

JUIN 2018



“Un seul métier,
L’environnement Atmosphérique”

CISBIO Sarcelles

Etude de dispersion et Evaluation des risques sanitaires liés au fluor 18

Références : Rapport ARIA/2018.044

Documents associés : -

Type de document : Rapport d'études

Avancement du document : Version 2

Accessibilité : Restreint

ARIA Technologies SA

8-10 rue de la Ferme – 92100 Boulogne Billancourt

Tél. : +33 (0)1 46 08 68 60 – Fax : +33 (0)1 41 41 93 17 – E-mail : info@aria.fr - <http://www.aria.fr>
S.A au capital de 779 947 € - SIRET 379 180 474 00049 – Code APE 6201Z – RCS Nanterre B 379 180 474

ARIA Technologies		Titre : CISBIO - Etude de dispersion et Evaluation des risques sanitaires liés au fluor 18						
N° rapport ARIA		18.044						
N° action ARIA		18.117						
Nombre de pages		61	Nombre de figures	21	Nombre de tableaux	20	Nombre d'annexes	2
Auteur(s)		ARIA Technologies, Anne-Sophie SAFFRE						
Sous-traitants		-						
Intérêt documentaire		Accessibilité		Confidentielle		Libre		
Oui		Non	ARIA Technologies		Restreinte			
Etat du document		Rédacteurs Nom/Date			Relecteur Nom/Date			
Version V1		Alisson GODART/ Anne-Sophie SAFFRE Ingénieur Chef de projet Qualité de l'Air Le 13/06/2018			Anne-Sophie SAFFRE Ingénieur Chef de projet Qualité de l'Air Le 13/06/2018			
Version V2		Anne-Sophie SAFFRE Ingénieur Chef de projet Qualité de l'Air Le 28/06/2018			Anne-Sophie SAFFRE Ingénieur Chef de projet Qualité de l'Air Le 28/06/2018			
Diffusion		Date	Destinataires				Nombre	
Diffusion informatique		28/06/18	CISBIO				-	

SOMMAIRE

1. CADRE DE L'ETUDE.....	5
2. METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE.....	6
3. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR.....	7
3.1 Composé étudié.....	7
3.2 Concentrations et flux à l'émission.....	7
4. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION.....	8
4.1 Populations.....	8
4.2 Populations sensibles et installations sportives.....	9
4.3 Usages autour du site.....	14
4.3.1 Usages agricoles.....	15
4.3.2 Activité de loisirs.....	15
4.3.3 Recensement des points d'eau.....	15
5. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE.....	17
5.1 Données d'entrée.....	17
5.1.1 Domaine d'étude.....	17
5.1.2 Obstacles.....	18
5.1.3 Topographie.....	20
5.1.4 Météorologie.....	21
5.2 Détermination des concentrations dans l'air et des dépôts au sol.....	26
5.2.1 Présentation des modèles de dispersion et paramétrages du modèle.....	26
5.2.2 Présentation des résultats.....	28
5.2.3 Concentrations en moyenne annuelle.....	29
5.2.4 Dépôts au sol.....	31
6. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE.....	33
6.1 Identification des dangers.....	33
6.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations.....	33
6.1.2 Relation Dose-Réponse.....	34
6.2 Schéma conceptuel d'exposition.....	35
6.2.1 Voies d'exposition.....	35
6.2.2 Schéma conceptuel d'exposition.....	35
6.3 Estimation des doses d'exposition.....	36
6.3.1 Scénario d'exposition.....	36
6.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation).....	37
6.3.3 Exposition interne par inhalation.....	39
6.4 Evaluation des risques.....	41
6.4.1 Méthodologie.....	41
6.4.2 Evaluation des risques sanitaires.....	41
6.5 Incertitudes.....	43
6.5.1 Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique.....	43
6.5.2 Incertitudes relatives à l'évaluation des risques sanitaires.....	44
7. CONCLUSION.....	46
ANNEXES.....	47
Annexe 1 : Rose des vents décennale de la station Météo-France Le Bourget.....	48
Annexe 2 : Description du logiciel MSS.....	50

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAUX

Tableau 1 : émissions prises en compte.....	7
Tableau 2 : données de population (Source : Insee, Recensements de la population, mis en ligne le 29/06/2017)	9
Tableau 3 : liste des populations sensibles et des équipements sportifs dans le domaine d'étude	10
Tableau 4 : recensement agricole 2010 (recensement le plus récent disponible : http://recensement-agricole.agriculture.gouv.fr/)	15
Tableau 5 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent.....	22
Tableau 6 : statistiques relatives à la pluviométrie.....	24
Tableau 7 : paramètres de calcul des dépôts pour chacune des espèces étudiées.....	27
Tableau 8 : concentrations en moyenne annuelle en fluor 18 (Bq/m ³).....	29
Tableau 9 : dépôts totaux au sol moyens annuels	31
Tableau 10 : Coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe.....	38
Tableau 11 : doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) – Zone la plus exposée	38
Tableau 12 : doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) – Habitation la plus exposée	39
Tableau 13 : doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) – Ecole la plus exposée.....	39
Tableau 14 : volumes d'air inhalés	40
Tableau 15 : doses d'exposition interne par inhalation – Zone la plus exposée	40
Tableau 16 : doses d'exposition interne par inhalation – Habitation la plus exposée	40
Tableau 17 : doses d'exposition interne par inhalation – Ecole la plus exposée	41
Tableau 18 : doses efficace totale – zone la plus exposée.....	41
Tableau 19 : doses d'exposition interne par inhalation – Habitation la plus exposée.....	42
Tableau 20 : doses d'exposition interne par inhalation – Ecole la plus exposée	42

FIGURES

Figure 1 : communes présentes sur le domaine d'étude.....	8
Figure 2 : localisation des populations sensibles et des équipements sportifs	13
Figure 3 : occupation du sol (données CORINE Land Cover 2012).....	14
Figure 4 : localisation des captages d'eau.....	16
Figure 5 : carte du domaine d'étude	17
Figure 6 : bâtiments sur la zone d'étude.....	18
Figure 7 : visualisations 3D des obstacles	19
Figure 8 : topographie du domaine d'étude	20
Figure 9 : rose des vents générale – Toutes classes de vitesse.....	22
Figure 10 : rose des vents générale par classes de vitesses – Station du Bourget.....	22
Figure 11 : répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique.....	23
Figure 12 : variation de la température sur l'année (période du 01/01/2017 au 31/12/2017)	24
Figure 13 : variation de la pluviométrie sur l'année (période du 01/01/2017 au 31/12/2017)	24
Figure 14 : rose des vents calculée à partir des échéances de pluie.....	25
Figure 15 : rose des vents calculée à partir des échéances sans pluie.....	25
Figure 16 : Méthodologie mise en œuvre	27
Figure 17 : localisation des points cibles	28
Figure 18 : carte de concentration en moyenne annuelle en fluor 18 en Bq/m ³	30
Figure 19 : vue des concentrations en moyenne annuelle en fluor 18 en Bq/m ³	31
Figure 20 : carte de dépôts en fluor 18 en Bq/m ² au bout d'un an	32
Figure 21 : schéma conceptuel d'exposition.....	36

1. CADRE DE L'ETUDE

Dans le cadre de sa demande d'autorisation pour le site de Sarcelles, CISBIO a demandé à ARIA Technologies de réaliser une étude de dispersion afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques en fluor 18 sur les riverains du site en fonctionnement normal du site.

