



Etablissement AAA de Marseille (13)
Evaluation des Risques Sanitaires radiologiques

[REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]
 [REDACTED]

Indice	Date	Rédacteur	Approbateur
Rev0	27 novembre 2023	[REDACTED]	[REDACTED]



Sommaire

1	Contexte de l'étude	4
2	Démarche	4
3	Etape 1 : Description de l'installation et des rejets	5
3.1	Présentation de l'installation	5
3.2	Description des effluents rejetés	7
3.3	Point de rejet	8
3.4	Description des rejets	9
4	Etape 2 : Description de l'environnement	9
4.1	Environnement général	9
4.2	Conditions météorologiques	10
4.3	Sensibilité de l'environnement (radioactivité)	13
4.4	Descriptif de la population potentiellement exposée	13
4.5	Bâtiments	15
5	Etape 3 : Transferts dans l'environnement	15
5.1	Identification des voies de transfert	15
5.2	Modélisation de la dispersion atmosphérique	16
6	Etape 4 : Evaluation des doses reçues	23
6.1	Personnes représentatives	23
6.2	Calcul de dose	25
6.3	Hypothèses et sensibilité	31
7	Synthèse	34
	Annexe	36



Glossaire

AAA	Advanced Accelerator Applications
AIEA	International Atomic Energy Agency
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
ERS	Evaluation des Risques Sanitaires
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



1 Contexte de l'étude

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. Ils sont destinés aux patients pour le diagnostic TEP (Tomographie par Emission de Positons), technique d'imagerie médicale.

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.

Le site AAA de Marseille (13) a fait l'objet d'une évaluation des risques sanitaires radiologiques en 2016.

Dans le cadre du renouvellement de l'autorisation ASN du site (portant sur la détention, l'utilisation d'un cyclotron, la fabrication des radionucléides émetteurs de positons et des produits en contenant au moyen d'un cyclotron), l'évaluation des impacts des rejets à l'atmosphère du site doit faire l'objet d'une mise à jour.

Cette mise à jour, objet du présent rapport, est réalisée :

- Conformément au projet de Guide pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation Cyclotron - Pôle Santé et Environnement - Rapport IRSN N° 2021 ;
- En tenant compte du retour de l'ASN sur les études similaires, à savoir que la modélisation de la dispersion atmosphérique attendue doit être la plus représentative possible compte tenu des contraintes de temps de calcul.

2 Démarche

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact radiologique sur la santé des populations du site A.A.A de Marseille en fonctionnement normal et de comparer les résultats obtenus aux limites réglementaires. Cette évaluation est réalisée conformément au projet de Guide pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation Cyclotron - Pôle Santé et Environnement - Rapport IRSN N° 2021.

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

- Etape 1 : description de l'installation et des rejets ;
- Etape 2 : description de l'environnement de l'installation ;
- Etape 3 : identification des transferts dans l'environnement par l'identification des voies de transfert, et leur modélisation via l'évaluation de la dispersion des radionucléides dans l'atmosphère et des transferts de radionucléides dans les compartiments de l'environnement ;
- Etape 4 : évaluation des doses par l'identification des voies d'exposition, de la personne représentative et le calcul des doses reçues par celle-ci.

Conformément à l'article R. 1333-8 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 le



public¹ (hors exposition à la radioactivité naturelle et hors pratiques médicales). L'évaluation de l'impact radiologique est donc réalisée vis-à-vis de cette dose limite.

3 Etape 1 : Description de l'installation et des rejets

3.1 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 positons (TEP).

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

L'exploitation du cyclotron est aujourd'hui dédiée entièrement 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.

Le site est implanté sur la commune de Marseille, au sein du groupe hospitalier de la Timone. 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 localisation du site est repérée sur l'extrait de carte IGN au 1/25 000^{ème} ci-après.

¹ Population générale



Figure 1 : Localisation de la société A.A.A., site de Marseille (extrait Géoportail®)

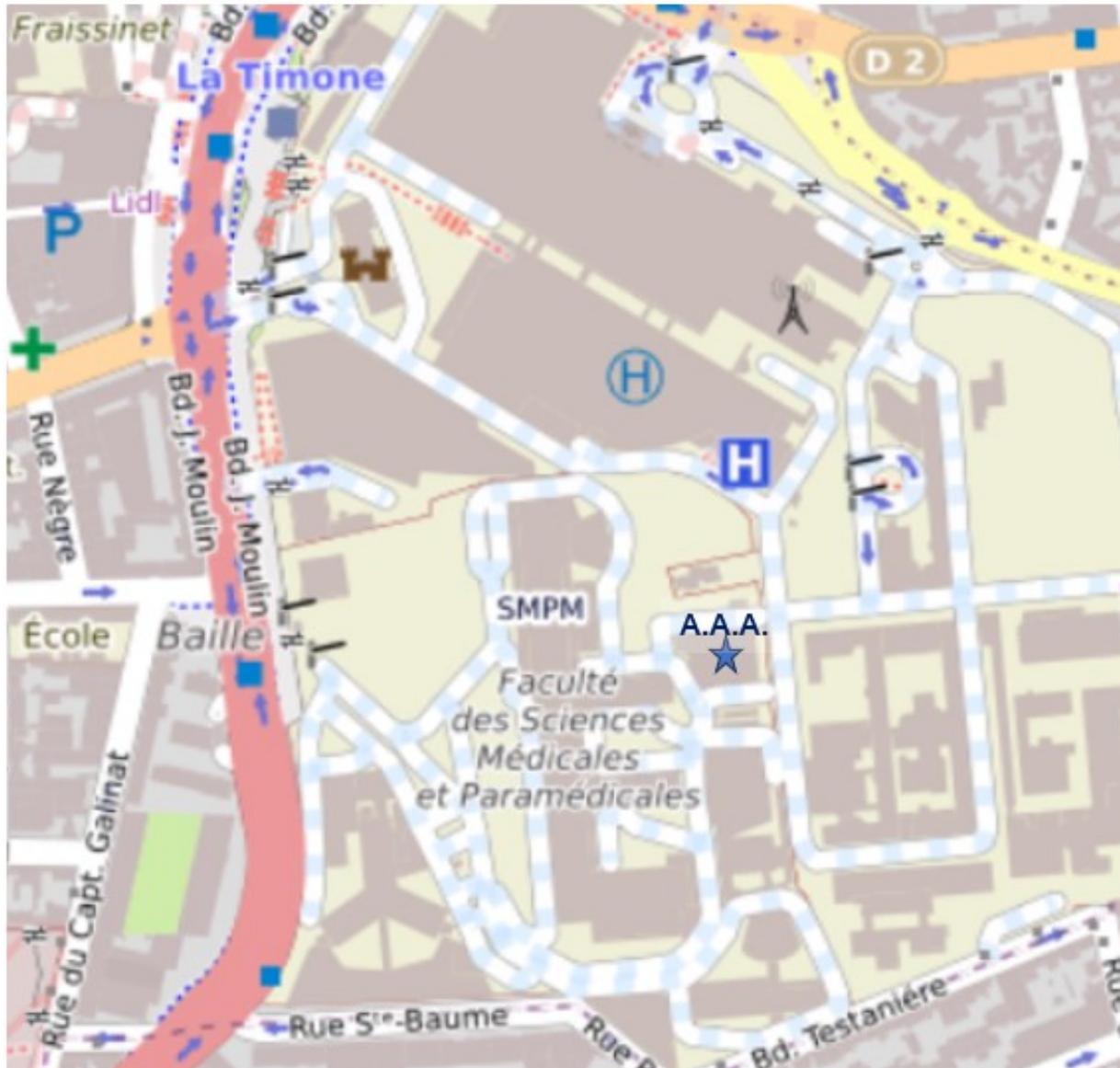


Figure 2 : Localisation de la société A.A.A., site de Marseille au sein du groupe hospitalier de la Timone (extrait Géoportail®)

3.2 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 du Fluor-18).

L'activité du site est susceptible de générer un rejet atmosphérique lié au procédé de fabrication :

- Le module de synthèse peut présenter des traces de fluor 18 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) ainsi que des barrières de filtration (filtres charbon actif), le rejet final est susceptible de présenter une activité résiduelle.

3.3 Point de rejet

Les rejets gazeux radioactifs s'effectuent au niveau de la cheminée, en toiture du bâtiment. 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 ci-après.

Tableau 1 : Caractéristiques du point de rejet atmosphérique

Données	Point de rejet
X (m)	849 260
Y (m)	1 814 449
Hauteur (m)	11
Débit (m ³ /h)	12 000
Diamètre du débouché (m)	0,9
Configuration du rejet (rejet vertical vers le haut, vers le bas, horizontal (en façade, etc.)	Horizontal vers la direction 170°
	
Température (°C)	20°C
Vitesse d'éjection (m/s)	5 m/s

Nota : la vitesse d'émission a été intégrée à l'outil de modélisation de la dispersion atmosphérique sous forme de vitesse horizontale (vecteurs x et y).

3.4 Description des rejets

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.

Les effluents gazeux produits par l'installation durant son exploitation en fonctionnement normal contiennent du fluor 18.

L'activité annuelle des radionucléides rejetés par le point d'émission est présentée dans le tableau ci-après. Ces émissions annuelles intègrent les aléas de fonctionnement (hors situation accidentelle).

Tableau 2 : Terme source des rejets atmosphériques

Radionucléides	Activité maximale annuelle rejetée (GBq/an)	Répartition de ces émissions
Fluor 18 ¹⁸ F	600	Les émissions ont lieu de 2h du matin à 14h de l'après-midi du lundi au vendredi, toute l'année

Le F18 émis est sous forme gazeuse et d'aérosol très fin.

4 Etape 2 : Description de l'environnement

La description de l'environnement doit permettre d'identifier les voies de transfert potentielles, de choisir une modélisation adaptée pour les transferts des radionucléides dans l'environnement et d'identifier les voies d'exposition ainsi que les personnes représentatives.

4.1 Environnement général

Le site est situé sur la commune de Marseille, au sein du Groupe hospitalier de la Timone, dans un environnement très urbanisé.



