l'étude et sur un certain nombre d'hypothèses.

6.5.2 Incertainces sur l'identification et la quantification des émissions

L'inventaire des sources d'émissions, des radioéléments susceptibles d'être émis et de la quantification des flux émis a été réalisé sur la base du retour d'expérience de la société A.A.A.

6.5.3 Incertainces liées au modèle de dispersion atmosphérique

Les concentrations calculées sont représentatives de concentrations moyennées sur des volumes de 4 m³ et ne peuvent donc pas représenter des concentrations à des échelles plus petites.

La maquette 3D du bâti a été intégrée au modèle. La taille des mailles retenues (2x2 m) ne permet pas de prendre en compte les équipements présents sur les toits (centrales de traitement d'air, ...).

Compte tenu des temps de calcul, nous n'avons pas intégré de données météorologiques horaires sur une année entière. L'approche retenue consiste à réaliser une bibliothèque de

cas météorologiques considérés comme potentiellement les plus pénalisants susceptibles de conduire aux concentrations maximales au niveau des habitations.

6.5.4 Les incertitudes sur l'exposition des populations et sur la variabilité des êtres humains aux différents facteurs

Nous avons considéré de façon pénalisante que les populations étaient exposées 24 h/24 pendant la vie entière.

Il n'est pas tenu compte des déplacements en dehors du domaine d'étude, ni dans le domaine d'étude.

De nombreux facteurs relatifs à la diversité génétique (métabolisme, sensibilité au polluant, ...), au mode de vie (régime alimentaire, sédentarité,...), à l'état de santé (immunodéficience, ...) ne peuvent être intégrés dans l'étude de risque sanitaire.

6.5.5 Conclusion sur les incertitudes

Les hypothèses prises pour les valeurs des variables d'entrée de l'Evaluation du Risque Sanitaire et les coefficients de sécurité pris à chaque étape du processus, rendent peu probable une sous-estimation du risque pour les populations.

Rappelons que la dose maximale reçue par la population est un indicateur évalué avec les connaissances techniques du moment.

7 Synthèse

Conformément à l'article R1333.8 du Code de la Santé Publique, la limite de dose efficace annuelle totale, toutes voies d'exposition et tous isotopes confondus doit être inférieure à 1 mSv/an pour les personnes du public (hors exposition à la radioactivité naturelle et hors pratiques médicales).

Sur la base des recommandations et des guides de l'IRSN et de l'AIEA, une évaluation de la dose maximale reçue par les populations lors du rejet des effluents radioactifs de l'installation A.A.A a été réalisée. [La modélisation de la dispersion atmosphérique a été faite à l'aide d'un modèle 3D \(MSS\).](#)

- **Pour la population générale :**
 - ⇒ Cette dose maximale a été estimée pour l'enfant (population la plus vulnérable), à $3,00 \cdot 10^{-2}$ mSv/an pour le scénario 1 et à $5,77 \cdot 10^{-2}$ mSv/an pour le scénario 2. Ces doses sont inférieures à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique.
- **Pour les travailleurs les plus exposés du centre hospitalier :**
 - ⇒ Cette dose maximale a été estimée à $8,43 \cdot 10^{-2}$ mSv/an pour le scénario 1 et à $1,69 \cdot 10^{-1}$ mSv/an pour le scénario 2. Ces doses sont inférieures à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique.

Notons que la balise du réseau de mesures de la radioactivité dans l'environnement de l'IRSN les plus proches du site sont situées à Nanterre (5 km au nord-nord-est du site A.A.A.) et à Boulogne-Billancourt (3 km au Sud-Est du site). Ces balises fournissent des débits d'équivalents de dose moyens compris entre 70 et 90 nSv/h, soit une dose annuelle équivalente comprise entre 0,6 et 0,8 mSv/an.

Les doses estimées attribuables à A.A.A. pour un fonctionnement normal (Scénario 1) sont inférieures à la limite réglementaire de 1 mSv/an fixée par le code de la Santé Publique, y compris avec le bruit de fond de la radioactivité dans l'environnement.