

# CYCLOPHARMA LABORATOIRES

Site de Dijon (21)

## EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES EMISSIONS DE FLUOR 18 DANS L'ATMOSPHERE

Septembre 2014

### SOMMAIRE

1	INTRODUCTION / CONTEXTE DE L'ETUDE	4
1.1	LA SOCIETE CYCLOPHARMA LABORATOIRES	4
1.2	CONTEXTE DE L'ETUDE	4
2	PRODUCTIONS DE L'INSTALLATION	5
2.1	PRINCIPE DE PRODUCTION DU FLUOR 18 – LE CYCLOTRON	5
2.2	CARACTERISTIQUES DU FLUOR 18	5
2.3	PRINCIPE DE PRODUCTION DES MOLECULES FLUOREES	5
2.3.1	Fabrication du <sup>18</sup> FDG	6
2.3.2	Caractéristiques de ce produit fini	6
2.4	CONDITIONS D'EMISSIONS A L'ATMOSPHERE DU FLUOR 18	7
2.5	QUANTIFICATION DES EMISSIONS	8
3	PRESENTATION GENERALE DE LA METHODOLOGIE "EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES"	9
3.1	OBJECTIFS	9
3.2	METHODOLOGIE	10
4	DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE	11
4.1	DEFINITION DE LA ZONE D'ETUDE	11
4.2	DESCRIPTION DE LA ZONE D'INTERET GENERAL	12
4.2.1	Populations	12
4.2.2	Hydrogéologie / nappes	12
4.2.3	Capitages + usages de l'eau	13
4.2.4	Elévages et cultures	14
4.2.5	Données relatives à la qualité de l'air : surveillance de la radioactivité	14
4.3	DESCRIPTION ZONE D'INTERET PARTICULIER	17
4.4	SYNTHESE DES CIBLES DE L'IMPACT SANITAIRE POTENTIEL	18
5	ANALYSE PRELIMINAIRE ET CHOIX DES POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE	19
5.1	INVENTAIRE DES SUBSTANCES EMISES / MODE D'EMISSION	19
5.2	DESCRIPTION DES DANGERS PRESENTES PAR LES SUBSTANCES : EFFETS SUR LA SANTE HUMAINE & COMPORTEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT	19
5.2.1	Effets biologiques sur la santé humaine	19
5.2.2	Comportement dans l'environnement	21
5.3	DETERMINATION DES VOIES DE TRANSFERT RETENUES	21
5.4	DEFINITION DE LA RELATION DOSE-REPONSE	22
5.5	SCENARIOS D'EXPOSITION RETENUS / SCHEMA CONCEPTUEL	23
6	EVALUATION DES NIVEAUX D'EXPOSITION	24
6.1	PREAMBULE	24
6.2	LOGICIEL UTILISE POUR LA MODELISATION	24
6.3	DONNEES D'ENTREES	25
6.3.1	Calcul de la concentration en Fluor 18 en Bq/m <sup>3</sup>	27
6.3.2	Calcul de la dose externe reçue en quelques points particuliers	28
6.3.3	Niveau ambiant	28
6.3.4	Contribution de l'établissement	28
7	ESTIMATION DU RISQUE SANITAIRE	29
7.1	METHODOLOGIE	29
7.2	CALCUL DE LA DOSE EFFICACE TOTALE	29
7.2.1	Exposition d'une personne adulte située dans la zone de retombées maximales (en dehors du site)	29
7.2.2	Exposition d'un enfant au niveau de la maison la plus proche du site (habitation retenue bien que située en dehors de la zone d'étude car habitation la plus proche et temps plus important)	30
7.3	COMPARAISON AUX VALEURS LIMITEES ET DOSES AMBIANTES	32
7.3.1	Exposition d'une personne adulte située dans la zone de retombées maximales en dehors du site	32

7.3.2 Exposition d'un enfant au niveau des habitations les plus proches ..... 32  
7.4 CONCLUSION ..... 32

8 ANALYSE QUALITATIVE DES INCERTITUDES LIEES A L'EVALUATION ..... 33  
9 BIBLIOGRAPHIE ET SOURCES D'INFORMATION ..... 33

Tableau 1 : Caractéristiques d'émission du fluor 18 ..... 5  
Tableau 2 : Les différentes étapes de la synthèse du <sup>18</sup>FDG ..... 6  
Tableau 3 : description de la cheminée ..... 8  
Tableau 4 : Flux de F-18 rejetés ..... 8  
Tableau 5 : population communale ..... 12  
Tableau 6 : Débit de dose gamma ambiant mesuré sur la station la plus proche ..... 15  
Tableau 7 : Débit d'équivalent de dose et dose horaire moyenne sur les stations les plus proches ..... 16  
Tableau 8 : Synthèse des cibles ..... 18  
Tableau 9 : Principales émissions du fluor-18 ..... 19  
Tableau 10 : Filiation du Fluor-18 ..... 25  
Tableau 11 : Synthèse des données d'entrée pour la modélisation de dispersion atmosphérique ..... 27  
Tableau 12 : valeurs des concentrations de contamination atmosphérique sur les points retenus ..... 28  
Tableau 13 : doses reçues par irradiation externe sur les points retenus ..... 28  
Tableau 14 : Débit de dose gamma ambiant mesuré sur la station la plus proche ..... 28  
Tableau 15 : Débit d'équivalent de dose et dose horaire moyenne sur les stations les plus proches ..... 28  
Tableau 16 : contribution du site au niveau ambiant ..... 28  
Tableau 17 : tableaux d'analyse des incertitudes ..... 33

Figure 1 : Structure chimique du 18FDG ..... 6  
Figure 2 : Rappel du synoptique général de production ..... 7  
Figure 3 : cycles de production ..... 8  
Figure 4 : vue aérienne à la date du XXXX de la zone d'étude ..... 11  
Figure 5 : localisation du forage 05001X0655/GEOETH par rapport au site ..... 12  
Figure 6 : Localisation des captages d'eau potable alimentant le grand Dijon ..... 13  
Figure 7 : Extrait de carte du site ADES - pas de point d'eau localisés ..... 14  
Figure 8 : Zones cultivées dans l'environnement du site ..... 15  
Figure 9 : Localisation des stations de Dijon les plus proches ..... 15  
Figure 10 : Localisation des stations les plus proches du site ..... 16  
Figure 11 : Vue aérienne à quelle date ? ? ? l'environnement de l'établissement avec localisation, des affectations 17  
Figure 12 : Localisation de l'habitation la plus proche ..... 18  
Figure 13 : schéma descriptif des voies de transfert ..... 21  
Figure 14 : Schéma conceptuel retenu ..... 23  
Figure 15 : Rose des vents Longvic ..... 26  
Figure 16 : cartographie des concentrations en Fluor 18 dans l'air dans l'environnement du site ..... 27

## 1 INTRODUCTION / CONTEXTE DE L'ETUDE

### 1.1 LA SOCIETE CYCLOPHARMA LABORATOIRES

La société « Les Laboratoires Cyclopharma » a été créée en Aout 2000 avec les premières productions industrielles de <sup>18</sup>FDG sur un site de Nice en juillet 2001.  
Elle est spécialisée dans les produits radio-pharmaceutiques injectables, utilisés en médecine nucléaire.

L'utilisation simultanée de la technologie TEP (utilisée en particulier dans le diagnostic et le suivi thérapeutique du traitement des cancers) et de cyclotrons « médicaux » a permis de montrer, tant en Europe qu'aux États-Unis, l'immense intérêt de cette nouvelle voie d'investigation médicale.

C'est devant cet état de fait qu'ont été créés les Laboratoires CYCLOPHARMA, avec pour objectif de structurer un réseau français de sites de production et de commercialisation du GLUCOTEP® (<sup>18</sup>FDG).

Le projet des Laboratoires CYCLOPHARMA (pour faire face aux besoins d'un marché en pleine croissance) consiste à mettre en œuvre un réseau de plusieurs cyclotrons de fabrication d'isotopes à très courte durée de vie dans des sites (plateformes de production) pharmaceutiques et à proximité de services médicaux. Ces Laboratoires sont spécialisés pour produire des doses de GLUCOTEP® (<sup>18</sup>FDG) et de plus en plus d'autres spécialités radiopharmaceutiques (traceurs, à livrer rapidement aux services de Médecine Nucléaire, conformément aux réglementations en vigueur (Santé, Industrie, Environnement, Radioprotection, Sécurité...).

La production est organisée en réseau pour garantir aux utilisateurs des livraisons compatibles avec le fonctionnement des services.

Chaque implantation est sélectionnée en fonction des besoins médicaux et des facilités de livraisons. Le maillage du territoire français est lié à la spécificité du 18-F : perte de la moitié de son activité toutes les 2 heures (demi-vie physique, très courte). Produire au plus près des utilisateurs constitue la principale contrainte pour les Laboratoires CYCLOPHARMA.

La société dispose aujourd'hui de 9 sites en fonctionnement répartis sur le territoire français :

- Saint-Beauzire (63) – 2007 (également le Siège de la société)
- Tours (37) - 2008
- Illkirch-Gratzenstaden (67) - 2009
- Janmeyrias (38) - 2009
- Glisy (60) - 2009
- Caen (14) - 2010
- Toulouse (31) - 2010
- Marseille (13) – 2010
- Dijon (21) – 2012

### 1.2 CONTEXTE DE L'ETUDE

Les différents établissements de la société ne sont plus soumis à la réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) au titre de leur activité radiologique/activité de détention. Ils ne sont pas non plus considérés comme installations nucléaires de base (INB). Les activités de la société sont encadrées par l'autorité de sûreté nucléaire (ASN).