Figure 3 : Occupation des sols (Géoportail®)

Notons la présence :

- Des bâtiments du groupe hospitalier et de la faculté de médecine à proximité immédiate du point de rejet ;
- D'une crèche à près de 160 m au sud-est du point de rejet ;
- D'habitations à près de 200 m au sud et au sud-est du point de rejet, et à près de 300 m à l'est du point de rejet.

4.2 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques du site sont caractérisées sur la base des données de la station météorologique de Marseille-Marignane, située à 20 km au nord-ouest du site, dans un contexte topographique similaire.

Pour les besoins de l'étude, les trois dernières années de données horaires (2020-2021-2022) ont été acquises.

4.2.1 Les vents

La rose des vents par classes de vitesses pour cette période est présentée ci-après.

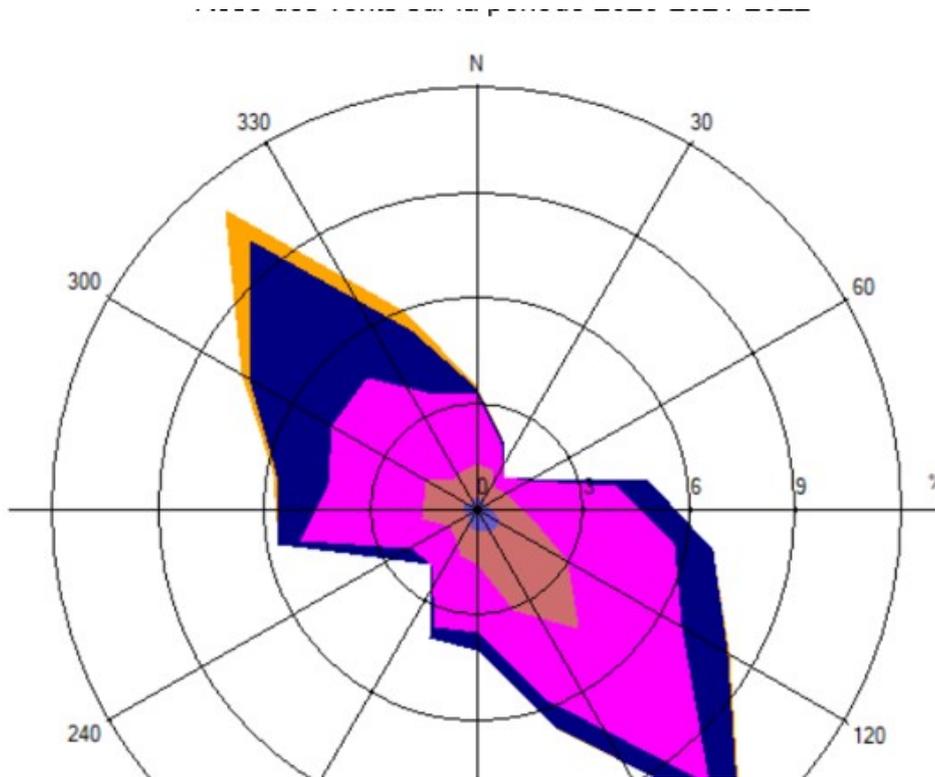


Figure 4 : Rose des vents de Marseille-Marignane (période 2020-2021-2022)

Les vents dominants proviennent du sud-est (entre 90 et 170°) et du nord-ouest (entre 280 et 350°).

La vitesse moyenne du vent est de 4,29 m/s, soit 15 km/h.

La classe de vitesse la plus fréquente correspond aux vents compris entre 3 et 6 m/s (représente 44,8% des occurrences).

Les vents forts (de 7 à 13 m/s) à très fort (> 13 m/s) représentent en tout 21,5% des occurrences.

Les vents calmes (< 1 m/s) sont peu fréquents avec 7,9% des occurrences.

4.2.2 Les classes de stabilité de l'atmosphère

La stabilité de l'atmosphère est le paramètre le plus complexe à connaître car, dans la majorité des cas, elle n'est pas mesurée. Ce paramètre destiné à quantifier les propriétés diffusives de l'air dans les basses couches, conduit à distinguer 6 catégories de stabilité de l'atmosphère :

Tableau 3 : Définition des classes de stabilité de l'atmosphère

Classe A : Très fortement instable	Dans de telles situations, la dispersion des polluants est facilitée. Ces situations apparaissent par fort réchauffement du sol. Elles se retrouvent principalement le jour en l'absence de vent fort.
Classe B : Très instable	
Classe C : Instable	
Classe D : Neutre	Ces situations permettent la dispersion des polluants. Elles correspondent aux situations de vents modérés ou à des situations de ciel couvert.
Classe E : Stable	De telles situations freinent le déplacement des masses d'air. Elles sont notamment induites par des inversions thermiques près du sol, ce qui limite la dispersion des polluants. Ces situations se retrouvent principalement la nuit par vent faible.
Classe F : Très stable	

Ces classes de stabilité sont déterminées à partir de la vitesse du vent et de la nébulosité.

Il est important de rechercher des chroniques météorologiques représentatives de la climatologie du site.

Le diagramme suivant présente la répartition des observations de la station météorologique de Marseille-Marignane en fonction de la stabilité atmosphérique.

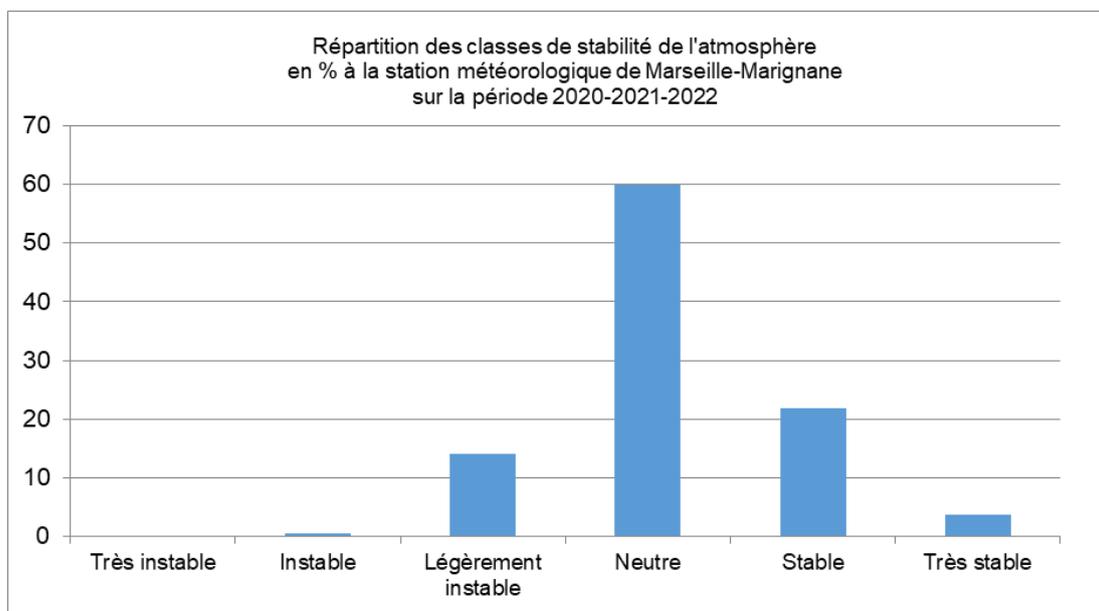


Figure 5 : Répartition des classes de stabilité de Pasquill à Marseille-Marignane (période 2020-2021-2022)



Les conditions de dispersion sont assez favorables puisque 75% des observations présentent une atmosphère neutre à très instable (conditions assez favorables à la dispersion), tandis que 25 % présentent une atmosphère stable à très stable (conditions peu favorables à la dispersion).

4.2.3 La température et les précipitations

La température de l'air en moyenne sur la période des 3 années de données est de 10,7°C.

Les précipitations annuelles en moyenne sur la période des 3 années de données est de 442,8 mm.

4.3 Sensibilité de l'environnement (radioactivité)

La balise du Réseau Nationale de Mesures de la radioactivité de l'environnement² la plus proche est située sur l'emprise de la préfecture des Bouches-du-Rhône à Marseille³ (à près de 2 km à l'ouest du site).

Les résultats de cette surveillance en débit d'équivalent de dose (moyenne annuelle) sont présentés ci-après pour les 3 dernières années.

Tableau 4 : Résultats de la surveillance

Année	Débit d'équivalent de dose (moyenne annuelle) en nSv/h
2020	70,1
2021	70,0
2022	69,4

En France, les débits d'équivalents de dose sont compris entre 10 et 250 nSv/h selon les régions.

Il peut donc être considéré que les débits d'équivalents de dose moyens mesurés autour du site sont normaux.

Sur la base de 8 776 heures dans une année, une estimation peut être effectuée pour déterminer une dose annuelle à partir du débit de dose moyen de l'année 2020. Cette dose serait de 0,62 mSv/an à Marseille.

4.4 Descriptif de la population potentiellement exposée

Le bâtiment le plus proche (hors bâtiment A.A.A.), sont des bâtiments de la faculté de médecine ou des services du groupe hospitalier de la Timone.

Notons également la présence d'une crèche et d'habitations dans un rayon de 300 m autour du site.

² <https://www.mesure-radioactivite.fr>

³ Notons que la surveillance sur Lille (station retenue dans les précédentes versions de l'étude) n'est plus réalisée depuis avril 2014, ce qui explique que nous retenions Arras dans la présente version.



Figure 6 : Localisation des cibles potentiellement les plus exposées (et/ou les plus sensibles)

Les cibles retenues sont les cibles potentiellement les plus exposées, à savoir :

- Les travailleurs / personnels / étudiants en médecine de la faculté de médecine et du groupe hospitalier de la Timone. Notons que ces travailleurs / étudiants ne sont pas présents 100 % du temps.
- Les patients qui viennent en consultation ou qui sont hospitalisés dans les différents services du groupe hospitalier de la Timone. Pour les personnes hospitalisées (adultes et enfants), une exposition de 100% du temps pendant une année entière pourrait être considérée (hypothèse majorante).
- Les populations riveraines (maisons situées au sud, au sud-est et à l'est du site) : adultes et enfants.