Le présent rapport présente l'évaluation des risques sanitaires liés aux rejets en fluor 18 dans l'atmosphère en fonctionnement normal du site. Il a été établi sur la base des informations transmises à ARIA Technologies, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives de la réglementation, en vigueur au moment de la réalisation du dossier (version 1).

La responsabilité d'ARIA Technologies ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été fournies sont incomplètes ou erronées.

2. METHODOLOGIE MISE EN OEUVRE

Cette étude concerne l'étude de l'impact sur la santé des tiers situés dans l'environnement des rejets de l'installation en fonctionnement normal. Le fonctionnement accidentel n'est pas traité dans le présent rapport.

L'évaluation de l'impact sur la santé des rejets atmosphériques du site a été réalisée :

- en adaptant la méthodologie INERIS « Evaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires – Démarche intégrée pour la gestion des émissions des substances chimiques par les installations classées » (août 2013) en application de la circulaire DGPR & DGS du 9 août 2013
- sur la base des données disponibles dans l'arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultants de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

Les étapes constituant la démarche sont les suivantes :

1. Evaluation des émissions de l'installation : caractérisation des émissions du site ;
2. Evaluation des enjeux et des voies d'exposition : schéma conceptuel décrivant les relations entre les sources de polluants, les milieux et vecteurs de transfert, les usages et les populations exposées ;
3. Evaluation prospective des risques sanitaires :
 - a. estimation de la dose efficace totale annuelle générée par les émissions du site ;
 - b. comparaison de la dose efficace annuelle à la valeur limite d'exposition définie par la réglementation et au niveau ambiant mesuré dans l'environnement du site ;
 - c. analyse des incertitudes.

3. INVENTAIRE DES EMISSIONS DANS L'AIR

3.1 COMPOSE ETUDIE

Seul le fluor 18 est étudié dans le cadre de ce rapport.

3.2 CONCENTRATIONS ET FLUX A L'EMISSION

Les émissions à l'atmosphère se font par deux cheminées. Les informations relatives aux sources et aux flux d'émissions ont été transmis par le Client.

Les caractéristiques des cheminées ainsi que les émissions sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : émissions prises en compte

	Unités	Cheminée 1 (SL1)	Cheminée 2 (SL2)
Coordonnée X (UTM31)	km	454,286	454,304
Coordonnée Y (UTM31)	km	5425,594	5425,602
Hauteur /sol	m	8,55	6,75
Diamètre de la cheminée	m	0,70	1,00
Température des rejets	°C	20	20
Vitesse d'éjection	m/s	5,1	4,9
Nombre d'heures de fonctionnement sur l'année	h	3000	3000
Plages de fonctionnement	-	0-12H Lundi-Vendredi	0-12H Lundi-Vendredi
Périodes d'arrêt	-	2 semaines	2 semaines
Emissions en Fluor 18	GBq/an	180	610

4. EVALUATION DES ENJEUX ET DES VOIES D'EXPOSITION

Le site se trouve sur la commune de Sarcelles à proximité immédiate de l'école maternelle privée Ozar Hatorah et en face de l'école maternelle Anne Frank.

4.1 POPULATIONS

Sept communes sont présentes dans le domaine d'étude : Garges-lès-Gonesse, Groslay, Montmagny, Pierrefitte-sur-Seine, Saint-Brice-sous-Forêt, Sarcelles, Stains.

Figure 1 : communes présentes sur le domaine d'étude



Légende

-  Sources d'émissions
-  Domaine d'étude
-  Limites des communes

0 0,25 0,5 1 km



Le Tableau 2 indique les données de population pour les 7 communes citées précédemment.

Tableau 2 : données de population (Source : Insee, Recensements de la population, mis en ligne le 29/06/2017)

Dép.	Communes	Surface de la commune (km ²)	Population légale en 2014	Densité de population 2014 (hab/km ²)	Population principale en 2014 pour les 0 - 14 ans
95	Garges-lès-Gonesse	5,19	41962	8085	11091
95	Groslay	2,93	8654	2953	1859
95	Montmagny	3,00	13757	4585	3149
93	Pierrefitte-sur-Seine	3,38	29324	8675	7381
95	Saint-Brice-sous-Forêt	5,85	14795	2529	3551
95	Sarcelles	8,93	56828	6363	14399
93	Stains	5,38	38022	7067	9512

4.2 POPULATIONS SENSIBLES ET INSTALLATIONS SPORTIVES

Conformément au guide méthodologique INERIS de 2013, sont recensés autour du site :

- les populations sensibles et vulnérables (enfants, personnes âgées, malades) : crèches, établissements scolaires, maisons de retraite, centre de soins ;
- les installations recevant du public (terrains de sport,...).

Dans le domaine d'étude sont recensés :

- 26 structures multi-accueil (crèche, halte-garderie) (Source : lescreches.fr) ;
- 34 écoles maternelles et primaires (source : annuaire de l'éducation nationale <http://www.education.gouv.fr/>);
- 12 collèges et lycées (source : annuaire de l'éducation nationale <http://www.education.gouv.fr/>);
- 7 établissements sanitaires et sociaux (Source : FINESS¹) ;
- 23 équipements sportifs (Source : <http://www.res.sports.gouv.fr/>).

Le Tableau 3 liste les établissements recensés sur la zone et la Figure 2 permet de les localiser.

¹ Fichier National des Etablissements Sanitaires et Sociaux

Tableau 3 : liste des populations sensibles et des équipements sportifs dans le domaine d'étude

Commune	Type d'établissement	Dénomination
Garges-lès-Gonesse	Ecoles	ECOLE MATERNELLE IRENE JOLIOT CURIE
		ECOLE MATERNELLE ET ELEMENTAIRE ANATOLE FRANCE
		ECOLE ELEMENTAIRE PIERRE ET MARIE CURIE
		ECOLE ELEMENTAIRE JEAN DE LA FONTAINE
		ECOLE ELEMENTAIRE ALPHONSE DAUDET
	Collèges - Lycées	LYCEE POLYVALENT ARTHUR RIMBAUD
	Installations sportives	PISCINE D'AGGLOMERATION MURIEL HERMINE
		TERRAIN DE FOOTBALL JULES FERRY
		CENTRE SPORTIF ALLENDE-NERUDA
		PLATEAU MULTISPORTS
	Crèches/Haltes-garderies	VAL ENFANT
		CRECHE FAMILIALE LAMARTINE
		CRECHE COLLECTIVE DEBORAH LEA
		LA MAISON BLEUE
		COMME A LA MAISON
		HALTE-GARDERIE DU PLEIN MIDI
		LES CHOUETTES LUNDIS
		LAEP A L'ESPACE ECOUTE PARENTS
		RAM GARGES LES GONESSES
LES RIGOLOS		
Groslay	Ecoles	ECOLE ELEMENTAIRE LES GLAISIERES
	Installations sportives	SKATE PARC
		TERRAIN DE PETANQUE ROGER RAISON
		STADE SERGE CUKIER
	Crèches/Haltes-garderies	LE JARDIN DES LUTINS
Montmagny	Ecoles	ECOLE ELEMENTAIRE JEAN-BAPTISTE CLEMENT
	Installations sportives	ECOLE D'EQUITATION DE MONTMAGNY
Pierrefitte-sur-Seine	Ecoles	ECOLE MATERNELLE PUBLIQUE FORTES TERRES
		ECOLE MATERNELLE JACQUES PREVERT
		ECOLE MATERNELLE ET PRIMAIRE LOUIS EUGENE VARLIN
	Collèges-Lycées	COLLEGE PABLO NERUDA
	Installations sportives	PLATEAU EPS
Etablissements sanitaires	MAISON DE SANTE PLURIDISCIPLINAIRE PIERREFITTE-SUR-SEINE	
Sarcelles,	Ecoles	ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE ALBERT CAMUS
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE HENRY DUNANT
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE PAULINE KERGOMARD
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE LOUIS PASTEUR
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE JEAN JAURES
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE SAINT EXUPERY
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE JEAN MERMOZ