La société CYCLOPHARMA à l'heure actuelle a obtenu dans le cadre de la procédure d'autorisation de l'ASN de rejeter dans l'air 15 GBq par an et par site.

Suite à des discussions avec l'ASN et bien que la réglementation n'impose pas aux établissements Cyclopharma la réalisation de ce type d'étude, la société CYCLOPHARMA a décidé de faire réaliser une étude de dispersion de ses rejets de Fluor<sup>18</sup> et l'évaluation associée des risques sanitaires sur les populations environnantes pour chacun des sites du territoire Français.

*Le présent rapport constitue l'évaluation des risques sanitaires liés à l'émission de Fluor 18 dans l'atmosphère par le processus de production de l'établissement de Dijon (21).  
L'évaluation des risques sanitaires ne vise que le rejet de ce composé.*

## 2 PRODUCTIONS DE L'INSTALLATION

### 2.1 PRINCIPE DE PRODUCTION DU FLUOR 18 – LE CYCLOTRON

Schématiquement, on extrait du cyclotron un faisceau de protons de 15 MeV dirigé vers une cible d'eau enrichie en oxygène-18 ( $^{18}\text{O}$ , isotope stable non radioactif naturel), cette dernière pouvant être récupérée pour recyclage. Cette cible est alimentée par un circuit étanche asservi par un automate permettant de transférer l'eau dans la cible, de pressuriser la cible par de l'hélium, de transférer avec l'hélium en retour l'eau activée en fluor 18 ( $^{18}\text{F}$ ) de manière sécurisée vers l'enceinte blindée sélectionnée, puis de sécher le circuit.

### 2.2 CARACTERISTIQUES DU FLUOR 18

C'est un traceur radioactif émetteur de positons (électron positif ou  $e^+$ ) utilisé pour le marquage de molécules d'intérêt biologique. Cet isotope a une carence en neutrons et se désintègre lorsqu'un proton se transforme spontanément en neutron, provoquant ainsi l'émission d'un positon.

On utilise cet isotope surtout parce qu'il se désintègre en émettant uniquement des positons. Le positon, c'est-à-dire une antiparticule, est un électron à charge positive. Après son émission et dissipation de son énergie cinétique dans la matière, le positon entre en collision avec un électron et entreprend un processus d'annihilation antimatière-matière. Au cours de ce processus, les deux masses équivalentes du positon et de l'électron sont converties en rayonnement électromagnétique qui prend la forme de deux photons à rayonnements égaux (511 keV) émis à 180° l'un de l'autre. C'est cette émission de rayon gamma qui est détectée. Étant donnée sa courte période (109,8 minutes soit 1,83 heure), cet isotope doit être produit immédiatement avant son utilisation. Il est produit dans un cyclotron qui se trouve nécessairement à proximité. Le fluor 18 se désintègre en donnant de l'oxygène 18 stable en émettant un positon et un neutrino.



Malgré l'émission  $\beta^+$ , le fluor 18 fait partie du groupe 4 (faible radiotoxicité) en raison de la brièveté de sa période. Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques d'émission du fluor 18.

Type d'émission	Energie (keV)	Pourcentage (%)
$e^+$	0,5	2,9
$\beta^+$	Max. 633,5 – moy. 249,3	96,8
$\gamma$	511	194

Tableau 1 : Caractéristiques d'émission du fluor 18

### 2.3 PRINCIPE DE PRODUCTION DES MOLECULES FLUOREES

L'établissement produit majoritairement du GLUCOTEP® ( $^{18}\text{F}$ FDG), mais pour faire face aux besoins d'un marché en pleine croissance, la société exploite désormais plusieurs spécialités radiopharmaceutiques, donc peut également produire d'autres types de molécules fluorées sur un principe de production similaire.

Certaines sont utilisées pour le diagnostic et le suivi thérapeutique des cancers et de la maladie de Alzheimer. Cyclopharma en couvrant la totalité du territoire participe activement à cette activité médicale que l'on peut situer dans le cadre de la médecine personnalisée.

### 2.3.1 Fabrication du $^{18}\text{F}$ FDG

A titre d'information, les principales étapes de synthèse du  $^{18}\text{F}$ FDG sont les suivantes :

Produit utilisé	Opération chimique
$^{18}\text{F}$ provenant de l'irradiation de $^{18}\text{O}$	Piégeage du $^{18}\text{F}$ dans une cartouche standard d'échange d'anion (possibilité de recyclage de l'eau enrichie)
$\text{K}_2\text{CO}_3$ et Kryptofix dans un mélange d'eau et d'acétonitrile	Elution du $^{18}\text{F}$ (sec) et transfert dans un réacteur chimique, le Kryptofix étant le catalyseur de la réaction
Acétonitrile	Synthèse du FDG Evaporation par solvant à une température de 85°C, sous vide et dans un flux d'azote
Acétonitrile	Dissolution du précurseur et dissolution du complexe $^{18}\text{F}$ /Kryptofix/ $\text{K}^+$
NaOH	Hydrolyse alcaline de la solution afin d'obtenir du FDG pur
Eau	La solution entraînée par de l'eau et filtrée dans une cartouche de carbone IC18 ; les impuretés finales sont ainsi éliminées
HCl / citrate de sodium	Elution du $^{18}\text{F}$ FDG avec de l'eau, neutralisation à l'acide et solution tampon pour obtenir un pH compatible avec l'injection au patient.

Tableau 2 : Les différentes étapes de la synthèse du  $^{18}\text{F}$ FDG

### 2.3.2 Caractéristiques de ce produit fini

Le produit obtenu est du  $^{18}\text{F}$ FDG (2-fluoro-2-deoxy-D-glucose- $(^{18}\text{F})$ ).

Pour chaque lot fabriqué 5 flacons supplémentaires sont élaborés : X pour les clients, 3 pour les contrôles et 2 pour l'échantillonnage. Chaque lot représente un volume de quelques mL pour une radioactivité d'une centaine de GBq dont l'activité volumique au moment de la répartition est variable en fonction des besoins (chaque flacon (X) remplit de 0,2 à 10 mL).

Les productions sont réalisées à la demande et il ne peut pas se passer plus de 12 heures maximum entre la fabrication et l'injection au patient. Cette durée de péremption du produit est courte pour 2 raisons :

- Demi-vie très courte du  $^{18}\text{F}$  (109,8 minutes)
- Stérilité/stabilité du produit injectable

Ce sucre actif est injecté sous forme liquide au patient.

Une fois injecté au patient le rayonnement du  $^{18}\text{F}$  (resté lié à la molécule de FDG est piégé dans la cellule et s'accumule sous forme d'une hyperfixation dans le tissu tumoral) est détecté par une caméra TEP qui peut être couplée à un Scanner est donc capté en fonction de l'activité des cellules.

Une partie de la dégradation du  $^{18}\text{F}$ FDG est éliminée dans les urines.

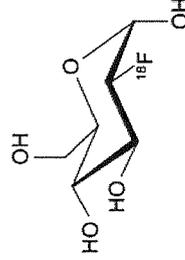


Figure 1: Structure chimique du  $^{18}\text{F}$ FDG

2.4 CONDITIONS D'EMISSIONS A L'ATMOSPHERE DU FLUOR 18

L'établissement réalise en routine (configuration de référence pour cette étude) 3 cycles de production sur la journée du Lundi au Vendredi sur 52 semaines.

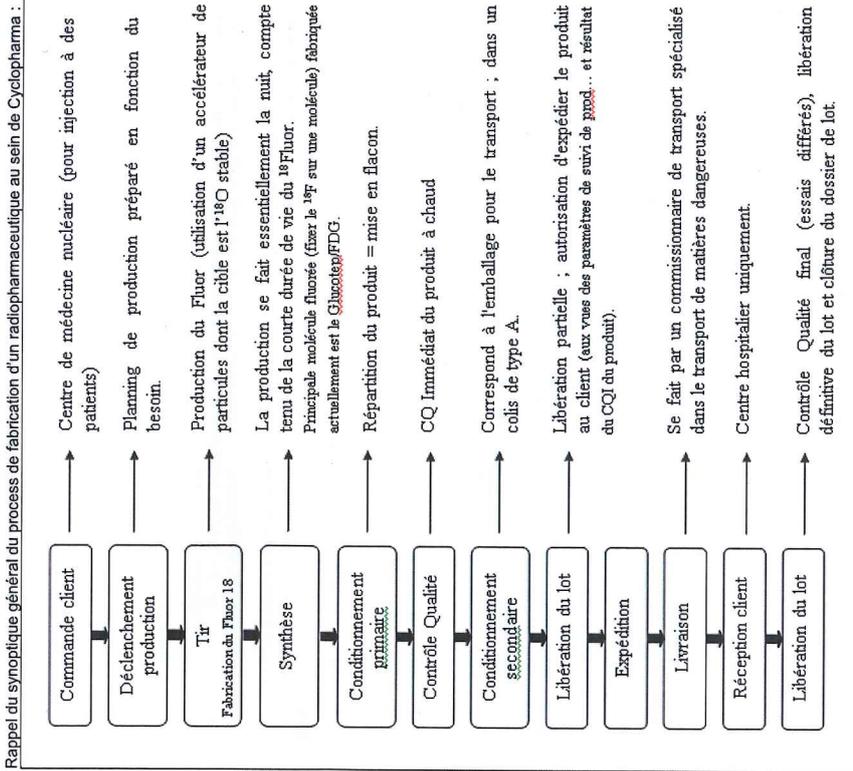


Figure 2 : Rappel du synoptique général de production

L'émission de Fluor 18 à l'atmosphère a lieu un peu pendant les tirs cyclotron puis principalement pendant les phases de synthèse et de répartition (et un peu pendant le contrôle qualité réalisé souvent en parallèle de la répartition).