Ces travailleurs / personnels / étudiants en médecine et patients du groupe hospitalier de la Timone sont potentiellement les plus exposés (ceci est confirmé par la modélisation de la dispersion atmosphérique : les cibles les plus exposées correspondent aux bâtiments les plus proches). Les riverains, la crèche, sont plus éloignés et nettement moins exposés.

4.5 Bâtiments

Notons la présence de bâtiment dans l'environnement immédiat du bâtiment A.A.A. Ces bâtiments sont susceptibles d'influencer localement les champs de vent.

Ainsi, une maquette 3D du bâti situé dans l'environnement du site et potentiellement impacté par les rejets du site a été réalisée : celle-ci a été intégrée au modèle de dispersion atmosphérique (voir la *Figure 6* et les cartes au § 5.2.4).

5 Etape 3 : Transferts dans l'environnement

Pour mémoire, les effluents liquides potentiellement radioactifs sont confinés sur le site jusqu'à décroissance des radioéléments. Par conséquent le risque d'exposition interne par ingestion sur les populations n'est pas retenu.

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

Ce sont les expositions liées aux rejets atmosphériques qui sont donc évaluées dans la suite de l'étude.

5.1 Identification des voies de transfert

Les rejets atmosphériques de radionucléides sont potentiellement à l'origine :

- d'une contamination de l'air,
- d'une contamination des sols, des végétaux, des produits animaux (viande, œufs, lait) via les dépôts secs (pour les émissions sous forme particulaire ou d'aérosols) et les dépôts humides (liés au lessivage des concentrations atmosphériques par la pluie).

L'exposition des populations est donc susceptible de se faire par les voies d'exposition suivantes :

- L'exposition interne par inhalation ;
- L'exposition externe par submersion dans le panache ;
- L'exposition externe par les dépôts surfaciques au sol ;
- L'exposition interne par : ingestion de sol (en particulier pour les enfants lors des jeux à l'extérieur), consommation de fruits et légumes, consommation de produits animaux.

Pour mémoire, le F18 émis est sous forme gazeuse et potentiellement d'aérosol très fin.

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.



La période du F18 est présentée ci-après.

Tableau 5 : Période du Fluor 18

Paramètre	Période
Fluor 18	1,83 h ⁴ 6 586 s

S'agissant d'effluents gazeux (ou d'aérosols très fins) de radioéléments ayant une période de demi-vie courte (< 2 heures), les voies de contamination par exposition interne par inhalation et l'exposition externe par submersion dans le panache sont considérées comme les voies d'exposition prépondérantes.

L'exposition externe par les dépôts surfaciques au sol a toutefois été évaluée.

Pour mémoire, le Fluor 18 a une demi-vie de moins de 2 h. Ainsi, l'exposition interne par ingestion d'aliments (végétaux, produits animaux) est considérée comme peu significative au regard des autres voies d'exposition prépondérantes citées ci-avant.

En effet, la courte demi-vie du Fluor 18 (< 2 heures) conduit à une rapide décroissance des concentrations dans les produits entre leur récolte (qui correspond à la fin de l'exposition) et leur consommation.

Ceci est particulièrement vrai pour la viande (abattage, conditionnement, transport, ...) et tous les produits qui font l'objet d'une commercialisation (préparation, vente, ...).

D'autre part, les résultats de la modélisation (§ 5.2.4) montrent que la zone d'influence des dépôts totaux est relativement peu étendue (localisée dans un rayon de l'ordre de 180 m autour du site). Dans cette zone, il n'a pas été recensé de potagers permettant une autoconsommation significative.

Ainsi, la voie d'exposition interne par consommation d'aliments est considérée comme négligeable et n'a pas été retenue dans la suite de l'étude.

5.2 Modélisation de la dispersion atmosphérique

La modélisation de la dispersion atmosphérique a pour objectif d'évaluer les concentrations et les dépôts totaux (dépôts secs + dépôts humides) dans l'environnement du point de rejet.

5.2.1 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 acceptables pour permettre de simuler la dispersion des émissions de l'exutoire considéré.

Les concentrations et dépôts totaux sont calculés sur un maillage dense de points permettant de créer des iso-contours de concentrations précis.

⁴ Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants



- **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 cisailé, 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.

5.2.2 Conditions météorologiques retenues

Rappel : Les conditions météorologiques du site sont caractérisées sur la base des données de la station météorologique de Marseille-Marignane, située à 20 km au nord-ouest du site, dans un contexte topographique similaire.

Pour les besoins de l'étude, les trois dernières années de données horaires (période 2020-2021-2022) ont été acquises. Il s'agit de données météorologiques réelles, représentatives du secteur d'étude.

Ces données sont présentées au § 4.2.

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

Une analyse météorologique (voir en Annexe) des 3 années de données a été réalisée afin d'identifier l'année la plus représentative des conditions météorologiques de la période.

C'est l'année 2020 qui a été retenue comme la plus représentative du point de vue des conditions de vents et de stabilité de l'atmosphère, et qui présente le cumul des précipitations permettant de ne pas sous-estimer les concentrations atmosphériques (qui correspondent à la matrice d'exposition prépondérante pour les rejets atmosphériques de Fluor18).

L'intégration de ces données météorologique horaires sur une année permet de réaliser un calcul statistique de dispersion atmosphérique. Dans le cadre de la présente étude, ce sont les concentrations moyennes annuelles et les dépôts moyens annuels qui seront calculés.

5.2.3 Paramètres retenus

Les principales options de calcul retenues pour cette modélisation sont :

- La prise en compte des bâtiments (maquette 3D du bâti) ;
- Le calcul des concentrations en moyenne horaire sur des mailles de 5 m x 5 m dans le plan horizontal ;
- Prise en compte de 15 niveaux verticaux répartis entre 0 et 150 m d'altitude, dont 10 niveaux dans la zone de bâti entre 0 et 36 m.

Ce paramétrage présente un bon compromis pour la prise en compte du bâti de façon satisfaisante, tout en s'accompagnant d'un temps de calcul raisonnable compte tenu des dimensions du domaine d'étude.

Pour information, la taille du domaine d'étude a été déterminée par des tests réalisés à l'aide d'un modèle gaussien (de mise en œuvre rapide) qui a permis d'estimer la zone d'influence des émissions atmosphériques étudiées.

Une attention a été portée à ce que le domaine d'étude retenu intègre les cibles identifiées au § 4.4 et potentiellement les plus impactées.



Sur le domaine étudié, un seul type d'occupation des sols est présent : tissu urbain discontinu. Ces paramètres permettent de déduire les grandeurs nécessaires au calcul de la turbulence.

Les paramètres retenus pour le calcul des dépôts sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Paramètres pour le calcul des dépôts

Polluant	Phase du polluant	Vitesse de dépôt sec (m/s)	Coefficient de lessivage (s ⁻¹)	Diamètre de particules	Source bibliographique
Fluor 18	Particules	5.10 ⁻³	2.10 ⁻⁴	1 µm	CERES (Code d'Evaluations Rapides Environnementales et Sanitaires)

5.2.4 Résultats de la modélisation de la dispersion atmosphérique

Les résultats sont exprimés en :

- Concentration moyenne annuelle dans l'air à hauteur d'homme en Bq/m³

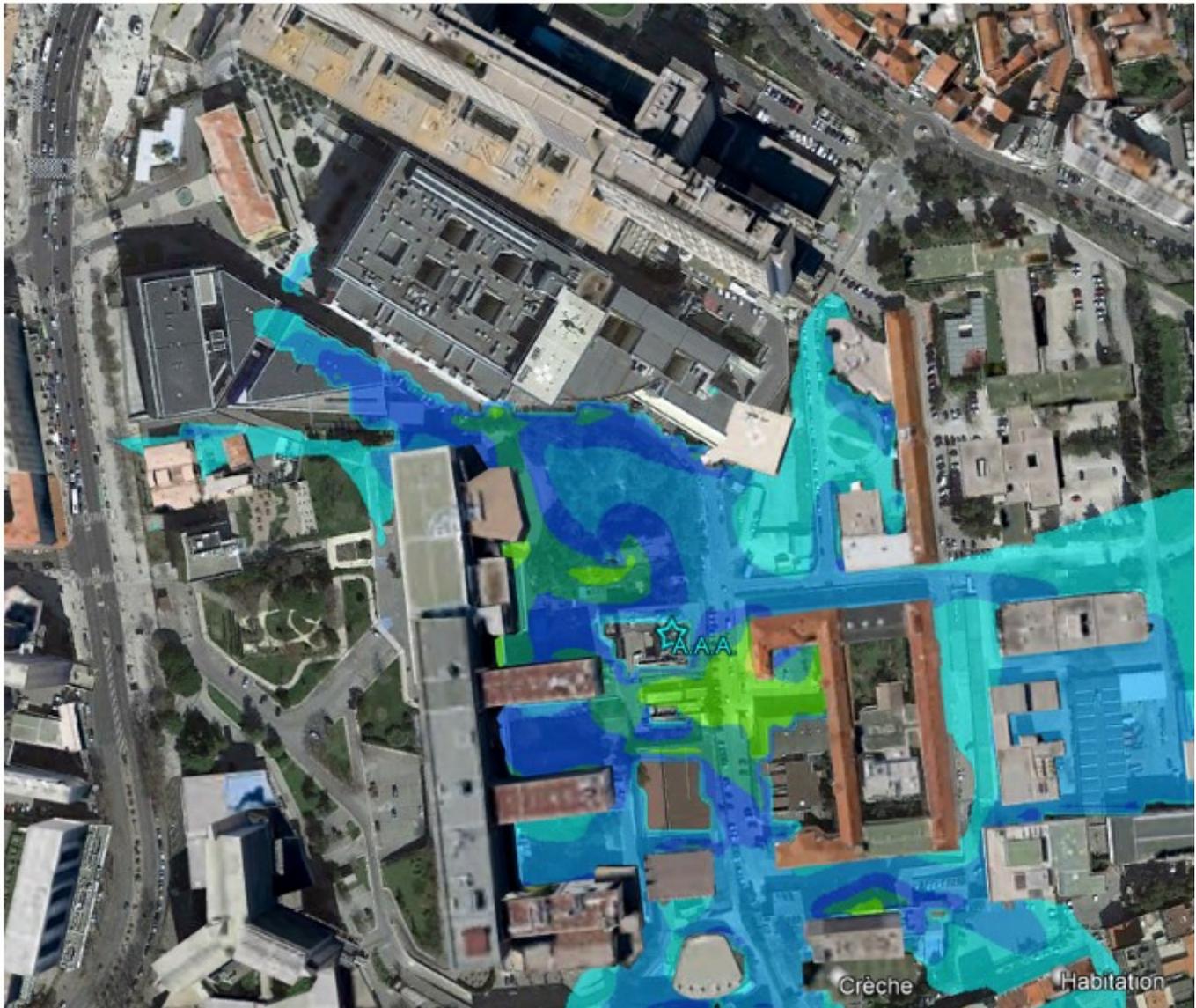


Figure 7 : Concentration moyenne annuelle (Fluor 18 attribuable à A.A.A)

- Dépôt total (dépôt sec + dépôt humide) au sol en Bq/m²/s.