Commune	Type d'établissement	Dénomination
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE PIERRE ET MARIE CURIE
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE LELONG
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE ANATOLE FRANCE
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE JEAN MACE
		ECOLE ELEMENTAIRE ET MATERNELLE CHANTEPIE
		ECOLE ELEMENTAIRE EMILE ZOLA
		ECOLE MATERNELLE ROBERT DESNOS
		ECOLE MATERNELLE ROMAIN ROLLAND
		ECOLE MATERNELLE ANNE FRANK
		ECOLE MATERNELLE MARIUS DELPECH
		ECOLE ELEMENTAIRE PRIVEE BEITH YAACOV
		ECOLE PRIMAIRE PRIVEE HEDER TACHBAR
		ECOLE PRIMAIRE PRIVEE TORAT EMET
		ECOLE PRIMAIRE PRIVEE LA SALLE SAINT-ROSAIRE
		ECOLE NER
		ECOLE MATERNELLE PRIVEE Ozar Hatorah
	Collèges-Lycées	COLLEGE EVARISTE GALOIS
		COLLEGE JEAN LURCAT
		COLLEGE ANATOLE FRANCE
		COLLEGE CHANTEREINE
		COLLEGE ET LYCEE D'ENSEIGNEMENT PRIVE BEITH YAACOV
		COLLEGE ET LYCEE GENERAL ET TECHNOLOGIQUE PRIVE OZAR HATORAH
		LYCEE GENERAL ET TECHNOLOGIQUE JEAN JACQUES ROUSSEAU
		COLLEGE ET LYCEE GENERAL ET TECHNOLOGIQUE PRIVE LA SALLE – SAINT ROSAIRE
		LYCEE POLYVALENT DE LA TOURELLE
		COLLEGE ET LYCEE GENERAL ET TECHNOLOGIQUE PRIVE TORAT EMET
	Installations sportives	GYMNASE KERGOMARD
		GYMNASE JEAN JAURES
		CENTRE AQUATIQUE INTERCOMMUNAL DE SARCELLES
		GYMNASE CAMUS
		CENTRE SPORTIF NELSON MANDELA
		PARC DES PRES SOUS LA VILLE
		LYCEE JEAN JACQUES ROUSSEAU
		BOULODROME PLACE DE STALINGRAD
		TERRAIN DE FOOTBALL
		BOULODROME CHEMIN DE CHANTEREINE
LYCEE DE LA TOURELLE		
SALLE SAINT SAËNS		
CIRCUIT VRC		
GYMNASE ST EXUPERY		

Commune	Type d'établissement	Dénomination
	Etablissements sanitaires	RESIDENCE SOCIALE MAAVAR
		GCS RISSA SIEGE DE SARCELLES
		HOPITAL PRIVE NORD PARISIEN
		FOYER D'HEBERGEMENT LE PUIITS DE LA MARLIERE
		EHPAD ANNIE BEAUCHAIS
		EHPAD KORIAN LES MERLETTES
	Crèches/Haltes-garderies	CAMILLE-SAINT-SAËNS
		PABLO-REJAS
		CRECHE COLLECTIVE
		MAISON DE QUARTIER VALERY-WATTEAU
		CENTRE SOCIAL DES ROSIERS-CHANTEPIE
		ESPACE PETITE ENFANCE FLORA-TRISTAN
		CENTRE SOCIAL DES SABLONS
		ESPACE PETITE ENFANCE CHANTEPIE
		MAISON DE QUARTIER LES VIGNES BLANCHES
		LES COCCINELLES
		LE MONDE DE PIDIBULLE
		CRECHE COLLECTIVE ASSOCIATIVE HAYA MOUCHKA HOUSE
		LES P'TITS BOUTS D'ELISHEVA
		CRECHE COLLECTIVE ASSOCIATIVE METIVTA
Stains	Ecoles	ECOLE PRIMAIRE ET MATERNELLE PAUL LANGEVIN
	Crèches/Haltes-garderies	CRECHE LE CLOS SAINT LAZARE

La Figure 2 localise les populations sensibles et vulnérables ainsi que les équipements sportifs.

Figure 2 : localisation des populations sensibles et des équipements sportifs



Légende

-  Complexes sportifs extérieurs
-  Etablissements sanitaires et sociaux
-  Collèges - Lycées
-  Ecoles
-  Crèches
-  Sources d'émissions
-  Domaine d'étude

0 0,25 0,5 1 km

4.3 USAGES AUTOUR DU SITE

Comme le montre la Figure 3 (données CORINE Land Cover 2012 d'occupation du sol), le site se trouve dans une zone urbaine. Le domaine d'étude est principalement composé de tissu urbain et de zones industrielles, mais quelques zones de culture sont également présentes.

Figure 3 : occupation du sol (données CORINE Land Cover 2012)



CORINE Land Cover 2012

- 112 : Tissu urbain discontinu
- 121 : Zones industrielles ou commerciales et installations publiques
- 141 : Espaces verts urbains
- 142 : Equipements sportifs et de loisirs
- 211 : Terres arables hors périmètres d'irrigation
- 231 : Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole
- 242 : Systèmes culturaux et parcellaires complexes

- Sources d'émissions
- Domaine d'étude

4.3.1 Usages agricoles

Comme le montre la Figure 3, même si le site se trouve dans une zone urbaine, des zones de cultures se trouvent à proximité.

Le Tableau 4 présente les résultats du recensement général agricole 2010. Le recensement agricole offre un portrait instantané, complet et détaillé, du secteur de l'agriculture (population agricole, surfaces végétales, y compris viticoles, effectifs animaux, moyens de production, activités annexes, etc.).