- On peut décomposer ces cycles de production comme suit :
- ≈ 2h30 de tirs dans le cyclotron (en rouge ci-dessous)
  - ≈ 30 minutes de synthèse (en jaune ci-dessous)
  - ≈ 1 heure de répartition (en bleu ci-dessous)

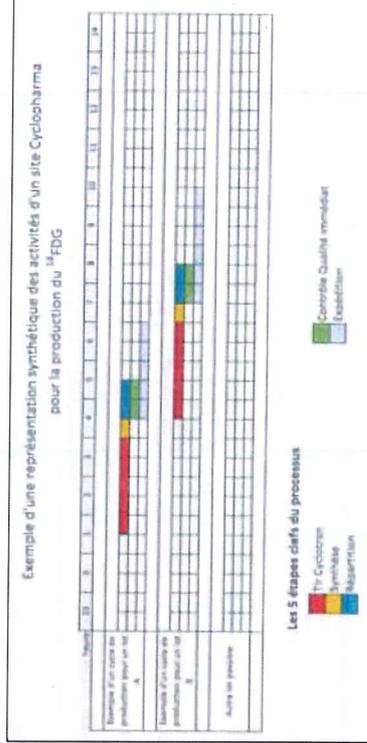


Figure 3 : cycles de production

Les émissions sont canalisées vers une cheminée dont l'émissaire est situé en toiture de bâtiment (cf § 6.3).

Dimensions	Débit	Hauteur du point de rejet	Orientation du rejet
0,38 m X 1,05 m	12 000 m <sup>3</sup> /h	8 m	Vertical

Tableau 3 : description de la cheminée

2.5 QUANTIFICATION DES EMISSIONS

L'établissement fera réaliser à minima une mesure annuelle sur cet émissaire de rejets.

Sur la base des résultats des campagnes de mesures faites sur le réseau Cyclopharma, il a été décidé de retenir pour la présente étude une concentration constante de 10 000 Bq/m<sup>3</sup> pendant les 3 cycles de production consécutifs d'une durée totale arrondie à 4 heures chacun (soit de 1h du matin à 13 heures).

Cette valeur de concentration est considérée comme représentative d'un rejet en fin de cycle de vie de l'installation de filtration des émissions. Cette hypothèse est donc une configuration maximale pour l'évaluation du risque sanitaire ne correspondant actuellement pas à l'autorisation de rejet (cf § 6.3).

Sur la base de ces concentrations et du débit de rejets de l'extraction, nous retiendrons les flux de rejet suivants dans la suite de l'étude :

Heure	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14
Flux (Bq/s)	0	33333	33333	33333	33333	33333	33333	33333	33333	33333	33333	33333	33333	0

Tableau 4 : Flux de F18 rejetés

Flux en Bq/s = concentration (Bq/m<sup>3</sup>) X débit de rejet (m<sup>3</sup>/h)/3600 X temps de fonctionnement (heure complète dans le cas présent).  
La concentration ne variant pas en fonction de l'étape considérée du cycle et tient compte de la juxtaposition des cycles.

### 3 PRESENTATION GENERALE DE LA METHODOLOGIE "EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES"

Potentiellement, les atteintes à la santé publique peuvent se faire par la transmission de composés dangereux à l'homme principalement par l'intermédiaire des eaux, de l'air et des émissions sonores.

Seuls les niveaux d'exposition en fonctionnement normal ou transitoire (démarriage, arrêt programmé...) de l'installation sont envisagés. Le fonctionnement accidentel étant envisagé dans l'étude de dangers.

Ce chapitre, relatif aux impacts sur la santé doit viser spécifiquement les effets potentiels des éventuels polluants sur la santé publique. Il concerne donc exclusivement les tiers situés dans l'environnement du site et non le personnel associé aux activités de CYCLOPHARMA pour lesquels la protection de la santé est encadrée par le Code du Travail.

Cette évaluation a été réalisée :

- en adaptant la méthodologie "Evaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement – Substances chimiques" [bibliographie 1],
- sur la base des données disponibles dans l'arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003 [bibliographie 3] définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

#### 3.1 OBJECTIFS

L'objectif est l'évaluation quantitative des risques sanitaires (conséquences éventuelles de l'activité sur la santé des populations) liés à l'activité de la société CYCLOPHARMA, site de Dijon.

L'évaluation des risques est menée sur la base des connaissances techniques et scientifiques du moment.

Elle a pour but de conclure quant à un éventuel effet sur la santé imputable à l'activité de production de molécules fluorées (émissions atmosphériques associées de <sup>18</sup>F), vis à vis de l'homme (population sensible), dans le cadre d'une exposition chronique (exposition allant de quelques années à la vie entière).

#### 3.2 METHODOLOGIE

Le modèle d'évaluation des risques pour la santé repose sur le concept "sources – vecteurs – cibles" :  
- source de substances à impact potentiel ;  
- transfert des substances par un "vecteur" vers un point d'exposition ;  
- exposition à ces substances des populations (ou "cibles") situées au point d'exposition.

Les étapes constituant la démarche d'évaluation des risques pour la santé sont les suivantes :

1. **Description de l'environnement du site** : cette étape consiste à cadrer la zone d'étude et effectuer un bilan des données existant au niveau de cette zone (types d'occupations du sol, populations concernées, activités humaines, etc....).
2. **Analyse préliminaire et choix des polluants traceurs de risques** : il s'agit :
  - de sélectionner les polluants traceurs de risque, pour lesquels on va réaliser une évaluation quantitative du risque sanitaire ;
  - d'identifier les effets indésirables que ces polluants sont intrinsèquement capables de provoquer chez l'homme ;
  - d'évaluer la relation dose – réponse : elle consiste à estimer la relation entre la dose ou le niveau d'exposition aux polluants, et l'incidence et la gravité de ces effets.
3. **Evaluation des niveaux d'exposition** : elle comprend notamment le choix des voies d'exposition retenues, la définition des scénarios d'exposition et le calcul, pour les populations cibles, des quantités de polluants absorbées sous la forme d'une dose d'exposition.
4. **Estimation du risque sanitaire** : elle consistera à comparer la dose efficace totale annuelle générée par l'établissement à la valeur limite d'exposition définie par la réglementation et au niveau ambiant mesuré dans l'environnement de l'établissement.
5. **Analyse qualitative des incertitudes liées à l'évaluation.**

#### 4 DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE

##### 4.1 DEFINITION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude périmétrale est définie selon le rayon d'influence des émissions atmosphériques du Fluor 18 de l'établissement de Dijon.

La zone impactée retenue est celle pour laquelle les concentrations dans l'air ambiant calculées sont au moins égales au  $1/10^{ème}$  de la concentration maximale modélisée [bibliographie 2] pour le Fluor 18.

Une première modélisation de la dispersion atmosphérique met en évidence une concentration maximale de Fluor 18 dans l'air ambiant qui se situe à 3,3752 Bq/m<sup>3</sup> (concentration moyenne permanente dans l'environnement du site générée par les émissions de celui-ci durant toute l'année).

La zone d'étude retenue se définit par carré qui s'inscrit dans la courbe de concentration correspondante au  $1/10^{ème}$  de cette concentration maximale. La superficie de la zone d'étude est environ 0,08 km<sup>2</sup> (200 m X 400 m).

Elle s'inscrit sur le seul territoire de la commune de Dijon. Cette zone est représentée ci-dessous :

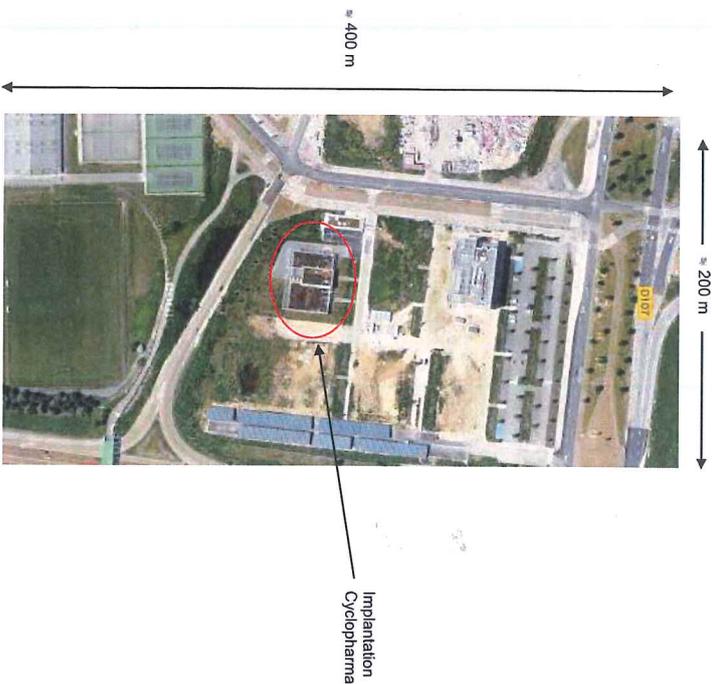


Figure 4. : vue aérienne de la zone d'étude (source googlemap de septembre 2014)

##### 4.2 DESCRIPTION DE LA ZONE D'INTERET GENERAL

La zone d'intérêt général correspond à une partie du territoire de la commune de Dijon.