Figure 8 : Dépôt total en moyenne annuelle (Fluor 18 attribuable à A.A.A)

Les résultats au niveau des cibles potentiellement les plus exposées sont présentés dans le tableau ci-après (nous renvoyons le lecteur à la *Figure 6* pour la localisation de ces cibles).

Tableau 7 : Résultats de la modélisation aux cibles potentiellement les plus exposées

	Concentration moyenne annuelle	Dépôts totaux en moyenne annuelle
Unité	Bq/m ³	Bq/m ² s
Faculté de médecine	1,45E+01	7,25E-02
Hôpital avec présence de patients (consultations et soins)	3,12E+00	1,56E-02
Crèche (située à près de 160 m au sud-sud-est du point de rejet)	2,37E-01	1,19E-03
Habitation la plus exposée (située à près de 210 m au sud-sud-est du point de rejet)	1,52E-01	7,60E-04

Les cibles les plus exposées sont :

- **La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes) ;**
- **L'hôpital (service de dermatologie) : les travailleurs (adultes) et patients (adultes et enfants) pouvant être en consultation ou en soins longue durée.**

Dans une hypothèse majorante, ce sont les patients (adultes et enfants) en soins longue durée qui ont été retenus pour l'évaluation de l'impact sur la santé.

6 Etape 4 : Evaluation des doses reçues

L'évaluation des doses reçues est réalisée en tenant compte des personnes représentatives parmi les cibles potentiellement les plus exposées et des voies d'exposition identifiées.

6.1 Personnes représentatives

Les résultats de la modélisation ont permis d'identifier les cibles potentiellement les plus exposées aux rejets atmosphériques de A.A.A. Pour ces cibles, les paramètres retenus pour caractériser l'exposition de ces personnes représentatives sont définies dans les tableaux ci-après.

- **La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes)**

Tableau 8 : Paramètres pour les travailleurs / enseignants et étudiants

Paramètre	Unité	Valeur	Commentaire
Groupe socio-professionnel	-	Travailleurs / enseignants et étudiants	Concerne le bâtiment de la faculté de médecine situé à quelques dizaines de mètres à l'ouest du point de rejet
Classes d'âge retenues	-	Adulte	"Adulte" = unique classe d'âge retenue pour cette cible (pas de présence d'enfants)
Durée de présence annuelle dans les locaux	h/an	2350	Hypothèse retenue : 10 h/j, 5j/semaine, 47 semaines/an
	s/an	8460000	Pendant les heures de travail/d'étude, il n'est pas tenu compte de facteur d'atténuation par le bâti (hypothèse majorante)
Fraction annuelle de temps d'exposition aux dépôts	-	2,68E-01	Hypothèse retenue : idem temps de présence sur le lieu de travail/d'étude, pas de facteur d'atténuation lors du temps de présence dans le bâtiment (hypothèse majorante)
Débit respiratoire considéré	m ³ /h	1,18	Pour un homme adulte lors du temps de travail (hypothèse majorante : le débit respiratoire pour une femme lors du temps de travail est de 0,96 m ³ /h) Source : Publication 66 - CIPR - Table B.16.B

▪ **Patients en soins longue durée (adultes et enfants)**

Tableau 9 : Paramètres pour les patients en soins longue durée

Paramètre	Unité	Valeur	Commentaire
Groupe socio-professionnel	-	Patients en soins longue durée	Concerne les bâtiments du groupe hospitalier de la Timone situés à environ 60 m au sud-est du point de rejet
Classes d'âge retenues	-	Toutes	Enfant (< 1 an) jusqu'à l'adulte (6 classes d'âge)
Durée de présence annuelle dans le logement ou jardin pour l'exposition interne par inhalation et pour l'exposition externe par submersion dans le panache	h/an	8772	Hypothèse retenue : 100% du temps pour l'exposition interne par inhalation et pour l'exposition externe par submersion dans le panache (hypothèse majorante car correspond à une durée d'hospitalisation de 1 an). Il n'est pas tenu compte de facteur d'atténuation par le bâti pour le temps de présence dans le bâtiment (hypothèse majorante)
	s/an	31579200	
Fraction annuelle de temps d'exposition aux dépôts	-	1,00E+00	Exposition 100% du temps (hypothèse majorante car correspond à une durée d'hospitalisation de 1 an). Hypothèse retenue : pas de facteur d'atténuation lors du temps de présence dans le bâtiment (hypothèse majorante)
Débit respiratoire considéré	m3/h	Voir ci-après détail par classe d'âge	Débit respiratoire moyen journalier pour chaque classe d'âge considérée Source : Publication 66 - CIPR - Table B.16.A et Table B.16.B

Tableau 10 : Débit respiratoire moyen journalier par tranche d'âge

Unité	< 1 an	1 à 2 ans	3 à 7 ans (enfant dit de 5 ans)	8 à 12 ans (enfant dit de 10 ans)	13 à 17 ans (adolescent dit de 15 ans)	Adulte (> 17 ans)
m3/h	0,12	0,22	0,37	0,64	0,84	0,95

Toutes les autres cibles, et notamment la crèche et les habitations (situées respectivement à 160 m au sud-sud-est et à 210 m au sud-sud-est du point de rejet), sont plus éloignées et au vu de la modélisation, nettement moins exposées que les cibles retenues ci-avant.

Notons que l'exposition des personnes représentatives étudiées au niveau de la faculté de médecine et du groupe hospitalier de la Timone les plus exposées (ces derniers comprennent des patients adultes et des patients enfants de tout âge), est donc considérée comme « enveloppe » de l'exposition de l'ensemble des cibles potentiellement exposées.

L'exposition des cibles retenues est considérée « enveloppe » de l'ensemble des cibles potentiellement exposées.

6.2 Calcul de dose

Pour mémoire, les voies d'exposition retenues sont (voir justification au § 5.1) :

- Exposition interne par inhalation ;
- Exposition externe par submersion dans le panache sont considérées comme les voies d'exposition prépondérantes ;
- Exposition externe par les dépôts surfaciques au sol.

Toutes les hypothèses, valeurs retenues pour l'évaluation des doses efficaces d'exposition sont précisées dans les tableaux des § 6.2.1, § 6.2.2 et § 6.2.3.

6.2.1 Calcul de dose par voie d'exposition interne par inhalation

- **La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes)**

Tableau 11 : Calcul de dose pour l'exposition interne par inhalation – Travailleurs / enseignants et étudiants

Paramètre		Unité	Valeur	Source / Commentaire
Activité maximale modélisée : Concentration		Bq/m ³	14,50	Concentration modélisée en moyenne annuelle
Durée de présence annuelle dans les locaux pour l'exposition interne par inhalation et pour l'exposition externe par submersion dans le panache		h/an	2350	Hypothèse retenue : 10 h/j, 5j/semaine, 47 semaines/an
Débit respiratoire considéré		m ³ /h	1,18	Pour un homme adulte lors du temps de travail (hypothèse majorante : le débit respiratoire pour une femme lors du temps de travail est de 0,96 m ³ /h) Source : Publication 66 - CIPR - Table B.16.B
Coefficient de dose pour l'exposition interne par inhalation		Sv.Bq ⁻¹	5,90E-11	Source : Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultats de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants Tableau 1.2
Calcul de dose efficace	Dose efficace par voie d'exposition interne par inhalation	Sv/an	2,37E-06	-

▪ **Patients en soins longue durée (adultes et enfants)**

Tableau 12 : Calcul de dose pour l'exposition interne par inhalation – Patients en soins longue durée

Paramètre	Unité	Valeur	Source / Commentaire
Activité maximale modélisée : Concentration	Bq/m ³	3,12	Concentration modélisée en moyenne annuelle
Durée de présence annuelle dans les locaux pour l'exposition interne par inhalation et pour l'exposition externe par submersion dans le panache	h/an	8772	Hypothèse retenue : 100% du temps pour l'exposition interne par inhalation et pour l'exposition externe par submersion dans le panache.

Classes d'âge	-	< 1 an	1 à 2 ans	3 à 7 ans (enfant dit de 5 ans)	8 à 12 ans (enfant dit de 10 ans)	13 à 17 ans (adolescent dit de 15 ans)	Adulte (> 17 ans)
Débit respiratoire considéré	m ³ /h	0,12	0,22	0,37	0,64	0,84	0,95
Coefficient de dose pour l'exposition interne par inhalation	Sv.Bq ⁻¹	4,20E-10	3,10E-10	1,50E-10	1,00E-10	7,30E-11	5,90E-11
Calcul de dose efficace	Doses efficaces par voie d'exposition interne par inhalation Sv/an	1,37E-06	1,84E-06	1,50E-06	1,74E-06	1,67E-06	1,53E-06

Nota : Concernant l'exposition interne par inhalation, c'est la tranche d'âge des enfants de 1 à 2 ans qui est la plus exposée (dose efficace la plus élevée).