Tableau 4 : recensement agricole 2010 (recensement le plus récent disponible : <http://recensement-agricole.agriculture.gouv.fr/>)

Communes	Orientation technico-économique de la commune	Exploitations agricoles ayant leur siège dans la commune	Cheptel en unité de gros bétail, tous aliments	Superficie agricole utilisée en hectare	Superficie en terres labourables en hectare	Superficie en cultures permanentes en hectare	Superficie toujours en herbe en hectare
Garges-lès-Gonesse	Fleurs et horticulture diverse	1	0	3	-	0	0
Groslay	Polyculture et polyélevage	9	88	162	-	80	-
Montmagny	Polyculture et polyélevage	2	0	20	-	-	0
Saint Brice sous Forêt	Polyculture et polyélevage	1	0	2	-	-	0
Sarcelles	Fleurs et horticulture diverse	2	0	12	-	0	0

4.3.2 Activité de loisirs

Aucune zone de baignade officielle en rivière ou en mer n'a été recensée dans le domaine d'étude (source : Ministère de la Santé/Baignades).

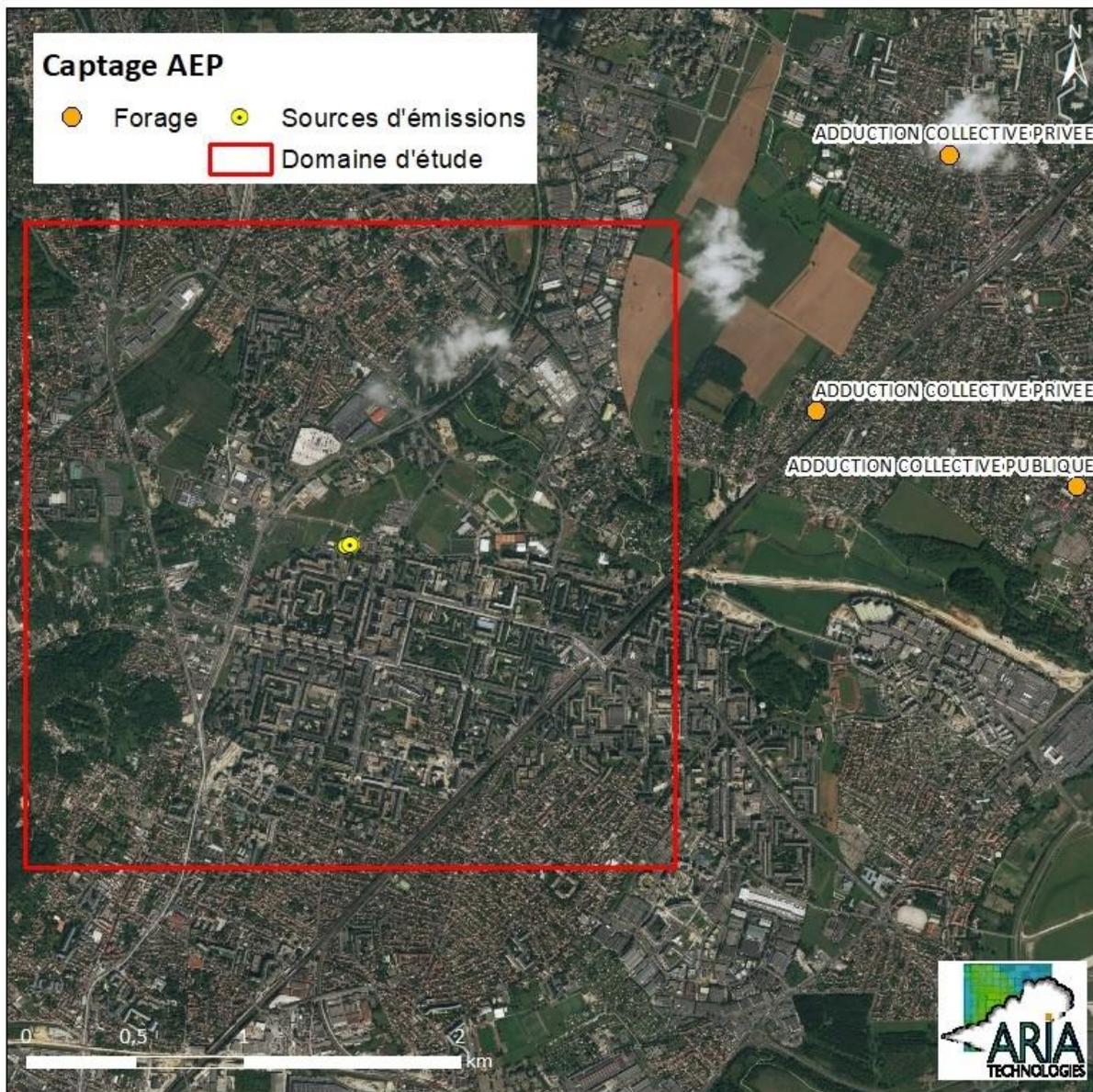
4.3.3 Recensement des points d'eau

La Figure 4 localise les captages d'eau destinée à la consommation humaine, captages en eau souterraine et en eau de surface continentale (rivières, lacs) situés dans le domaine d'étude. Ces données sont issues du référentiel des captages AEP (Alimentation en Eau Potable), disponible sur le site <http://www.ad.es.eafrance.fr/>. Le référentiel des captages d'eau souterraine est élaboré à partir de champs issus d'une part de la base de données du ministère en charge de la Santé SISE-Eaux (Système d'information en santé environnement sur les eaux) et d'autre part de ceux de la banque de données du BRGM BSS EAU (Banque du Sous-sol Eau).

Aucun captage d'eau AEP destinée à la consommation humaine n'est présent dans le domaine d'étude. Le captage le plus proche se trouve à 3,4 km à l'est du site.

Deux points PRV (adduction collective privée) se trouvent à environ 3 km du site.