##### 4.2.1 Populations

L'établissement Cyclopharma est implanté à l'Est du territoire de la commune de Dijon à 2500 m environ au Sud-Est du centre-ville de Dijon. Dijon appartient à la « communauté d'agglomération Grand Dijon » qui compte 24 communes.

Commune	Population totale (dernier recensement de 2011)
Dijon	155 862

Tableau 5. : population communale

Source : [www.insee.fr](http://www.insee.fr)

##### 4.2.2 Hydrogéologie / nappes

L'établissement est situé sur la masse d'eau FRDG523 (Formations variées du Dijonnais entre Ouche et Vingeanne). Il s'agit d'une nappe de type imperméable localement aquifère. L'écoulement y est libre et capif, majoritairement libre.

(source [www.adas.eaufrance.fr](http://www.adas.eaufrance.fr)).

Les données ci-dessous sont extraites de la fiche dossier du sous-sol 05001X0655/GEOTH du BRGM sur le site Info-terre réalisé dans le cadre de l'exécution d'un forage pour géothermie à environ 90 m au Nord de l'établissement :

- 0 à 3 m : limons argileux
- 3 m à 100 m : marne argileuse avec passages sableux

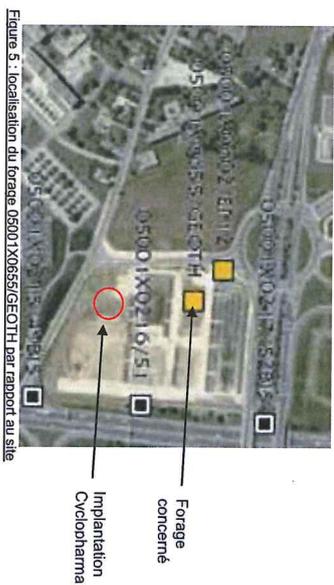


Figure 5. : localisation du forage 05001X0655/GEOTH par rapport au site



Les données sur la radioactivité de l'environnement comprennent notamment les résultats des mesures réalisées :

- dans le cadre de dispositions législatives ou réglementaires visant à évaluer les doses auxquelles la population est soumise, notamment celles résultant des activités nucléaires ;
- à la demande des collectivités territoriales, des services de l'Etat et de ses établissements publics ;
- par tout organisme public, privé ou associatif, et dont l'organisme détenteur des résultats demande leur diffusion sur le réseau national.

Ces mesures doivent obligatoirement être effectuées par des laboratoires agréés ou par l'Institut de radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN).

Les mesures réalisées au niveau des stations les plus proches du site montrent les résultats suivants :

Station	Méthode de surveillance	Période de mesure	Dose ambiante
(1) Dijon	Débit de dose gamma ambiant mesuré par dosimétrie active (sonde de télémesure)	Données mesurées sur la période : Du 31/12/2008 au 29/08/2014	Dose moyenne : 73,86 nSv/h Maxi mesuré : 96,17 nSv/h Mini mesuré : 59,45 nSv/h
(2) Dijon	Débit de dose gamma ambiant mesuré par dosimétrie passive (dosimètre F1, RF <sub>L</sub> ,...)	01/04/2012 01/07/2012 01/10/2012	69 nSv/h 71 nSv/h 81 nSv/h

Tableau 6 : Débit de dose gamma ambiant mesuré sur la station la plus proche

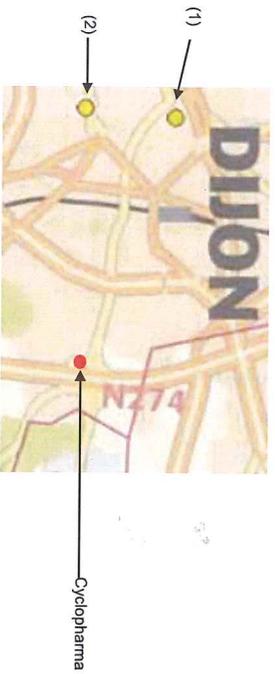


Figure 9 : Localisation des stations de Dijon les plus proches

c. Portail de la mesure de la radioactivité dans l'environnement

Le portail de l'IRSN (<http://sws.irsn.fr/sws/mesure>) fournit également des résultats de surveillance de la radioactivité dans l'environnement de l'établissement.

Les données ci-dessous sont issues des sondes de mesure les plus proches du site.

Station	Méthode de surveillance	Périodes de mesure les plus récentes	Dose ambiante
(1) Dijon 21 AGG CP	Débit d'équivalent de dose moyen (sonde de mesure)	16/12/1999 au 02/10/2013	Dernière mesure : 82 nSv/h (20/10/2013)
(2) Centre de secours principal de Dijon	Dose horaire moyenne (dosimètre environnemental)	19/07/2012 03/10/2012 18/12/2012	69 nSv/h 71 nSv/h 81 nSv/h
(3) Sapeurs pompiers de Dijon	Dose horaire moyenne (dosimètre environnemental)	06/04/2001 au 08/06/2011	Moyennes : 67,58 nSv/h Mini : 41 nSv/h (02/04/2003) Maxi : 95 nSv/h (16/08/2008)

Tableau 7 : Débit d'équivalent de dose et dose horaire moyenne sur les stations les plus proches

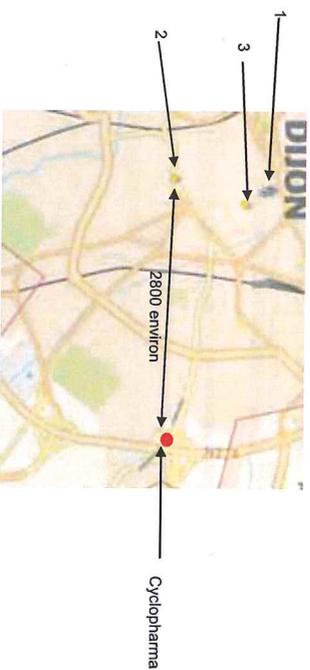


Figure 10 : Localisation des stations les plus proches du site

4.3 DESCRIPTION ZONE D'INTERET PARTICULIER

- La zone d'intérêt particulier est constituée :
- D'établissements de type bureaux
  - De terrains de sports et Gymnases de la faculté des sciences du sport (UFR STAPS)
  - La ligne de Tramway à l'ouest et des voies de circulation routières qui entourent la zone d'activité
  - Des panneaux solaires à l'Est

Le plan ci-dessous donne une représentation de cette occupation :



Figure 11 : Vue aérienne l'environnement de l'établissement avec localisation, des affectations (source goodemap de septembre 2014)

Localisation	Dénomination
1	Terrains de Tennis de UFR STAPS
2	Terrain de foot de UFR STAPS
3	Gymnase de UFR STAPS
4	Institut International Joseph JACOTOT
5	Panneaux solaires
6	Terrains actuellement inoccupés de la zone d'activité

On note qu'aucune habitation n'est présente sur la zone d'étude. L'habitation la plus proche est située à l'Ouest du site à environ 160 mètres



Figure 12 : Localisation de l'habitation la plus proche (source goodemap de septembre 2014)

4.4 SYNTHÈSE DES CIBLES DE L'IMPACT SANITAIRE POTENTIEL

VOIE DE TRANSFERT		POPULATION SENSIBLE EXPOSÉE
Air / Inhalation directe et exposition externe directe	Soil / exposition externe après dépôt au sol	Présence d'ERP dans la zone d'étude (Institut JACOTOT, gymnase de UFR STAPS)
		Terrain de foot dans la zone d'étude
Eau / Ingestion directe	Soil	Pas d'habitation dans la zone d'étude
		Pas de zones de bureaux dans la zone d'étude (Institut JACOTOT (*)
		Pas de captage destiné à l'alimentation en eau potable au niveau de la zone d'étude.
Ingestion	Elevages	Absence de zone d'usage récréatif de l'eau
		Terrain de foot dans la zone d'étude
		Pas d'habitation dans la zone d'étude
		Pas de zones de cultures identifiées dans la zone d'étude

Tableau 8 : Synthèse des cibles

(\*) L'Institut Joseph Jacotot est un espace de recherches et d'études permettant de construire de nouvelles formes de partenariat entre chercheurs et acteurs de la formation professionnelle. Par l'organisation de séminaires de colloques, et la réalisation d'études et de publications, l'Institut Jacotot est un lieu de rencontres et de confrontations des pratiques pour les professionnels, en vue d'identifier des solutions innovantes dans le champ de la formation professionnelle.

## 5 ANALYSE PRELIMINAIRE ET CHOIX DES POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE

### 5.1 INVENTAIRE DES SUBSTANCES EMISES /MODE D'EMISSION

Seul le Fluor 18 émis sous forme gazeuse à l'atmosphère par la société CYCLOPHARMA est retenu pour l'étude.

### 5.2 DESCRIPTION DES DANGERS PRESENTES PAR LES SUBSTANCES : EFFETS SUR LA SANTE HUMAINE & COMPORTEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT

Le fluor est l'élément chimique le plus électronégatif et donc le plus réactif. Il fait partie de la famille des halogènes.

Le Fluor-18 a une période radioactive de 110 minutes et une activité massique de  $3,52 \cdot 10^8$  Bq/g.

Le Fluor-18 se désintègre principalement (97%) par émission de positons ( $\beta^+$ ) qui ensuite sont ralentis et s'annihilent avec des électrons en émettant 2 photons de même énergie dans des directions opposées. Il se désintègre également (3%) par capture électronique suivie d'émissions de RX dont l'énergie et le rendement sont faibles (non reportés dans le tableau ci-dessous).