6.2.2 Calcul de dose par voie d'exposition externe par submersion dans le panache

- **La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes)**

Tableau 13 : Calcul de dose pour l'exposition externe par submersion dans le panache – Travailleurs / enseignants et étudiants

Paramètre		Unité	Valeur	Source / Commentaire
Activité maximale modélisée : Concentration		Bq/m ³	14,50	Concentration modélisée en moyenne annuelle
Durée de présence annuelle dans les locaux pour l'exposition interne par inhalation et pour l'exposition externe par submersion dans le panache		s/an	8460000	Hypothèse retenue : 10 h/j, 5j/semaine, 47 semaines/an Il n'est pas tenu compte de facteur d'atténuation par le bâti pour le temps de présence dans le bâtiment (hypothèse majorante)
Coefficient de dose pour l'exposition externe par submersion dans le panache		Sv Bq-1 s-1 m ³	4,40E-14	Source : FEDERAL GUIDANCE REPORT NO. 15 EXTERNAL EXPOSURE TO RADIONUCLIDES IN AIR, WATER AND SOIL Table 4-6.
Calcul de dose efficace	Doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache	Sv/an	5,40E-06	-

- **Patients en soins longue durée (adultes et enfants)**

Tableau 14 : Calcul de dose pour l'exposition externe par submersion dans le panache – Patients en soins longue durée

Paramètre		Unité	Valeur	Source / Commentaire
Activité maximale modélisée : Concentration		Bq/m ³	3,12	Concentration modélisée en moyenne annuelle
Durée de présence annuelle dans les locaux pour l'exposition interne par inhalation et pour l'exposition externe par submersion dans le panache		s/an	31579200	Hypothèse retenue : 100% du temps pour l'exposition externe par submersion dans le panache. En effet, il n'est pas tenu compte de facteur d'atténuation par le bâti pour le temps de présence dans le logement (hypothèse majorante)

Classes d'âge		-	< 1 an	1 à 2 ans	3 à 7 ans (enfant dit de 5 ans)	8 à 12 ans (enfant dit de 10 ans)	13 à 17 ans (adolescent dit de 15 ans)	Adulte (> 17 ans)
Coefficient de dose pour l'exposition externe par submersion dans le panache		Sv Bq-1 s-1 m ³	5,90E-14	5,55E-14	5,27E-14	5,01E-14	4,60E-14	4,40E-14
Calcul de dose efficace	Doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache	Sv/an	5,81E-06	5,47E-06	5,19E-06	4,94E-06	4,53E-06	4,34E-06

Nota : Concernant l'exposition externe par submersion dans le panache, c'est la tranche d'âge des enfants de moins de 1 ans qui est la plus exposée (dose efficace la plus élevée).

6.2.3 Calcul de dose par voie d'exposition externe aux dépôts au sol

- **La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes)**

Tableau 15 : Calcul de dose pour l'exposition externe aux dépôts au sol – Travailleurs / enseignants et étudiants

Paramètre	Unité	Valeur	Source / Commentaire
Activité maximale modélisée : Dépôt total (dépôt sec + dépôt humide)	Bq.m-2.s-1	7,25E-02	Dépôts total modélisé en moyenne annuelle
Fraction annuelle de temps d'exposition aux dépôts	-	2,68E-01	Hypothèse retenue : idem temps de présence sur le lieu de travail/d'études, pas de facteur d'atténuation lors du temps de présence dans le bâtiment (hypothèse majorante)
Constante de décroissance radioactive du radionucléide	s-1	1,05E-04	Calcul = $\ln(2) / (\text{Période du F18 en seconde})$ Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants Tableau 1.2
Temps de fonctionnement de l'installation à l'origine du rejet	s	947116800	Hypothèse retenue : 30 ans
Coefficient de dose pour l'exposition externe aux dépôts	Sv.s-1/Bq.m-2	6,49E-16	Source : FEDERAL GUIDANCE REPORT NO. 15 EXTERNAL EXPOSURE TO RADIONUCLIDES IN AIR, WATER AND SOIL Table 4-1.
Calcul de dose efficace	Doses efficaces par voie d'exposition externe aux dépôts au sol	Sv/an	3,77E-06

▪ **Patients en soins longue durée (adultes et enfants)**

Tableau 16 : Calcul de dose pour l'exposition externe aux dépôts au sol – Patients en soins longue durée

Paramètre	Unité	Valeur	Source / Commentaire
Activité maximale modélisée : Dépôt total (dépôt sec + dépôt humide)	Bq.m-2.s-1	1,56E-02	Dépôts total modélisé en moyenne annuelle au niveau des bâtiments du groupe hospitalier de la Timone avec présence de patients
Fraction annuelle de temps d'exposition aux dépôts	-	1,00E+00	Exposition 100% du temps (hypothèse majorante car correspond à une durée d'hospitalisation de 1 an). Hypothèse retenue : pas de facteur d'atténuation lors du temps de présence dans le bâtiment (hypothèse majorante)
Constante de décroissance radioactive du radionucléide	s-1	1,05E-04	Calcul = $\ln(2) / (\text{Période du F18 en seconde})$ Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants Tableau 1.2
Temps de fonctionnement de l'installation à l'origine du rejet	s	947116800	Hypothèse retenue : 30 ans
Coefficient de dose pour l'exposition externe aux dépôts	Sv.s-1/Bq.m-2	Voir ci-après détail par classe d'âge	Source : FEDERAL GUIDANCE REPORT NO. 15 EXTERNAL EXPOSURE TO RADIONUCLIDES IN AIR, WATER AND SOIL Table 4-1.

Classes d'âge	-	< 1 an	1 à 2 ans	3 à 7 ans (enfant dit de 5 ans)	8 à 12 ans (enfant dit de 10 ans)	13 à 17 ans (adolescent dit de 15 ans)	Adulte (> 17 ans)
Coefficient de dose pour l'exposition externe aux dépôts	Sv.s-1/Bq.m-2	8,39E-16	7,90E-16	7,32E-16	7,02E-16	6,66E-16	6,49E-16
Calcul de dose efficace	Doses efficaces par voie d'exposition externe aux dépôts Sv/an	3,92E-06	3,69E-06	3,42E-06	3,28E-06	3,11E-06	3,03E-06

Nota : Concernant l'exposition externe par submersion dans le panache, c'est la tranche d'âge des enfants de moins de 1 an qui est la plus exposée (dose efficace la plus élevée).

6.2.4 Calcul de dose totale

- **La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes)**

Tableau 17 : Calcul de dose totale – Travailleurs / enseignants et étudiants

Paramètre		Unité	Valeur
Calcul de dose efficace	Dose efficace par voie d'exposition interne par inhalation	Sv/an	2,37E-06
	Doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache	Sv/an	5,40E-06
	Doses efficaces par voie d'exposition externe aux dépôts au sol	Sv/an	3,77E-06
Doses efficaces totale reçue		mSv/an	1,15E-02

- **Patients en soins longue durée (adultes et enfants)**

Tableau 18 : Calcul de dose totale – Patients en soins longue durée

Paramètre		Unité	Source / Commentaire					
Classes d'âge		-	< 1 an	1 à 2 ans	3 à 7 ans (enfant dit de 5 ans)	8 à 12 ans (enfant dit de 10 ans)	13 à 17 ans (adolescent dit de 15 ans)	Adulte (> 17 ans)
Calcul de dose efficace	Doses efficaces par voie d'exposition interne par inhalation	Sv/an	1,37E-06	1,84E-06	1,50E-06	1,74E-06	1,67E-06	1,53E-06
	Doses efficaces par voie d'exposition externe par submersion dans le panache	Sv/an	5,81E-06	5,47E-06	5,19E-06	4,94E-06	4,53E-06	4,34E-06
	Doses efficaces par voie d'exposition externe aux dépôts	Sv/an	3,92E-06	3,69E-06	3,42E-06	3,28E-06	3,11E-06	3,03E-06
Dose efficace totale reçue		mSv/an	1,11E-02	1,10E-02	1,01E-02	9,96E-03	9,32E-03	8,90E-03

La dose efficace reçue par les populations attribuable aux effluents radioactifs de l'installation A.A.A est inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an (limite de dose efficace annuelle - article R. 1333-11 du code de la santé publique - reçue par une personne du public du fait des activités nucléaires) et ce pour les cibles potentiellement les plus exposées.



Notons que la balise du Réseau Nationale de Mesures de la radioactivité de l'environnement⁵ la plus proche est située sur l'emprise de la préfecture des Bouches-du-Rhône à Marseille (à près de 2 km à l'ouest du site). Le débit d'équivalent de dose mesuré en moyenne annuelle en ce point est de 70,1 nSv/h pour 2020, soit une dose annuelle équivalente de 0,62 mSv/an.

Pour information, les doses estimées attribuables à A.A.A. 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.

6.3 Hypothèses et sensibilité

6.3.1 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 les choix des voies de transfert,
- 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.

6.3.2 Incertitudes 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.

Les durées et répartition des émissions au cours du temps a été intégrée à la modélisation de la dispersion atmosphérique : émission de 2h du matin à 14h du lundi au vendredi.

6.3.3 Incertitudes liées à la modélisation de la dispersion atmosphérique

Les concentrations calculées sont représentatives de concentrations moyennées dans chaque maille du domaine d'étude et ne peuvent donc pas représenter des concentrations à des échelles plus petites.

⁵ <https://www.mesure-radioactivite.fr>



La maquette 3D du bâti a été intégrée au modèle.

La taille des mailles retenues (5 m x 5 m), qui présente un bon compromis précision / temps de calcul, ne permet pas de prendre en compte les équipements présents sur les toits (centrales de traitement d'air, ...).

Compte tenu des temps de calcul, il n'est pas envisageable d'intégrer 3 années de données météorologiques horaires à la modélisation de la dispersion atmosphérique. Cependant, afin que l'évaluation des concentrations et dépôts soient les plus réalistes possibles, une analyse météorologique a été réalisée afin de déterminer l'année de données météorologiques considérée comme la plus représentative des 3 dernières années : l'année 2020 a été intégrée au pas horaire au modèle de dispersion atmosphérique.

6.3.4 Incertitudes liées au choix des voies de transfert

Les rejets étudiés peuvent être caractérisés par des effluents gazeux (ou d'aérosols très fins).

Pour l'évaluation de l'exposition par submersion dans le panache, il n'a pas été tenu compte de facteur d'atténuation lié au bâti (hypothèse majorante).