Figure 4 : localisation des captages d'eau



5. ETUDE DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

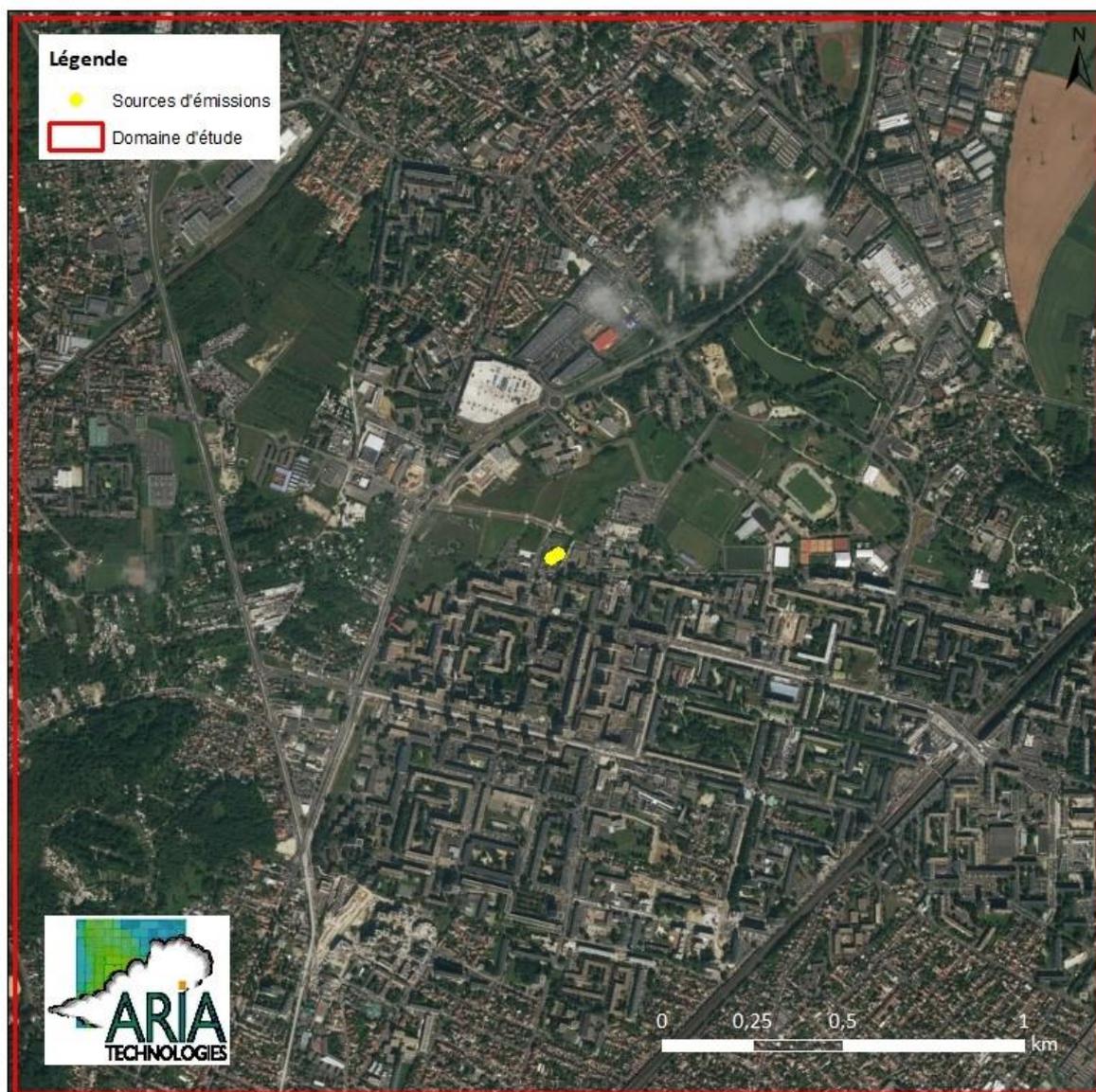
Afin d'estimer les concentrations et dépôts dans l'environnement en fluor 18 attribuables à l'installation, une étude de dispersion a été réalisée.

5.1 DONNEES D'ENTREE

5.1.1 Domaine d'étude

Le domaine d'étude retenu est un carré de 3 km de côté centré sur le site de Sarcelles.

Figure 5 : carte du domaine d'étude



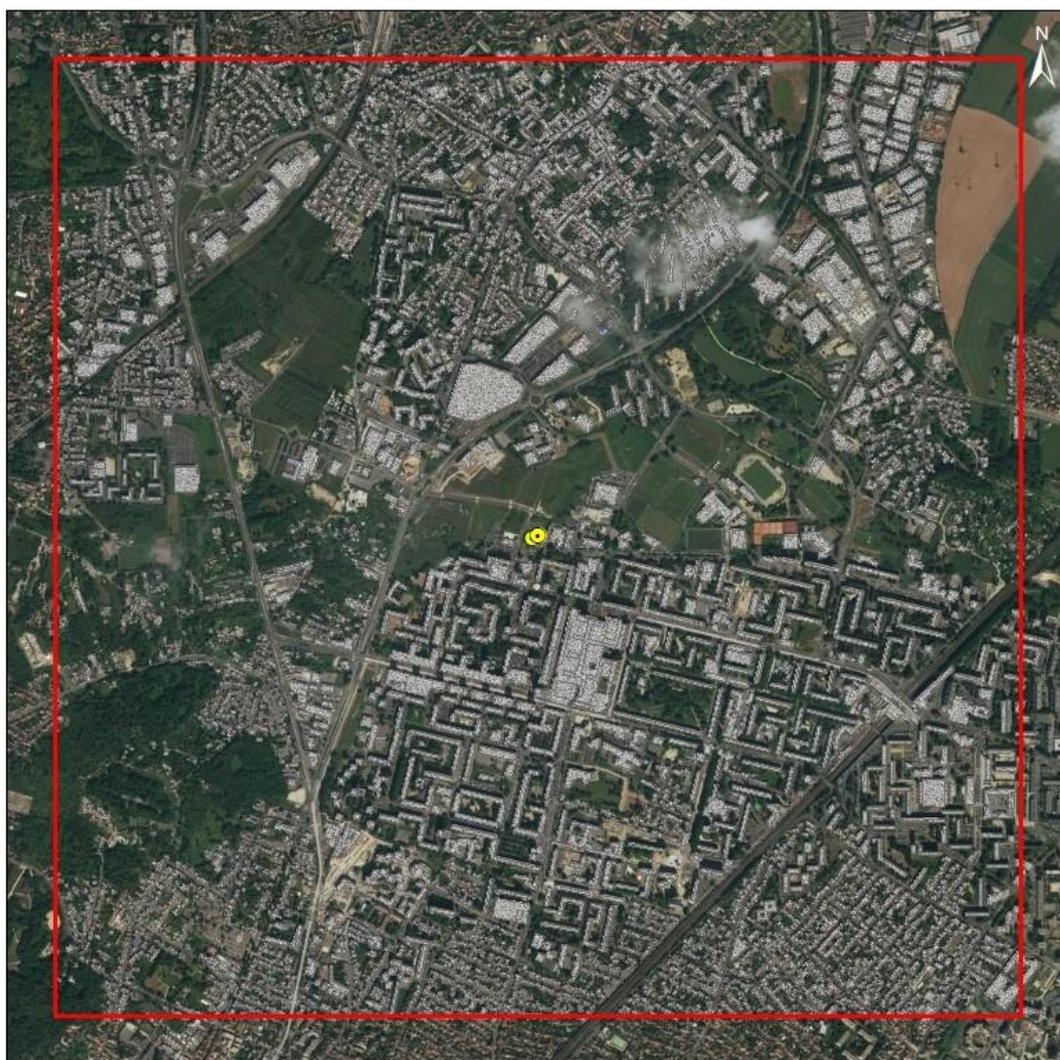
5.1.2 Obstacles

Compte tenu du contexte très urbain et de la présence d'établissements sensibles à proximité immédiate du site (écoles), les bâtiments ont été pris en compte.

Les informations concernant les obstacles sont issues de la BD TOPO® de l'IGN. A partir de ces données, un maillage tridimensionnel fin représentant le domaine d'étude et intégrant les obstacles a été réalisé.

La Figure 6 présente les obstacles de la zone d'étude. La Figure 7 présente des vues 3D des bâtiments.