Principales émissions	Energie (keV)	Pourcentage d'émission
$\beta^+$ (spectre continu)	$E_{max}$	96,7
Photons d'annihilation	511	194

Tableau 9 : Principales émissions du Fluor-18

Produit de filiation	Oxygène-18 (stable)
Equation	$^{18}F \rightarrow ^{18}O + \beta^+$

Tableau 10 : Filiation du Fluor-18

### 5.2.1 Effets biologiques sur la santé humaine

Les rayonnements ionisants sont émis lors de la désintégration de ces radionucléides qui donne naissance à de nouveaux éléments, radioactifs ou non. Ces rayonnements sont appelés ionisants car l'énergie qu'ils génèrent est suffisamment importante pour ioniser les molécules.

Cette énergie peut entraîner des modifications de la matière vivante, au niveau cellulaire où ces rayonnements induisent des lésions. Deux approches sont utilisées pour étudier leurs différents effets biologiques : l'épidémiologie et l'expérimentation sur des molécules ou cellules d'organismes vivants. Les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme varient en fonction de la dose reçue et de différents facteurs : la source (activité ou intensité de fonctionnement, nature, énergie ...), le mode d'exposition (temps, débit ...) et la cible (tissus ou organes touchés, âge de l'individu ...).

Les radionucléides présents dans l'air, se déposent sur les sols et les sédiments, migrent dans les chaînes alimentaires et peuvent atteindre l'homme. Les particules et les gaz radioactifs présents dans l'air délivrent une dose à l'homme par irradiation externe, mais également par irradiation interne pour les particules inhalées (aérosols).

Il existe deux types d'effets biologiques :

- **Les effets immédiats (ou déterministes) :** Une forte irradiation par des rayonnements ionisants provoque des effets immédiats sur les organismes vivants comme, par exemple, des brûlures plus ou moins importantes. En fonction de la dose et selon l'organe touché, le délai d'apparition des symptômes varie de quelques heures (nausées, radioréactions) à plusieurs mois. Des effets secondaires peuvent même être observés des années après une irradiation (fibroses, cataracte).  
→ **La présente étude ne considère pas ces effets**

- **Les effets à long terme (effets aléatoires ou stochastiques) :** Les expositions à des doses plus ou moins élevées de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme sous la forme de cancers et de leucémies. La probabilité d'apparition de l'effet augmente avec la dose. Le délai d'apparition après l'exposition est de plusieurs années.

Une pathologie radioinduite n'a pas de signature particulière : il n'existe pas de marqueur biologique permettant de différencier, par exemple, un cancer pulmonaire dû au tabac, d'un cancer pulmonaire radio-induit.

Afin d'exprimer dans une même unité le risque de survenue des effets différés associés à l'ensemble des situations d'exposition possibles, les physiciens ont développé un indicateur appelé "dose efficace", dont l'unité de mesure est le sievert (Sv), du nom du physicien suédois qui fut un des pionniers de la protection contre les rayonnements ionisants.

La dose efficace totale s'entend comme la somme de la dose équivalente corps entier résultant de l'exposition externe et de la dose engagée résultant d'une contamination interne (ingestion et inhalation).

La réglementation nationale de la santé publique et du travail fixe, pour le public et les travailleurs, des limites de doses individuelles annuelles cumulées admissibles :

- **Pour le public, la limite de la dose efficace, par exemple, est fixée à 1 mSv/an.**
- Pour les travailleurs, cette limite est fixée à 20 mSv/an.

*Informations issues du Réseau national de mesures de la radioactivité dans l'environnement  
(portal développé par ASN et IRSN)*

5.2.2 Comportement dans l'environnement

❖ La contamination de l'atmosphère

La contamination de l'atmosphère résulte de la dispersion dans l'atmosphère de gaz radioactif (ci le Fluor-18). Le gaz a tendance à se disperser et à se diluer dans l'air ambiant en fonction des conditions météorologiques. Les particules ou gaz lourds retomberont aux environs immédiats du point d'émission.

La contamination de l'atmosphère est à l'origine d'une contamination des sols, des eaux, des personnes.

❖ La contamination des sols et des eaux

Elle résulte du dépôt sur les sols d'aérosols, ou de gaz radioactifs plus lourds que l'air, de la dispersion de liquides radioactifs ou de la solubilisation de substances radioactives solides.

❖ La contamination des chaînes alimentaires

La dispersion dans l'environnement de radionucléides entraîne un risque de contamination des chaînes alimentaires constituées de séries d'espèces végétales et animales qui se nourrissent les unes des autres.

Les principales voies de transfert d'une étape à une autre dans une chaîne alimentaire sont :

- L'eau de boisson qui peut être directement contaminée par dépôt ou indirectement par infiltration ou ruissellement.
- Les végétaux contaminés par dépôts sur les parties aériennes ou indirectement à la suite de pollution du sol, qui sont broyés par le bétail ; l'homme se contamine en consommant le lait, la viande ou des légumes contaminés.

En pratique, la donnée essentielle qui permet de calculer la dose efficace engagée résultant de la consommation de produits contaminés est leur activité.  
Les activités trouvées en France dans les produits alimentaires en situation normale ne présentent aucun risque pour la santé des populations.

5.3 DETERMINATION DES VOIES DE TRANSFERT RETENUES

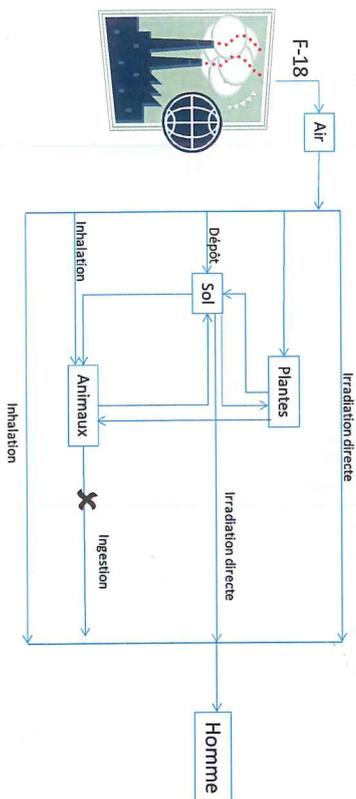


Figure 13 : schéma descriptif des voies de transfert

5.4 DEFINITION DE LA RELATION DOSE-REPONSE

Pour ce qui concerne les pollutions par des substances chimiques, les valeurs sont à rechercher dans diverses bases de données conformément à la circulaire du 30 mai 2006 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact.

Pour ce qui concerne les pollutions par des substances radioactives, il n'existe pas de VTR. Les valeurs de gestion sont à rechercher dans les dispositions du code de la santé publique. Elles peuvent définir un niveau de qualité pour un milieu et un usage donnés. Dans ce cas, elles peuvent être généralement directement comparées à une valeur mesurée. En l'absence de valeur réglementaire applicable à un usage constaté, l'évaluation de la compatibilité entre le niveau de pollution et les usages repose sur une évaluation des expositions radiologiques. Les valeurs de gestion sont donc à rechercher dans le référentiel de radioprotection (code de la santé publique, CIPR, AIEA, OMS...).

Dans le domaine radiologique, la gestion du risque radiologique n'est pas fondée sur des seuils en termes de risque mais de dose. Aucune correspondance simple ne peut être effectuée entre dose et excès de risque individuel.

La dose efficace totale, exprimée en sievert (Sv), constitue un indicateur de risque sanitaire spécifique aux expositions aux rayonnements ionisants. Celui-ci peut être mis en regard de l'excès de risque individuel (ERI) applicable aux substances chimiques sans seuil.

Les dispositions relatives à la protection des populations contre le danger des rayonnements ionisants sont fixées par le code de la santé publique.

Celui-ci fixe à 1 mSv/an la limite maximale des expositions que peuvent recevoir les membres de la population du fait des activités nucléaires (cf. article R1333-8 du code de la santé publique).

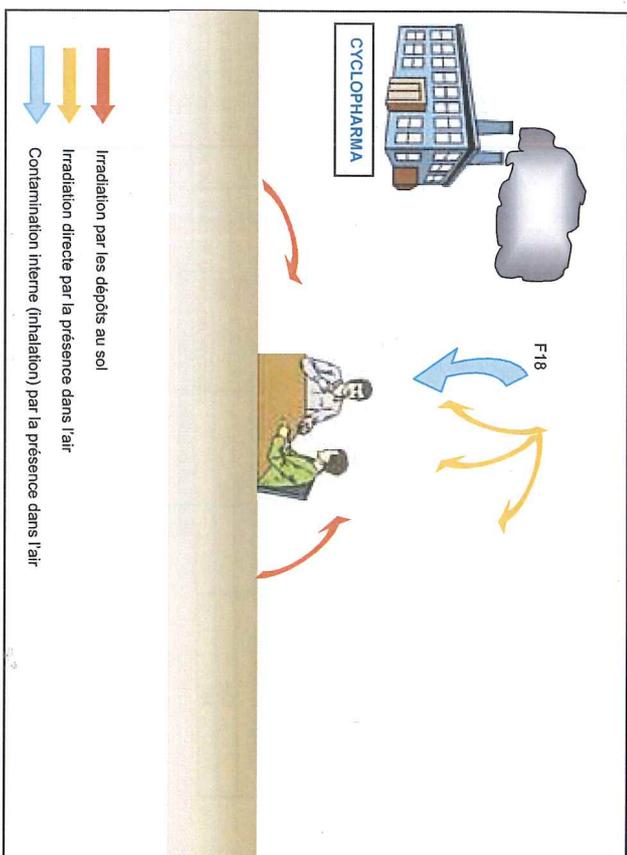


Figure 14 : Schéma conceptuel retenu

Nous retiendrons dans la suite de l'étude, l'exposition des personnes par irradiation directe du fait de l'exposition au Fluor 18 présent dans l'atmosphère ou déposé au sol (dose externe) ainsi que l'exposition par contamination interne du fait de l'inhalation d'air contaminé dans l'environnement du site.