Le Fluor 18 est un radioélément ayant une période de demi-vie courte (< 2 heures). De ce fait, les voies de contamination par exposition interne par inhalation et l'exposition externe par submersion dans le panache sont considérées comme les voies d'exposition prépondérantes.

L'exposition externe par les dépôts surfaciques au sol a toutefois été évaluée (avec les hypothèses de temps de présence en extérieur).

D'autre part, compte tenu de cette courte demi-vie du Fluor 18, l'exposition interne par ingestion d'aliments (végétaux, produits animaux) est considérée comme peu significative au regard des autres voies d'exposition prépondérantes citées ci-avant.

En effet, la courte demi-vie (< 2 heures) conduit à une rapide décroissance des concentrations dans les produits entre leur récolte (qui correspond à la fin de l'exposition) et leur consommation.

Ceci est particulièrement vrai pour la viande (abattage, conditionnement, transport, ...) et tous les produits qui font l'objet d'une commercialisation (préparation, vente, ...).

D'autre part, les résultats de la modélisation (§ 5.2.4) montrent que la zone d'influence des dépôts totaux est relativement peu étendue (localisée dans un rayon de l'ordre de 180 m autour du site). Dans cette zone, il n'a pas été recensé de potagers permettant une autoconsommation significative.

Ainsi, la voie d'exposition interne par consommation d'aliments est considérée comme négligeable et n'a pas été retenue dans la présente étude.

L'exposition par ingestion de sol (voie d'exposition potentielle pour les enfants lors de leurs jeux en extérieur) est considérée comme négligeable : pas de jardins ou d'aires de jeux dans la zone d'influence des dépôts totaux.



6.3.5 Incertitudes sur l'exposition des populations et sur la variabilité des êtres humains aux différents facteurs

Les cibles potentiellement les plus exposées ont été identifiées sur la base des résultats de la modélisation (zone d'influence maximale des concentrations atmosphériques et des dépôts totaux attribuables au rejet A.A.A.).

Il s'agit de :

- La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes) ;
- L'hôpital (service de dermatologie) : les travailleurs (adultes) et patients (adultes et enfants) pouvant être en consultation ou en soins longue durée.

Dans une hypothèse majorante, ce sont les patients (adultes et enfants) en soins longue durée qui ont été retenus pour l'évaluation de l'impact sur la santé.

Pour chacune de ces personnes représentatives, les hypothèses et paramètres retenus pour l'évaluation des doses sont précisés et les sources (références bibliographiques) indiquées dans le corps du document.

Les hypothèses de temps de présence ont été retenues de façon réaliste tout en étant considéré comme enveloppe de la majorité des personnes représentatives considérées.

Nota : 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.

6.3.6 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 et méthodologiques du moment.



7 Synthèse

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. Ils sont destinés aux patients pour le diagnostic TEP (Tomographie par Emission de Positons), technique d'imagerie médicale.

Compte tenu de la durée de vie courte de ces radioéléments (Fluor 18), le marché a une structure très régionale : le produit est fabriqué, transporté et utilisé quelques heures après.

Le site AAA de Marseille (13) a fait l'objet d'une évaluation des risques sanitaires radiologiques en 2016.

Dans le cadre du renouvellement de l'autorisation ASN du site (portant sur la détention, l'utilisation d'un cyclotron, la fabrication des radionucléides émetteurs de positons et des produits en contenant au moyen d'un cyclotron), l'évaluation des impacts des rejets à l'atmosphère du site doit faire l'objet d'une mise à jour.

Cette mise à jour, objet du présent rapport, est réalisée :

- Conformément au projet de Guide pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation Cyclotron - Pôle Santé et Environnement - Rapport IRSN N° 2021 ;
- En tenant compte du retour de l'ASN sur les études similaires, à savoir que la modélisation de la dispersion atmosphérique attendue doit être la plus représentative possible compte tenu des contraintes de temps de calcul.

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

- Etape 1 : description de l'installation et des rejets.
- Etape 2 : description de l'environnement de l'installation.
- Etape 3 : identification des transferts dans l'environnement par l'identification des voies de transfert, et leur modélisation via l'évaluation de la dispersion des radionucléides dans l'atmosphère et des transferts de radionucléides dans les compartiments de l'environnement.

Pour cela, la modélisation a été réalisée avec 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 acceptables pour permettre de simuler la dispersion des émissions de l'exutoire considéré. La maquette 3D du bâti environnant a été intégrée à la modélisation.

D'autre part, la simulation a été réalisée avec une chronique météorologique réelle sur une année (données de la station météorologique de Marseille-Marignane, considérée comme la plus représentative du secteur d'étude).

Les voies de transfert retenues sont :

- L'exposition interne par inhalation,
- L'exposition externe par submersion dans le panache,
- L'exposition externe aux dépôts au sol.

Au regard de la faible période du Fluor 18 (< 2 heures) et de l'occupation des sols identifiés dans la zone d'influence des retombées maximales liées au rejet de A.A.A., la voie



d'exposition interne par consommation de végétaux et produits animaux a été considérée comme négligeable et n'a pas été retenue dans l'évaluation de la dose d'exposition.

- Etape 4 : évaluation des doses par l'identification des voies d'exposition, de la personne représentative et le calcul des doses reçues par celle-ci.

Les cibles potentiellement les plus exposées ont été identifiées sur la base des résultats de la modélisation (zone d'influence maximale des concentrations atmosphériques et des dépôts totaux attribuables au rejet A.A.A.).

Il s'agit :

- La faculté de médecine : les cibles potentielles sont des travailleurs / enseignants et étudiants (adultes) ;
- L'hôpital (service de dermatologie) : les travailleurs (adultes) et patients (adultes et enfants) pouvant être en consultation ou en soins longue durée.

Dans une hypothèse majorante, ce sont les patients (adultes et enfants) en soins longue durée qui ont été retenus pour l'évaluation de l'impact sur la santé.

Les coefficients de dose considérés pour les calculs de dose sont issus des bases de données bibliographiques recommandées dans le projet de Guide pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation Cyclotron - Pôle Santé et Environnement - Rapport IRSN N° 2021.

La dose efficace reçue par les populations attribuable aux effluents radioactifs de l'installation A.A.A (et pour le cumul des voies d'exposition retenues) est inférieure à la limite réglementaire de 1 mSv/an (limite de dose efficace annuelle - article R. 1333-11 du code de la santé publique - reçue par une personne du public du fait des activités nucléaires) et ce pour les cibles potentiellement les plus exposées :

- Dose efficace totale reçue pour les travailleurs / enseignants et étudiants (adultes) de la faculté de médecine (située à quelques dizaines de mètres à l'ouest du point de rejet) qui correspondent aux cibles potentielles les plus exposées : **$1,15 \cdot 10^{-2}$ mSv/an**.
- Dose efficace totale reçue par les patients situés dans les bâtiments du groupe hospitalier de la Timone les plus exposés situés à environ 60 m à l'est du point de rejet (patients adultes et enfants considérés de façon pénalisante en soins longue durée et exposés pendant 1 an) : **$1,11 \cdot 10^{-2}$ mSv/an** (pour les enfants < 1 an, qui correspond à la tranche d'âge la plus exposée).

Notons que la balise du Réseau Nationale de Mesures de la radioactivité de l'environnement⁶ la plus proche est située sur l'emprise de la préfecture des Bouches-du-Rhône à Marseille (à près de 2 km à l'ouest du site). Le débit d'équivalent de dose mesuré en moyenne annuelle en ce point est de 70,1 nSv/h pour 2020, soit une dose annuelle équivalente de 0,62 mSv/an.

Ainsi, les doses estimées attribuables à A.A.A. 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 <https://www.mesure-radioactivite.fr>



Annexe

Analyse météorologique

Cette analyse a pour objectif de déterminer l'année la plus représentative des 3 dernières années (2020-2021-2022).

Les données météorologiques acquises pour les besoins de l'étude sont les données horaires de la station météorologique de Marseille-Marignane, située à 20 km au nord-ouest du site, dans un contexte topographique similaire.

Les paramètres sont :

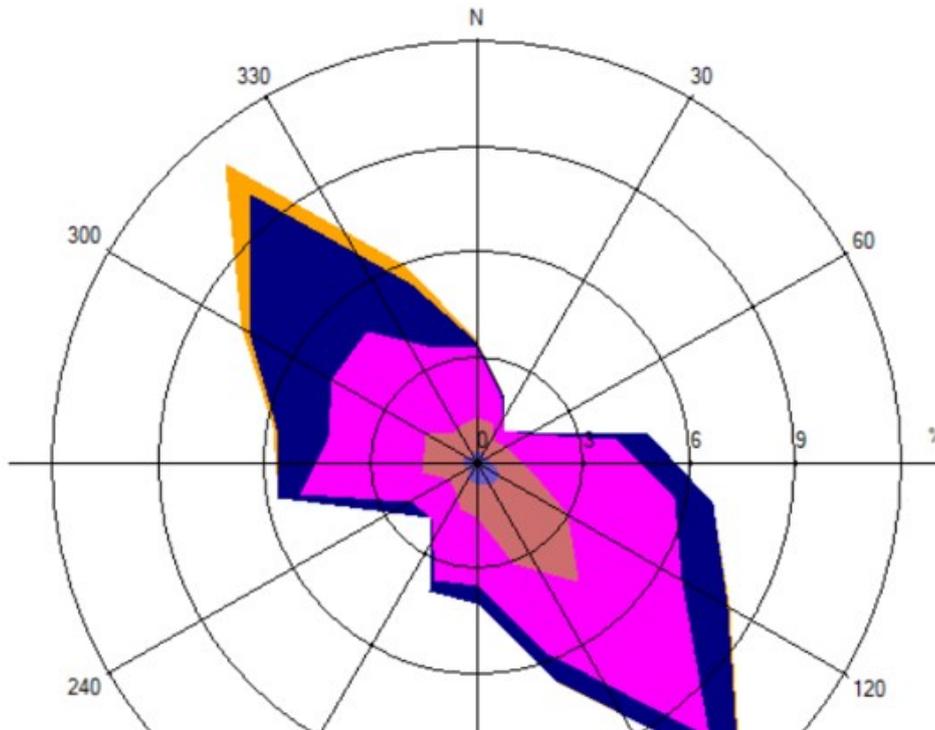
- La vitesse et la direction du vent
- La température de l'air
- La pluviométrie (cumul horaire)
- La nébulosité.