Figure 6 : bâtiments sur la zone d'étude



Légende

-  Sources d'émissions
-  Domaine d'étude
-  Bâtiments pris en compte dans la modélisation



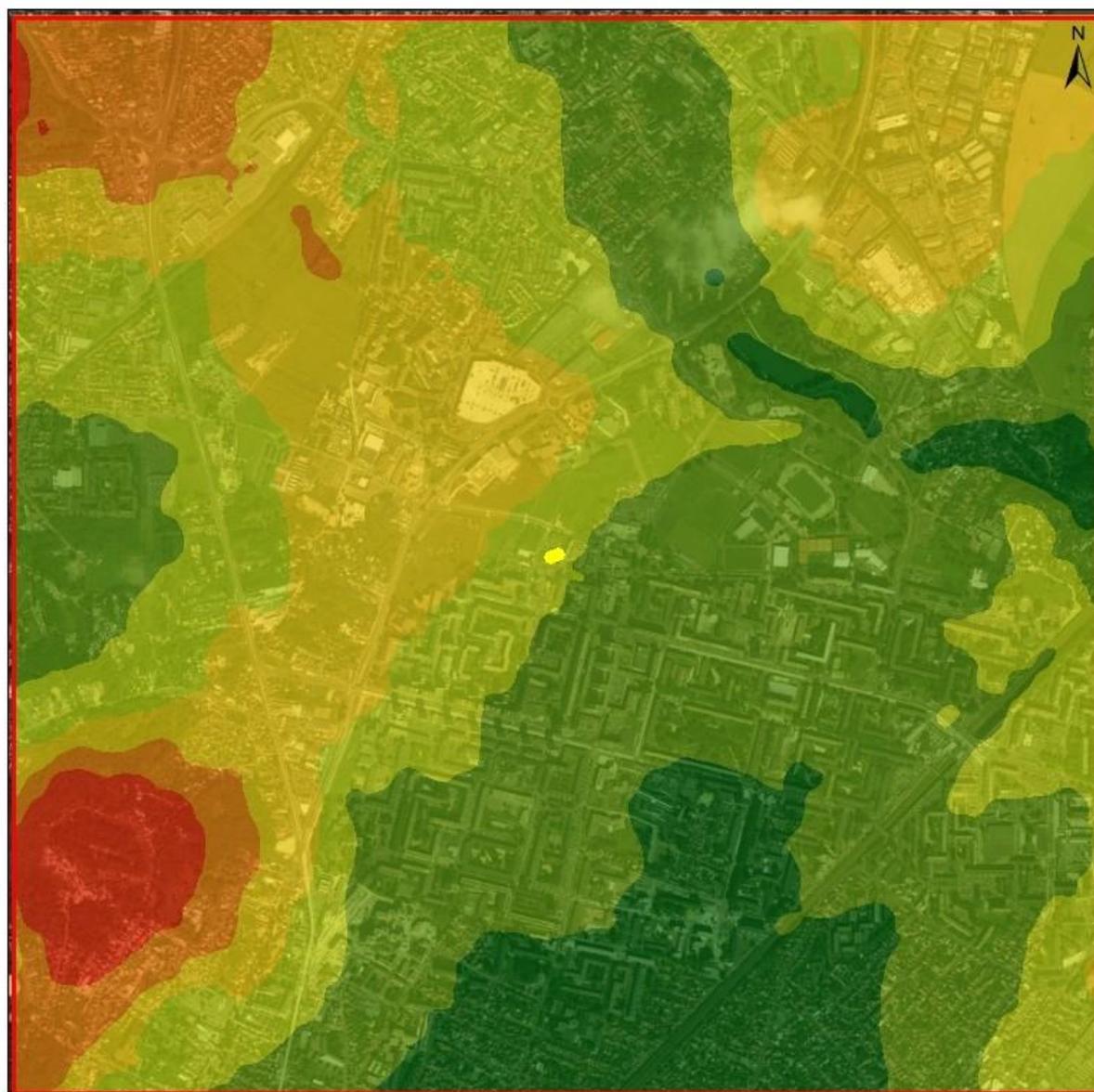
Figure 7 : visualisations 3D des obstacles



5.1.3 Topographie

La topographie est issue d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 75 mètres. La Figure 8 présente une vue 2D de la topographie sur le domaine d'étude. L'unité est le mètre NGF (Nivellement Général de la France). Le relief du domaine d'étude varie entre 42 mètres à 104 mètres environ.

Figure 8 : topographie du domaine d'étude



Topographie (m) ● Sources d'émissions

- < 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- > 100

□ Domaine d'étude

0 0,25 0,5 1
km



5.1.4 Météorologie

Les paramètres les plus importants pour les problèmes liés à la pollution atmosphérique sont : la direction du vent, la vitesse du vent, la température extérieure, la stabilité de l'atmosphère.

Ces paramètres sont variables dans le temps et dans l'espace. Ils résultent de la superposition de phénomènes atmosphériques à grande échelle (régime cyclonique ou anticyclonique) et de phénomènes locaux (influence de la rugosité, de l'occupation des sols et de la topographie). C'est pourquoi il est nécessaire de rechercher des chroniques météorologiques :

- suffisamment longues et complètes ;
- représentatives de la climatologie du site.

5.1.4.1 Données météorologiques

Plusieurs paramètres rentrent en ligne de compte pour le choix de la station météorologique la plus représentative de la zone d'étude :

- **sa position géographique** : la station retenue doit être la plus proche possible de la zone d'étude et il ne doit pas exister d'obstacle majeur entre la station et la zone d'étude ;
- **la cadence d'acquisition des données météorologiques** : Météo France possède des stations où les relevés sont faits toutes les heures et d'autres tous les jours. Pour notre étude, nous avons besoin de données météorologiques suffisamment fines au niveau horaire pour avoir une bonne représentativité de la météorologie locale et pour prendre en compte les phénomènes météorologiques diurnes. Il est habituel d'utiliser des bases de données météorologiques comportant les paramètres vent, température et nébulosité toutes les heures ou toutes les 3 heures pendant une ou plusieurs années. Les stations « journalières » sont donc éliminées ;
- **la pertinence des données météorologiques.**

Selon les critères ci-dessus, les données météorologiques retenues pour la simulation de dispersion (vent, température, pluviométrie, nébulosité) proviennent des observations de la station du Bourget située à environ 4,5 km au sud-est du site. Les données météorologiques utilisées sont des mesures horaires (1 mesure toutes les heures) sur la période du 01/01/2017 au 31/12/2017. La rose des vents sur l'année 2017 (cf. Figure 10) est similaire à la rose des vents décennale présentée en Annexe 1. L'année 2017 est donc caractéristique des conditions de vents sur la zone d'étude.

5.1.4.2 Analyse météorologique

5.1.4.2.1.1 Définitions

Vent calme : les vents calmes sont des vents de vitesse nulle, sans direction associée. Ils ne sont donc pas représentés sur la rose des vents.

Vent faible : les vents faibles sont des vents de vitesse inférieure à 2 m/s.

Classification des vents en fonction de leur vitesse :

Vitesse du vent	Rose des vents
$V < 0,9$ m/s	Vents calmes
$0,1 \text{ m/s} \leq V < 0,9$ m/s	0,5 m/s
$0,9 \text{ m/s} \leq V < 1,5$ m/s	1 m/s
$1,5 \text{ m/s} \leq V < 2,5$ m/s	2 m/s
$2,5 \text{ m/s} \leq V < 6,5$ m/s	3-6 m/s
$6,5 \text{ m/s} \leq V < 12,5$ m/s	7-12 m/s
$V \geq 12,5$ m/s	≥ 13 m/s

5.1.4.2.1.2 Roses des vents

La rose des vents, en un lieu donné, est la représentation graphique des fréquences des vents classées par direction et vitesse. Les intersections de la courbe avec les cercles d'une fréquence donnée fournissent les fréquences cumulées d'apparition des vents en fonction de la direction d'où vient le vent.