L'exposition par ingestion ne sera pas étudiée, en l'absence de facteur de transfert dans les végétaux pour le Fluor 18.

## 6 EVALUATION DES NIVEAUX D'EXPOSITION

### 6.1 PREAMBULE

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer les niveaux d'exposition des populations voisines du site Cyclopharma de Dijon.

L'évaluation du risque sera conduite comme suit :

- Modélisation de la dispersion dans l'environnement du Fluor 18 émis par l'établissement pour :
  - déterminer les niveaux de concentration de Fluor 18 en Bq/m<sup>3</sup> dans l'air dans l'environnement du site et les dépôts au sol
  - déterminer la dose gamma générée dans l'environnement du site par le Fluor 18 présent dans le panache et déposé au sol
- A partir de ces résultats de modélisation, il sera calculé la dose efficace totale pour une année d'exposition (Dose externe+ Dose engagée) au niveau du point d'exposition maximale et au niveau du point le plus sensible (habitations les plus proches en l'absence de crèche, école, hôpital, maisons de retraités,...)
- La dose efficace totale sera comparée à la limite annuelle admissible (mSv/an)

### 6.2 LOGICIEL UTILISE POUR LA MODELISATION

Le modèle utilisé pour cette étude est un modèle mathématique de dispersion atmosphérique (ADM5), spécialement développé pour évaluer l'impact des rejets atmosphériques d'une grande variété de sources industrielles. Cet outil numérique est largement utilisé et reconnu sur le territoire. Parmi les utilisateurs français, on citera l'INERIS, l'IPSN, Météo France, l'Ecole Centrale de Lyon... Il se base en effet sur les technologies et les connaissances les plus récentes dans le domaine. Le modèle permet principalement de déterminer la trajectoire des panaches polluants émis et d'identifier (et de quantifier) les zones de fortes concentrations en surface autour des sites. Les sources d'émission prises en compte peuvent être ponctuelles (des cheminées par exemple), mais aussi surfactiques et volumiques (sources diffusées), linéiques (routes) et provenant de « jets ». Ces émissions peuvent être variables dans le temps.

Le modèle tient compte des dimensions et propriétés des sources émettrices (hauteur des cheminées, débit, température des émissions...). Il prend également en compte l'influence du relief, de la nature des sols (rugosité) et de la présence des bâtiments du site ou de l'environnement proche susceptibles de perturber la dispersion des polluants. Il permet de simuler la dispersion et le dépôt de panaches composés de gaz et/ou de particules. Les simulations reposent en grande partie sur les conditions météorologiques locales. Ces données météorologiques nous renseignent bien sûr sur le vent (vitesse et direction), mais permettent également de caractériser la structure verticale de l'atmosphère (stabilité, vent ascendant, turbulence, inversion de température...) qui conditionne la dispersion des polluants.

Le modèle intègre, d'une part, un pré-processus météorologique qui rassemble les paramètres spécifiques à la couche limite atmosphérique (couche entre la surface et environ 1500 mètres d'altitude) à partir des données de surface fournies par Météo France. Il intègre, d'autre part, un module de trajectoire qui calcule précisément la trajectoire des panaches. Un module de dynamique des fluides incorpore le relief (nature des sols et topographie) dans les données de surface utilisées par le modèle. A partir des données Météo France locales, ce module dynamique calcule les champs de vent et de turbulence sur tout le domaine d'étude avec une grande précision (résolution de 50 mètres). Un module prenant en compte l'influence aérodynamique des bâtiments est également intégré au modèle. Enfin, grâce à son interface graphique, le logiciel permet une visualisation conviviale et précise du domaine étudié et des zones de fortes concentrations éventuellement rencontrées (cartographie des résultats).

Les paramètres et processus pris en compte par le modèle sont résumés ci-dessous :

- ✓ Les propriétés et caractéristiques des sources et émissions (taux d'émission, dimensions des cheminées et des ateliers émetteurs, propriétés des rejets...)
- ✓ Les données météorologiques locales (vitesse et direction du vent, température de l'air, rayonnement solaire, couverture nuageuse...)
- ✓ Les principaux bâtiments du site et du voisinage, susceptibles par effet aérodynamique de modifier la dispersion des polluants ;
- ✓ La nature des sols (sol urbain, plaine agricole...). Via un paramètre de rugosité de la surface, qui influence la dispersion des rejets ;
- ✓ La topographie (relief), qui perturbe les champs de vent et de turbulence, paramètres prépondérants pour l'étude de la dispersion atmosphérique.

6.3 DONNEES D'ENTREE

Les données qui ont été utilisées pour modéliser la dispersion du Fluor 18 dans l'environnement puis son accumulation sont synthétisées dans le tableau suivant :

Données	Valeurs
Nombre d'émissaire de rejet	1 émissaire (cf détail au §2.5)
Direction du rejet	Emissaire avec rejet vertical chapeauté par le caisson d'aspiration de la pompe à chaleur (*)
Concentration en Fluor 18 dans les rejets	Quantification des émissions 10 000 Bq/m <sup>3</sup> pendant 3 cycles de production (cf détail au §2.5)
Type de polluant	Isotope F18 radioactif sous forme gazeuse - Gaz réactif
Dimensions de l'émissaire de rejet	0,38 m X 1,05 m
Hauteur du point de rejet	8 m
Température	T° réelle indicative : ≈ 20-22 °C T° retenue pour le modèle : T° ambiante (issues des données météo locales)
Vitesse d'éjection	V réelle indicative : ≈ 6,59 m/s V retenue = 0,001 m/s
Débit de rejet	12 000 m <sup>3</sup> /h
Fréquence de fonctionnement de l'installation	Conditions d'émissions : 3 cycles de production consécutifs de 4 heures (entre 01h et 13 heures) du Lundi au Vendredi sur 52 semaines. (cf détail au §2.4)
Données météorologiques	Données tri-horaires de la station de Dijon-Longvic des années 2007, 2008 et 2009. (température, nébulosité, vitesse et direction du vent) La rose des vents est donnée page suivante → Vent dominant : Vent du Nord et vent de Sud-Ouest
Obstacles à la dispersion	Non pris en compte en première approche en dehors du rejet chapeauté (*)

Tableau 11 : Synthèse des données d'entrée pour la modélisation de dispersion atmosphérique

(\*) Les rejets verticaux recouverts d'un chapeau de pluie (ou les rejets coulés ou en façade) ne peuvent pas être modélisés directement sous ADIVS. Ces installations ont pour effet de neutraliser la vitesse d'éjection du panache. L'US EPA recommande [2] de modéliser les sources chapeautées ainsi que les rejets coulés ou en façade par une source ponctuelle dont le diamètre et la vitesse d'éjection sont ajustés.  
La vitesse d'éjection doit être réduite à 0,001 m/s. Ceci permet de diminuer la quantité de mouvement et donc la surélévation du panache. Un diamètre équivalent est alors calculé, afin de conserver le débit volumique de la source, et donc de conserver la flottabilité (liée à la différence de température entre l'émission et l'air ambiant) qui a pour effet d'élever également le panache. Ce nouveau diamètre est donné par :  $d = 31,6 \cdot d' \cdot \sqrt{V_0,5}$  (où V est la vitesse réelle de la source en m/s).  
Toutefois dans tous les cas, il est à noter que le calcul du diamètre équivalent n'a d'intérêt que si la température d'émission du panache est bien supérieure à la température ambiante. Dans le cas contraire, il n'y a pas de phénomène de flottabilité, et réduire la vitesse d'éjection à 0,001 m/s est suffisant.  
[2] Ohio EPA, Division of Air Pollution Control, Air Quality Modeling and Planning Section, Engineering Guide #69, Air Dispersion Modeling Guidance, 2003, p12

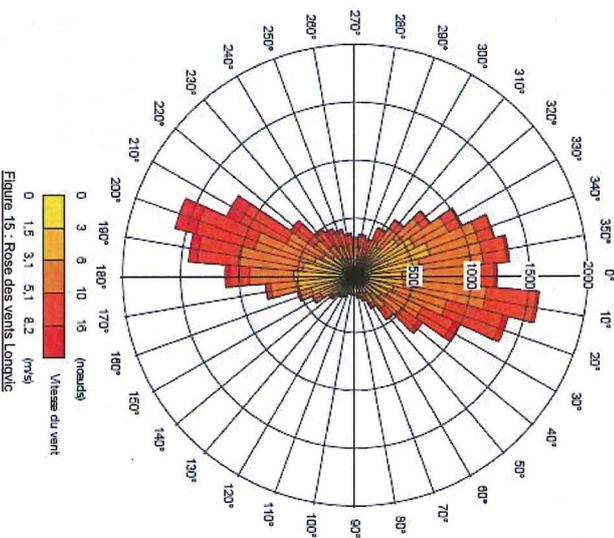


Figure 15 : Rose des vents Longvic

6.3.1 Calcul de la concentration en Fluor 18 en Bq/m<sup>3</sup>

Il s'agit de la valeur de concentration moyenne annuelle cumulée générée par l'activité de l'établissement. (Concentration moyenne permanente dans l'environnement du site générée par les émissions de celui-ci durant toute l'année).