- **Analyse des vents :**

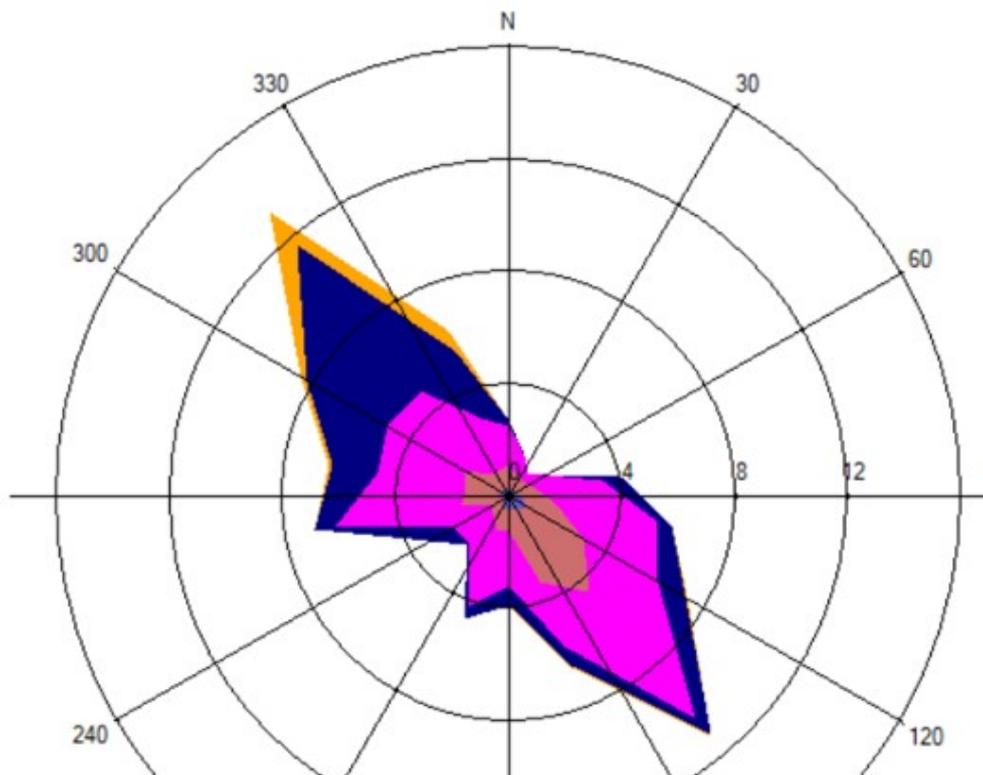
L'analyse porte dans un premier temps sur la répartition des vents en termes de vitesse et direction.

Le rose des vents de chaque année de donnée est comparée avec la rose des vents de la période des 3 ans (2020-2021-2022).

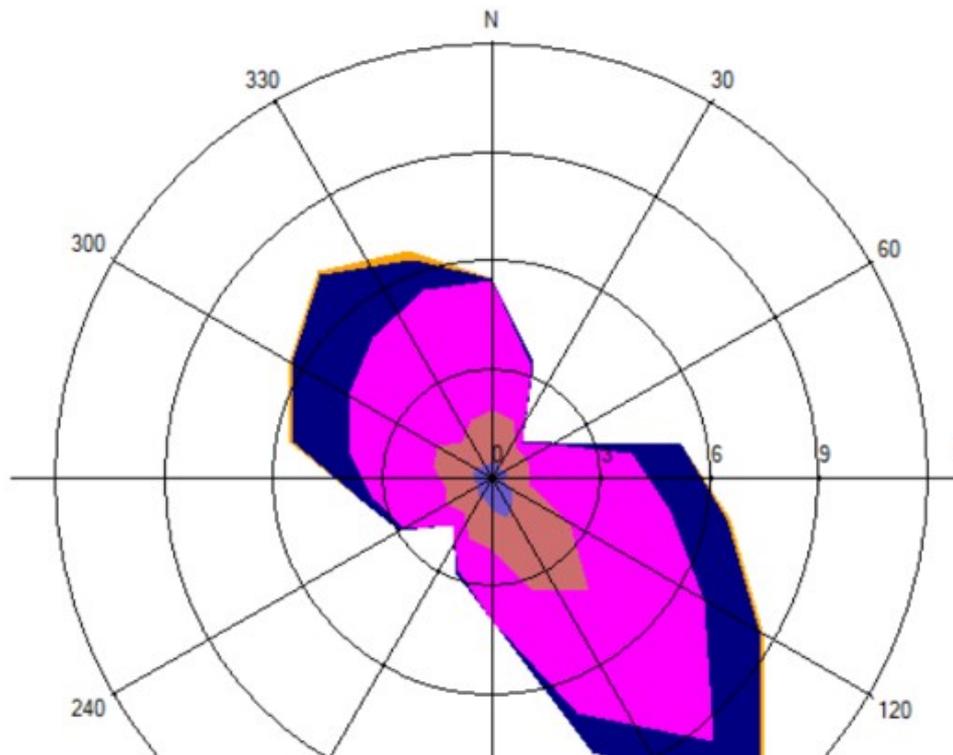
Rose des vents sur la période 2020-2021-2022



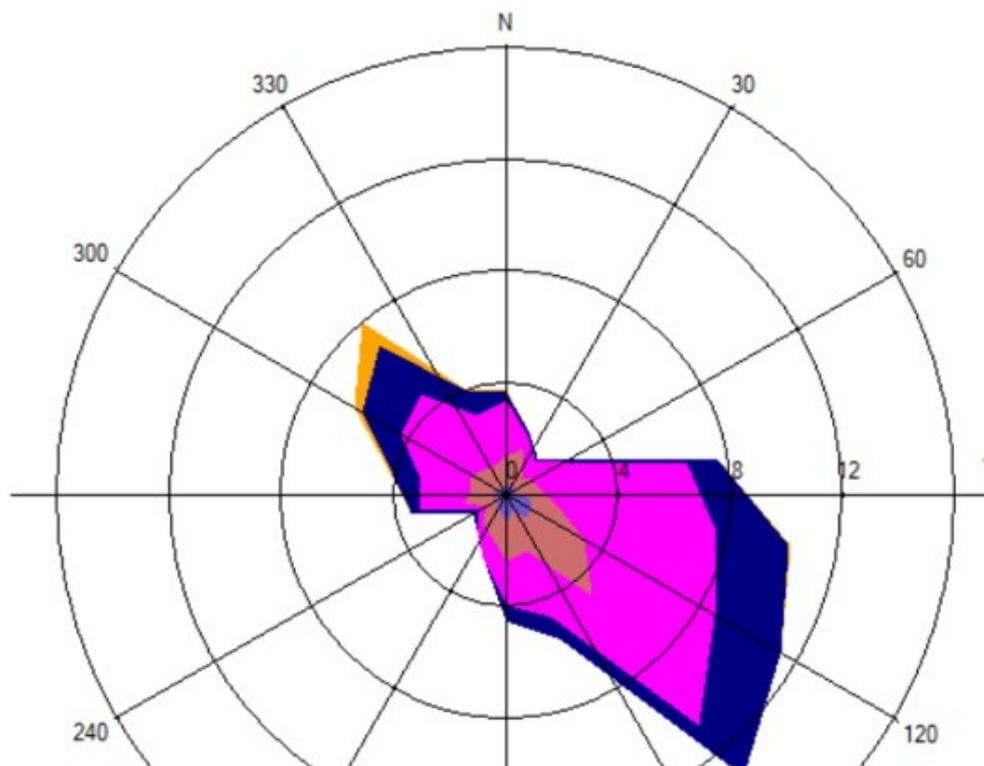
Rose des vents de l'année 2020



Rose des vents de l'année 2021



Rose des vents de l'année 2022





Les roses des vents des années 2020, 2021 et 2022 présentent des directions de vents dominants cohérentes avec la rose des vents sur la période des 3 ans (2020-2021-2022).

Notons toutefois que c'est la rose des vents de l'année 2020 qui présente la plus grande similitude avec la rose des vents moyenne sur la période 2020-2021-2022.

La vitesse moyenne du vent a été calculée sur ces mêmes périodes :