La Figure 9 présente la rose des vents générale, avec toutes les classes de vitesse confondues, pour la station météorologique du Bourget sur la période 01/01/2017 au 31/12/2017, tandis que la Figure 10 présente la rose des vents générale par classes de vitesse.

Figure 9 : rose des vents générale – Toutes classes de vitesse

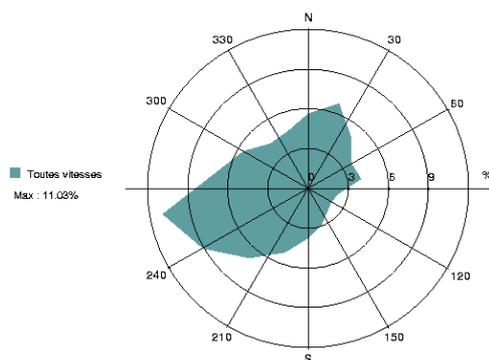


Figure 10 : rose des vents générale par classes de vitesses – Station du Bourget

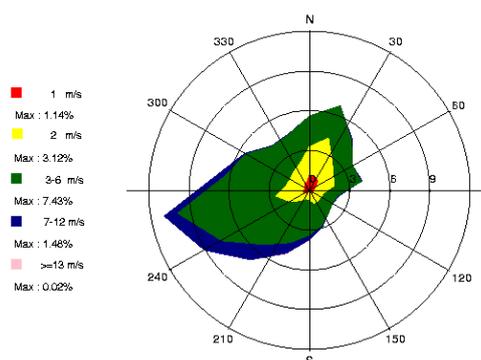


Tableau 5 : fréquence d'apparition de chaque classe de vitesse de vent

Classe de vitesse (m/s)	calmes	1	2	3-6	7-12	≥ 13
Borne de l'intervalle	[0 ; 0,9[[0,9 ; 1,5[[1,5 ; 2,5[[2,5 ; 6,5[[6,5 ; 12,5[[12,5 ; ∞ [
Fréquence (%)	8,3	8,6	23,9	52,7	6,4	0,0

Les principaux résultats de cette analyse sont les suivants :

- la rose des vents générale présente deux directions :
 - une direction très majoritaire de vents de secteur ouest (45,3 % des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 200° et 300°Nord) ;
 - une direction secondaire de secteur nord-est (16,6% des occurrences du vent mesuré ont une direction comprise entre 0° et 60°Nord).
- les vents les plus fréquents (52,7 %) sont les vents de vitesse comprise entre 3 et 6 m/s.
- les vents ont une vitesse moyenne de 11,1 km/h (3,1 m/s).
- les vents faibles (de vitesse inférieure à 2 m/s) sont fréquents puisqu'ils représentent 16,9 % des observations, dont 8,3 % de vents calmes.

5.1.4.2.1.3 Stabilité atmosphérique

La stabilité de l'atmosphère est destinée à quantifier les propriétés diffuses de l'air dans les basses couches. Elle est souvent associée à la structure thermique de l'atmosphère : par exemple, les situations d'inversion thermique se produisent lorsque l'atmosphère est stable.

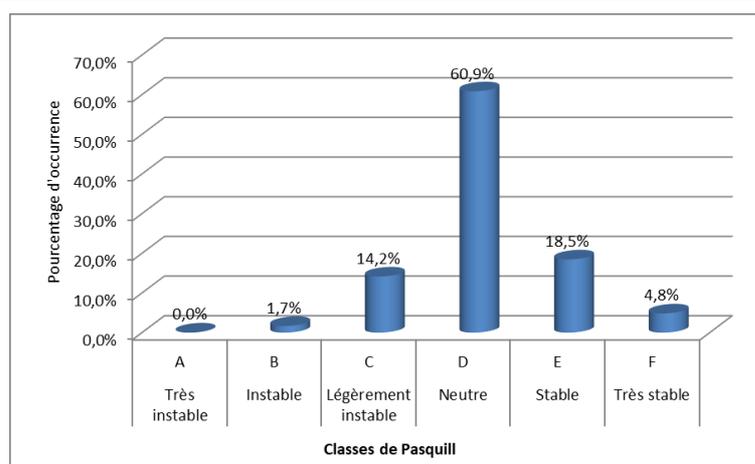
Dans cette étude, elle a été déterminée à partir des données de nébulosité et de vitesse de vent, ce qui conduit à distinguer six catégories de stabilité de l'atmosphère :

- Classe A : Très instable
- Classe B : Instable
- Classe C : Légèrement instable
- Classe D : Neutre
- Classe E : Stable
- Classe F : Très stable

Plus l'atmosphère est stable (catégories E et F), plus les conditions de dispersion sont défavorables. Ces situations freinent le déplacement des masses d'air et se retrouvent principalement par vents faibles et la nuit.

Le diagramme de la Figure 11 présente la répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique.

Figure 11 : répartition des observations en fonction de la stabilité atmosphérique



La classe D de Pasquill est la plus représentée (60,9 %) sur le site, ce qui est favorable pour la dispersion atmosphérique. Les classes E et F (peu favorables au niveau de la dispersion) représentent 23,3 % des observations.

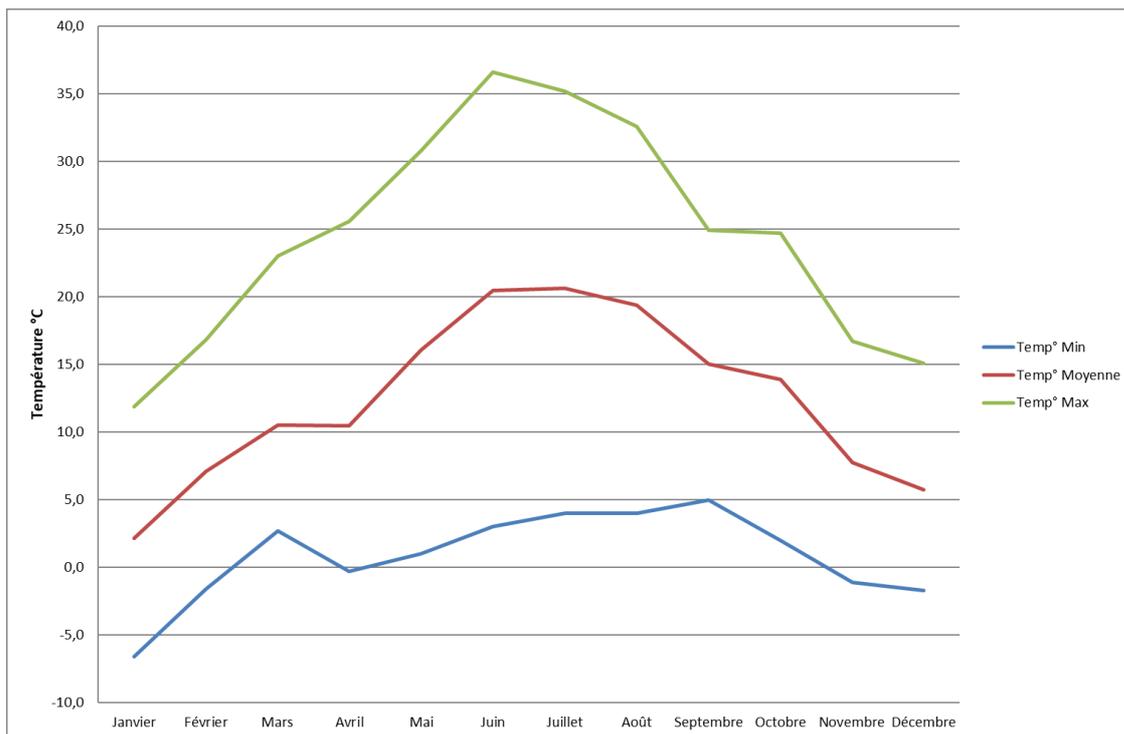
Les vents ont une vitesse moyenne d'environ 2,0 m/s en situation stable - donc pénalisante pour la dispersion des émissions -, tandis qu'en atmosphère neutre, elle est de 3,6 m/s.