La Cartographie suivante présente donc la concentration moyennée en <sup>18</sup>F dans l'environnement du site en Bq/m<sup>3</sup>.

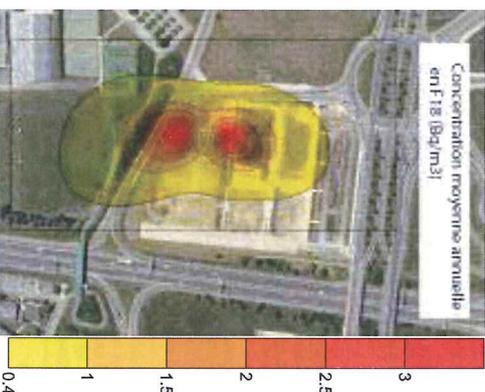


Figure 16 : cartographie des concentrations en Fluor 18 dans l'air dans l'environnement du site

On note un étirement du panache selon l'axe Nord/Sud. En dehors des limites des l'établissement, la zone de retombées maximales est située au nord au niveau de la parcelle 533 sur laquelle il n'y a, à ce jour aucune activité.

La concentration moyenne maximale constatée de Fluor 18 dans l'air ambiant à une hauteur de 1 m par rapport au sol calculée sur la zone d'étude est de 3,3752 Bq/m<sup>3</sup> (point situé à X = 0 et Y = -20 m) par rapport au point de rejet. Ce point est localisé au niveau du site lui-même.

Outre le point correspondant à cette concentration moyenne maximale, quelques points ont fait l'objet d'une analyse spécifique. Les critères de choix de ces points et les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Localisation	Critères de choix	Coordonnées par rapport au point de rejet		Concentration dans l'air à 1 m en ce point
		X	Y	
Habitation la plus proche (en dehors zone d'étude retenue)	Habitation la plus proche	-160	-25	6,14392. 10 <sup>2</sup> Bq/m <sup>3</sup>
Terrain de foot	Zone sensible car activité sportive	0	-140	4,38018. 10 <sup>1</sup> Bq/m <sup>3</sup>
Institut Jacquot	Etablissement le plus proche	0	85	8,06562. 10 <sup>1</sup> Bq/m <sup>3</sup>
Parcelle voisine au nord	zone de retombée maximale en dehors du site	0	30	2,92672 Bq/m <sup>3</sup>
Site lui-même Point max	Le plus impacté : concentration maximale dans l'air à 1 m	0	-20	3,3752 Bq/m <sup>3</sup>

Tableau 12 : valeurs des concentrations de contamination atmosphérique sur les points retenus

6.3.2 Calcul de la dose externe reçue en quelques points particuliers

Le modèle utilisé pour le calcul de dispersion, permet de calculer le débit de dose gamma de rayonnement (irradiation externe) reçue par une personne en un point du fait de la présence du fluor 18 dans l'air et déposé au sol.

Le débit de dose moyen reçu (irradiation externe) au niveau des points sélectionnés ci-dessus (§6.3.1) est donnée dans le tableau suivant :

Localisation	Débit de Dose calculés par le modèle en Sv/s	Débit de Dose Gamma calculés en Sv/h	Dose Gamma calculés en mSv/an	Rapport de la concentration dans l'air à 1 m en ce point
Habitation la plus proche (en dehors zone d'étude retenue)	1,22345. 10 <sup>-5</sup>	4,40442. 10 <sup>-2</sup>	5,46589. 10 <sup>5</sup>	6,14392. 10 <sup>2</sup> Bq/m <sup>3</sup>
Terrain de foot	4,95899. 10 <sup>-5</sup>	1,78448. 10 <sup>-1</sup>	2,21454. 10 <sup>4</sup>	4,38018. 10 <sup>1</sup> Bq/m <sup>3</sup>
Institut Jacquot	6,46374. 10 <sup>-5</sup>	2,32695. 10 <sup>-1</sup>	2,88774. 10 <sup>4</sup>	8,06562. 10 <sup>1</sup> Bq/m <sup>3</sup>
Parcelle voisine au nord	1,47864. 10 <sup>-4</sup>	5,32310. 10 <sup>-1</sup>	6,60597. 10 <sup>4</sup>	2,92672 Bq/m <sup>3</sup>
Site lui-même Point max	2,13975. 10 <sup>-4</sup>	7,70310. 10 <sup>-1</sup>	9,55955. 10 <sup>4</sup>	3,3752 Bq/m <sup>3</sup>

Tableau 13 : doses reçues par irradiation externe sur les points retenus

6.3.3 Niveau ambiant

Pour mémoire, les débits de doses gamma ambiants mesurés au niveau de la station de Dijon sont redonnés dans le tableau ci-dessous (cf § 4.2.5) :

Station	Méthode de surveillance	Période de mesure	Dose ambiante
Dijon	Débit de dose gamma ambiant mesuré par dosimétrie active (sonde de télémesure)	Du 31/12/2008 au 29/08/2014	Dose moyenne : 73,86 nSv/h Maxi mesure : 96,17 nSv/h Mini mesure : 59,45 nSv/h

Tableau 14 : Débit de dose gamma ambiant mesuré sur la station la plus proche

Pour mémoire, les débits de doses ambiants mesurés au niveau de la station de Dijon sont redonnés dans le tableau ci-dessous (cf § 4.2.5) :

Station	Méthode de surveillance	Période de mesure	Dose ambiante
Dijon 21 AGG CP	Débit d'équivalent de dose moyen (sonde de mesure)	16/12/1999 au 02/10/2013	Dernière mesure : 82 nSv/h (26/10/2013)

Tableau 15 : Débit d'équivalent de dose et dose horaire moyenne sur les stations les plus proches

6.3.4 Contribution de l'établissement

Le tableau ci-dessous fournit le pourcentage de contribution du site au débit de dose ambiant mesuré dans l'environnement sur la station la plus proche.

Débit de Dose Moyen sur la Zone d'Etude (station de Dijon)	Débit de Dose Moyen sur les Points Particuliers (cf § 6.3.2 en Sv/h)		Contribution de l'établissement
	1,78448. 10 <sup>-1</sup> Sv/h	2,41603. 10 <sup>-2</sup> %	
73,86. 10 <sup>-9</sup> Sv/h	2,32695. 10 <sup>-1</sup> Sv/h	3,15048. 10 <sup>-2</sup> %	
	5,32310. 10 <sup>-1</sup> Sv/h	7,20702. 10 <sup>-2</sup> %	
	7,70310. 10 <sup>-1</sup> Sv/h	1,04293. 10 <sup>-1</sup> %	

Tableau 16 : contribution du site au niveau ambiant

## 7 ESTIMATION DU RISQUE SANITAIRE

### 7.1 METHODOLOGIE

Il n'existe pas de notion de VTR pour l'exposition aux rayonnements ionisants.

L'évaluation des risques consiste à situer l'exposition des personnes dans l'environnement de l'établissement vis-à-vis de la limite pour le public (1 mSv par an). C'est impact ajouté pour le public est comparé à la dose moyenne annuelle en France (2,4 mSv).

Pour les populations des groupes de référence, les voies de dépôt considérées sont l'irradiation externe par le panache et les dépôts (rejets radioactifs uniquement) et la dose reçue par inhalation.

La voie ingestion n'étant pas prise en compte dans cette étude en l'absence de données sur le transfert du fluor 18 du sol vers les autres compartiments.

Le rayonnement (irradiation) généré par l'installation elle-même est considéré comme négligeable à plus d'un rayon de 50 mètres.

### 7.2 CALCUL DE LA DOSE EFFICACE TOTALE

#### 7.2.1 Exposition d'une personne adulte située dans la zone de retombées maximales (en dehors du site)

##### a. Données d'entrées et hypothèses

Données	Valeurs	Sources
Type de population considérée	Personnes adultes > 17 A	Hypothèse pour une personne sur son lieu de travail
Concentration dans l'air	2,92672 Bq/m <sup>3</sup> max en dehors du site	Parcelle située au nord de Cyclopharma sur la zone d'activité
Dose en Sv/ls (irradiation par le panache et par les dépôts au sol)	1,47864 · 10 <sup>-14</sup> max en dehors du site	Résultat du calcul de dispersion
Temps d'exposition retenue	8 heures par jour 5 jours par semaine 47 semaines par an	Hypothèse pour une personne sur son lieu de travail
Dose efficace engagée par unité d'incorporation par inhalation	Type F : h = 2,6 · 10 <sup>-11</sup> Sv/Bq Type M : h = 5,6 · 10 <sup>-11</sup> Sv/Bq Type S : h = 5,9 · 10 <sup>-11</sup> Sv/Bq <b>Type retenu = Type S pour calcul majorant</b>	Arrêté du 1 <sup>er</sup> septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants – Annexe III - Tableau 1.2
Débit respiratoire moyen retenu	18 L/minute Soit 0,018 m <sup>3</sup> /minute	INRS - Document d'ont éponyme 76TL23 Débit Ventilatoire de Travail - 1998 Classe d'activité : « Léger »

### b. Calculs associés

- Calcul de la dose équivalente corps entier pour l'exposition externe=irradiation reçue du à la présence d'une contamination atmosphérique dans l'air :

$$D_{\text{externe}} = 1,47864 \cdot 10^{-14} \times 3600 \times 8 \times 5 \times 47 = 1,00 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/lan}$$

$$\text{Débit de dose en Sv/seconde} \times 3600 \text{ secondes} \times 8 \text{ heures} \times 5 \text{ jours} \times 47 \text{ semaines} = \text{Dose en Sv/lan}$$