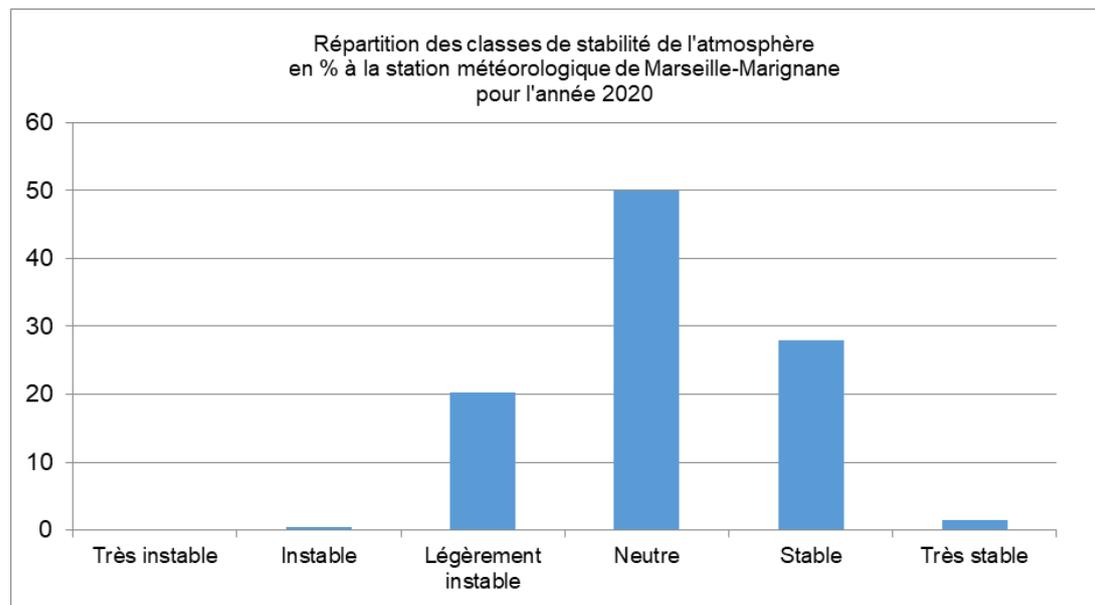
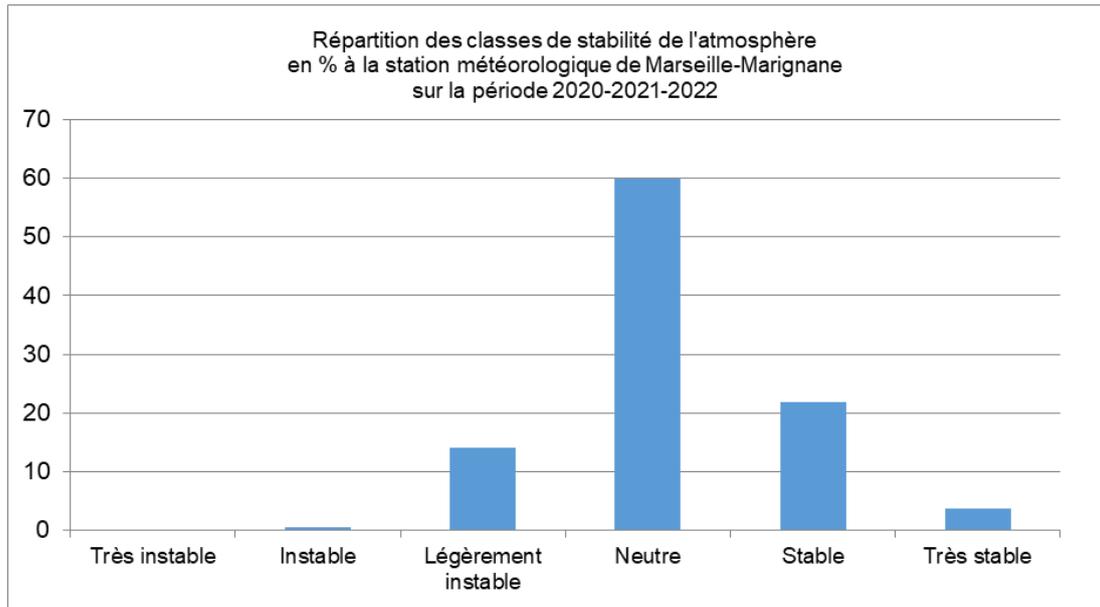
Période considérée	Vitesse moyenne du vent (m/s)
Période 2020-2021-2022	4,29
Année 2020	4,54
Année 2021	3,81
Année 2022	3,96

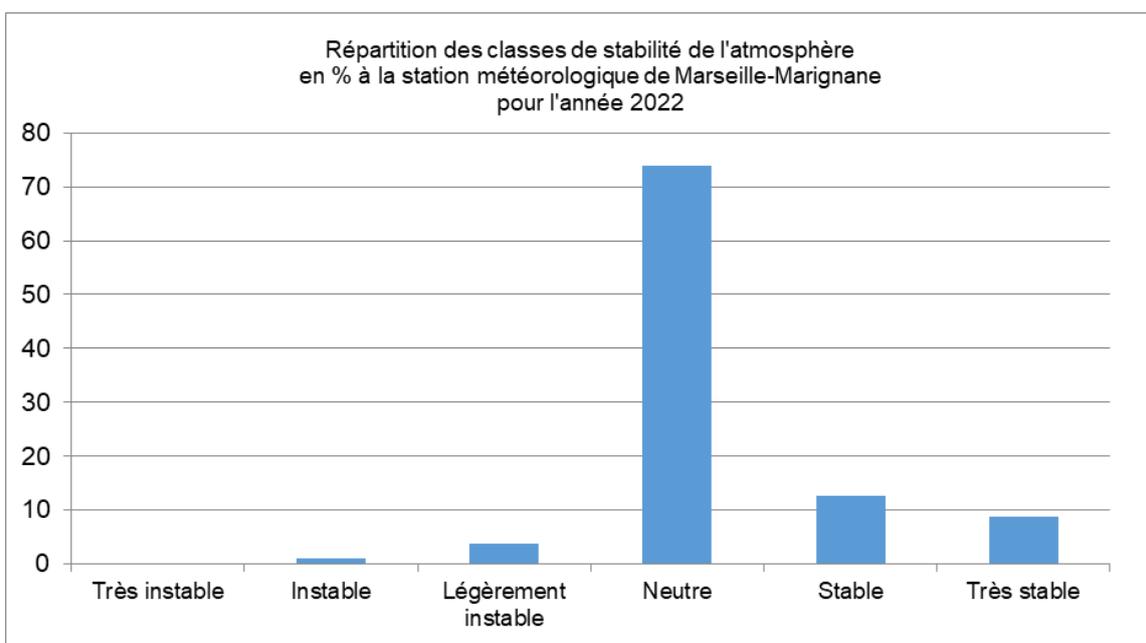
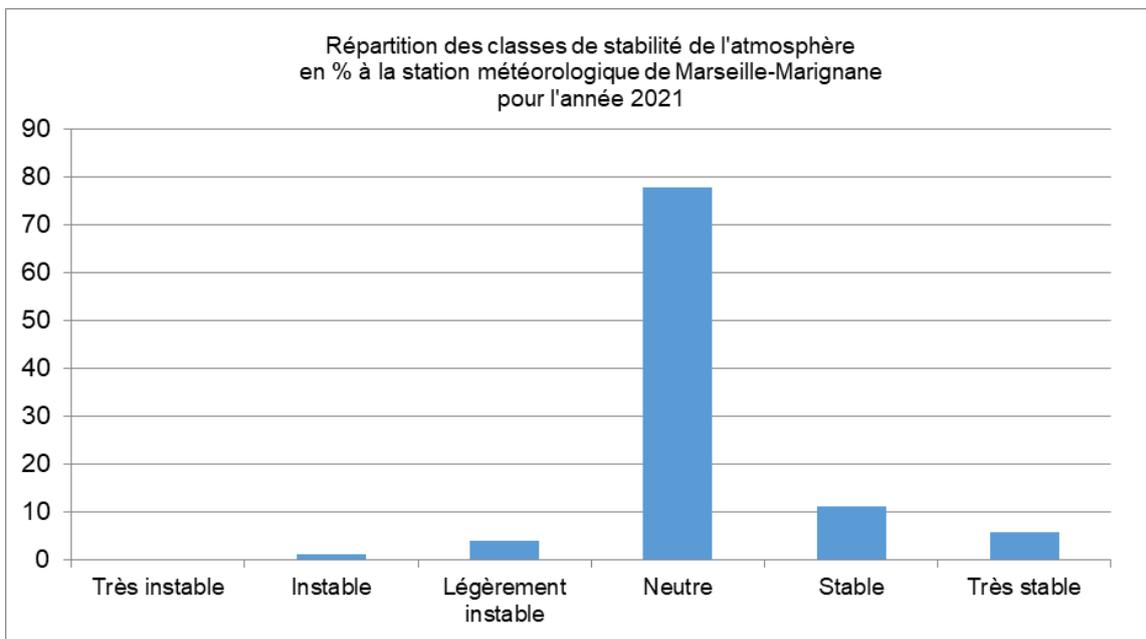
Les années 2020 et 2022 présentent la vitesse de vent moyenne annuelle la plus proche de celle de la période 2020-2021-2022.

- **Analyse de la stabilité de l'atmosphère :**

La stabilité de l'atmosphère a une grande influence sur la dispersion atmosphérique.

La répartition des classes de stabilité de l'atmosphère (classes de Pasquill calculée sur la base de la vitesse du vent et de la nébulosité) de chacun des 3 années est comparée avec la répartition des classes de stabilité de la période 2020-2021-2022.





La répartition des classes de stabilité de l'atmosphère de l'année 2020 est la plus proche de celle de la période 2020-2021-2022.



- **Pluviométrie :**

De la même façon, la pluviométrie annuelle de chacune des 3 années est comparée à la pluviométrie moyennée sur la période 2020-2021-2022.

Période considérée	Cumul horaire des précipitations (mm/an)
Période 2020-2021-2022	442,8 mm
Année 2020	435,7 mm
Année 2021	539,2 mm
Année 2022	353,4 mm

Le cumul des précipitations pour l'année 2020 est le plus proche de la moyenne annuelle sur la période 2020-2021-2022.

Pour mémoire, les précipitations conduisent au lessivage des concentrations atmosphériques vers le sol.

- **Conclusion :**

Les roses des vents des années 2020, 2021 et 2022 présentent des directions de vents dominants cohérentes avec la rose des vents sur la période des 3 ans (2020-2021-2022).

Notons toutefois que c'est la rose des vents de l'année 2020 qui présente la plus grande similitude avec la rose des vents moyenne sur la période 2020-2021-2022.

Les années 2020 et 2022 présentent la vitesse de vent moyenne annuelle la plus proche de celle de la période 2020-2021-2022.

D'autre part, la répartition des classes de stabilité de l'atmosphère de l'année 2020 est la plus proche de celle de la période 2020-2021-2022.

Pour mémoire, les voies d'exposition prépondérantes pour les rejets atmosphériques de Fluor 18 sont l'exposition interne par inhalation et l'exposition externe par submersion dans le panache.

Au regard des données de pluviométrie, le choix s'est porté sur l'année 2020 qui présente un cumul annuel légèrement plus faible que le cumul moyen de la période 2020-2021-2022. En effet, une plus faible pluviométrie :

- Permet de ne pas sous-estimer les concentrations atmosphériques (qui correspondent à la matrice d'exposition prépondérante).
- Mais conduit à sous-estimer les dépôts au sol. Cependant, la voie d'exposition par exposition externe aux dépôts est minoritaire au regard de l'exposition par voie interne par inhalation et l'exposition par voie externe par submersion dans le panache.

L'année 2020 est donc à la fois considérée comme représentative et reste un choix prudent (hypothèse majorante) au regard du calcul d'exposition.