- Calcul de la dose efficace engagée par inhalation de cette contamination atmosphérique :

$$\text{Quantité inhalée en Bq} : 18 \cdot 10^{-3} \times 60 \times 8 \times 5 \times 47 \times 2,92672 = 5942,41 \text{ Bq/lan de F18}$$

$$\text{Quantité inhalée en Bq} = 18 \cdot (0,3 \text{ m}^3/\text{min}) \times 60 \text{ minutes} \times 8 \text{ heures} \times 5 \text{ jours} \times 47 \text{ semaines} \times \text{concentration en Bq/m}^3$$

$$D_{\text{engagée}} = 5942,41 \times 5,9 \cdot 10^{-11} = 3,51 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/lan}$$

$$D_{\text{moyenne en Sv/lan}} = (\text{Quantité inhalée en Bq/lan}) \times (h \text{ en Sv/Bq})$$

- Calcul de la dose efficace totale :

$$\text{Dose efficace totale} = D_{\text{externe}} + D_{\text{engagée}} = 1,00 \cdot 10^{-7} + 3,51 \cdot 10^{-7} = 4,51 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/lan}$$

#### 7.2.2 Exposition d'un enfant au niveau de la maison la plus proche du site (habitation retenue bien que située en dehors de la zone d'étude car habitation la plus proche et temps plus important)

##### a. Données d'entrées et hypothèses

Données	Valeurs	Sources
Type de population considérée	Enfant < 1 an	Hypothèse pour un nourrisson résidant dans une des ces habitations
Concentration dans l'air	6,14392 · 10 <sup>-2</sup> Bq/m <sup>3</sup>	Résultat du calcul de dispersion
Dose en Sv/ls (irradiation par le panache et par les dépôts au sol)	1,22345 · 10 <sup>-15</sup> Sv/ls	Résultat du calcul de dispersion
Temps d'exposition retenue	24 heures par jour 7 jours par semaine 52 semaines par an	Hypothèse pour nourrisson un résidant en permanence au niveau des zones d'habitations les plus proches
Dose efficace engagée par unité d'incorporation par inhalation	Type F : h = 2,6 · 10 <sup>-10</sup> Sv/Bq Type M : h = 4,1 · 10 <sup>-10</sup> Sv/Bq Type S : h = 4,2 · 10 <sup>-10</sup> Sv/Bq <b>Type retenu = Type S pour calcul majorant</b>	Arrêté du 1 <sup>er</sup> septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants – Annexe III - Tableau 1.2
Débit respiratoire moyen retenu	18 L/minute Soit 0,018 m <sup>3</sup> /minute	Hypothèse majorante retenue (volume équivalent à celui d'un travailleur (cf 7.2.1 ci-dessus))

b. Calculs associés

- Calcul de la dose équivalente corps entier pour l'exposition externe=irradiation reçue du à la présence d'une contamination atmosphérique dans l'air :

$$D_{\text{externe}} = 1,22345 \cdot 10^{-15} \times 3600 \times 24 \times 7 \times 52 = 3,85 \cdot 10^8 \text{ Sv/Jan}$$

$$\text{Débit de dose en Sv/seconde} \times 3600 \text{ secondes} \times 24 \text{ heures} \times 7 \text{ jours} \times 52 \text{ semaines} = \text{Dose en Sv/Jan}$$

- Calcul de la dose efficace engagée par inhalation de cette contamination atmosphérique :

$$\text{Quantité inhalée en Bq} : 18 \cdot 10^3 \times 60 \times 24 \times 7 \times 52 \times 6,14392 \cdot 10^{-2} = 579,67 \text{ BqJan de F18}$$

$$\text{Quantité inhalée en Bq} = 18 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{min} \times 60 \text{ minutes} \times 24 \text{ heures} \times 7 \text{ jours} \times 52 \text{ semaines} \times \text{concentration en Bq/m}^3$$

$$D_{\text{inhalés}} = 579,67 \times 4,2 \cdot 10^{-10} = 2,43 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/Jan}$$

$$D_{\text{engagée en SvJan}} = (\text{Quantité inhalée en BqJan}) \times (h \text{ en Sv/Bq})$$

- Calcul de la dose efficace totale :

$$\text{Dose efficace totale} = D_{\text{externe}} + D_{\text{inhalés}} = 3,85 \cdot 10^8 + 2,43 \cdot 10^{-7} = 2,82 \cdot 10^8 \text{ Sv/Jan}$$

7.3 COMPARAISON AUX VALEURS LIMITES ET DOSES AMBIANTES

7.3.1 Exposition d'une personne adulte située dans la zone de retombées maximales en dehors du site

Dose efficace reçue du fait des émissions de l'établissement (§7.2.1)	4,51 · 10 <sup>-4</sup> mSv/Jan
Dose efficace maximale admissible pour le public	1 mSv/Jan
Dose efficace moyenne annuelle en France	2,4 mSv

La dose efficace totale reçue en une année par un adulte travaillant dans la zone de retombée maximale (hors du site) des émissions de l'établissement représente :

- 4,51 · 10<sup>-2</sup> % de la dose maximale admissible
- 1,88 · 10<sup>-2</sup> % de la dose moyenne d'exposition en France

7.3.2 Exposition d'un enfant au niveau des habitations les plus proches

Dose efficace reçue du fait des émissions de l'établissement (§7.2.2)	2,82 · 10 <sup>-4</sup> mSv/Jan
Dose efficace maximale admissible pour le public	1 mSv/Jan
Dose efficace moyenne annuelle en France	2,4 mSv

La dose efficace totale reçue en une année par un enfant au niveau des habitations les plus proches représente :

- 2,82 · 10<sup>-2</sup> % de la dose maximale admissible
- 1,18 · 10<sup>-2</sup> % de la dose moyenne d'exposition en France

7.4 CONCLUSION

L'exposition générée par l'établissement aux rayonnements ionisants est de l'ordre de 4,51 · 10<sup>-2</sup> % de la dose annuelle admissible au niveau de la zone de retombée maximale hors site (parcelle immédiatement au nord de l'établissement) et de 2,82 · 10<sup>-2</sup> % au niveau des habitations les plus proches (cas majeur d'un nourrisson présent en permanence sur la zone d'exposition). Elle représente également une contribution de l'ordre de 1,88 · 10<sup>-2</sup> % au maximum de la dose moyenne d'exposition en France.

Toutes les configurations étudiées démontrent que l'établissement Cyclopharma de Dijon génère une contribution supplémentaire à la dose annuelle reçue maximale de 0,451 µSv/Jan.

## 8 ANALYSE QUALITATIVE DES INCERTITUDES LIEES A L'EVALUATION

L'évaluation des risques sanitaires est basée sur des hypothèses qui sont assorties de facteurs d'incertitude. Ces facteurs peuvent conduire à une surestimation ou à une sous-estimation des risques. Pour certains facteurs, l'incidence est difficile à établir.

INCERTITUDE	COMMENTAIRES	INFLUENCE SUR LE RESULTAT
Flux pour les émissions canalisées	Flux défini sur la base d'une concentration maximale de 10 000 Bq/m <sup>3</sup> Flux appliqué à l'ensemble des étapes de production.	Surestimation
Fréquence de fonctionnement	Prise en compte dans le modèle des fréquences et périodes de fonctionnement de l'installation	Non déterminable *
Modèle utilisé	Incertitudes liées au modèle de dispersion gaussien ADMS	Non déterminable
Non prise en compte des phénomènes de recirculation liés aux bâtiments	Influence de l'implantation des bâtiments sur les phénomènes de dispersion	Non déterminable
Existence d'une population sensible dans la zone d'étude retenue	Etude réalisée en considérant : - la présence de travailleurs (personnes adultes) dans la zone de concentrations et de retombées maximales (hors site) - la présence permanente de nourrisson au niveau de l'habitation la plus proche (bien que située en dehors de la zone d'étude retenue)	Non déterminable Majorante
Durée d'exposition des personnes dans la zone de concentrations et de retombées	Présence 8 heures par jour, 5 jours par semaine, 47 semaines par an pour les adultes travaillant au niveau de la zone d'exposition maximale hors site (patiole immédiatement au nord de l'établissement) Présence permanente (24h/24, 7j/7, 365 jours par an) de nourrisson au niveau des zones d'habitations les plus proches	Non déterminable Surestimation
Taux de pénétration des polluants à l'intérieur des habitations	Equilibre des concentrations à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.	Non déterminable
Non prise en compte du transfert dans la chaîne alimentaire	Influence négligeable compte tenu du mode d'émission (atmosphère), du caractère gazeux de la substance concernée et de sa réactivité	Négligeable

Tableau 17 : tableaux d'analyse des incertitudes

\* configuration de fonctionnement de référence prise en compte donc les conditions sont expliquées dans l'étude (cf §2.4 et 2.5)

## 9 BIBLIOGRAPHIE ET SOURCES D'INFORMATION

- [1] Evaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des installations Classées pour la Protection de l'Environnement - Substances chimiques, Guide méthodologique, MGENS, 2003.
- [2] Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans l'étude d'impact d'une UICM, Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement (ASTEE), novembre 2003.
- [3] Arrêté du 1<sup>er</sup> septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
  - <http://www.gesoprotail.gouv.fr>
  - <http://www.informet.brgm.fr>
  - <http://www.atmofair-bourgogne.fr>
  - <http://www.mesure-radioactive.fr>
  - <http://www.irsn.fr/irsn/mesure>
  - <http://www.sdes.aulfrance.fr>
  - <http://www.insee.fr>
  - <http://www.grand-dijon.fr>
  - <http://www.maps.aecologie.fr>