5.1.4.2.1.4 Température

La température de l'air, autre paramètre intervenant dans le processus de dispersion des polluants, est en moyenne de 12,4°C sur l'année 2017.

La Figure 12 présente les variations de la température minimale, moyenne et maximale sur l'année.

Figure 12 : variation de la température sur l'année (période du 01/01/2017 au 31/12/2017)



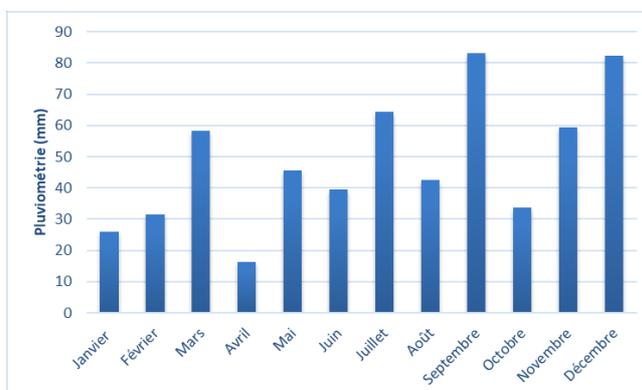
5.1.4.2.1.5 Pluviométrie

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenu compte des données de pluviométrie recueillies sur la station du Bourget.

Tableau 6 : statistiques relatives à la pluviométrie

CUMUL ANNUEL DES PRECIPITATIONS (mm)	
2017	582,3

Figure 13 : variation de la pluviométrie sur l'année (période du 01/01/2017 au 31/12/2017)



Notons qu'en moyenne sur la période étudiée (du 01/01/2017 au 31/12/2017), il est tombé environ 582 mm de pluie par an (cf. Tableau 6).

La rose des vents générale (cf. Figure 10) tient compte à la fois des journées avec pluie et sans pluie. Pour affiner l'interprétation, il est possible de séparer les deux types de journées et obtenir les roses des vents correspondantes (Figure 14 et Figure 15).

Sur l'année considérée (01/01/2017 au 31/12/2017), il apparaît que :

- *Echéances avec pluie* : il pleut environ 7,9% du temps (7,9% des observations correspondent à des échéances avec de la pluie). L'analyse de la Figure 14 permet de constater que, dans ces conditions, les vents proviennent majoritairement de la direction sud-ouest.
- *Echéances sans pluie* : le reste du temps (92,1% des observations), les vents présentent les directions privilégiées de la rose des vents générale (cf. Figure 15).

Figure 14 : rose des vents calculée à partir des échéances de pluie

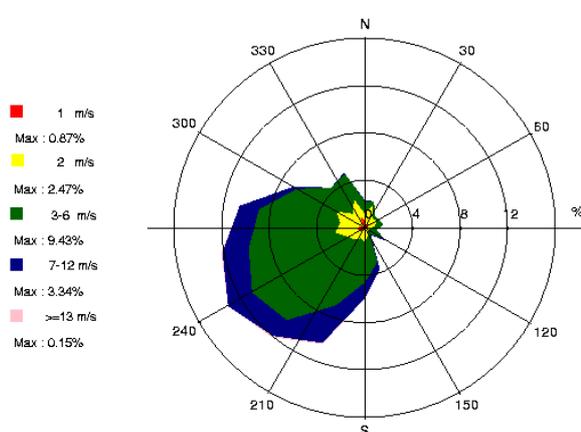
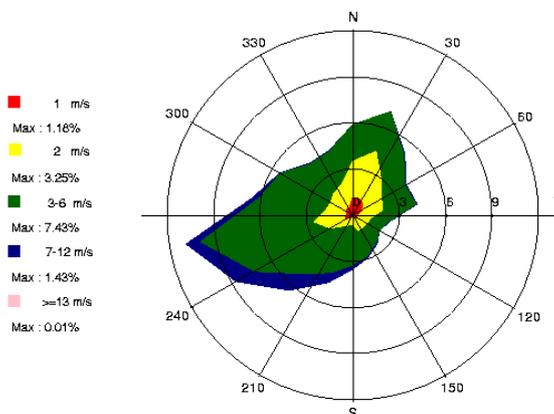


Figure 15 : rose des vents calculée à partir des échéances sans pluie



5.2 DETERMINATION DES CONCENTRATIONS DANS L'AIR ET DES DEPOTS AU SOL

5.2.1 Présentation des modèles de dispersion et paramétrages du modèle

5.2.1.1 Présentation des modèles de dispersion

Deux mécanismes sont prépondérants dans la dispersion des polluants atmosphériques :

- le transport du polluant par le vent (influence des obstacles et des conditions climatiques) ;
- la diffusion du polluant par la turbulence : diffusion (autour de l'axe de propagation) par la turbulence qui reflète les fluctuations du panache par rapport au vent moyen (influence des émissions et de la structure thermique).

Pour les simuler et compte-tenu de la présence de bâtiments, nous avons utilisé le logiciel **ARIA Impact 3D** en mettant en œuvre le modèle 3D **MSS** (ou MICRO SWIFT-SPRAY). MSS un modèle de dispersion tridimensionnel mis au point par ARIA. Contrairement aux modèles gaussiens, ce modèle permet de prendre en compte avec précision les champs météorologiques quelles que soient les conditions atmosphériques et la nature du relief. Il est donc particulièrement adapté à des modélisations de sites complexes, accidentés, ou en milieu urbain, présentant des caractéristiques météorologiques particulières. Grâce à un temps de calcul relativement faible, cet outil permet de représenter les distributions de concentration en présence d'obstacles et d'accéder à l'impact à court terme (situation accidentelle) ou à long terme (moyenne annuelle, centile) des émissions.

MSS est un élément du logiciel HPAC (Hazard Prediction Analysis Code) historiquement développé par ARIA Technologies pour les besoins du US-DOD (United States Department Of Defense). Ce logiciel intègre différents codes de dispersion.

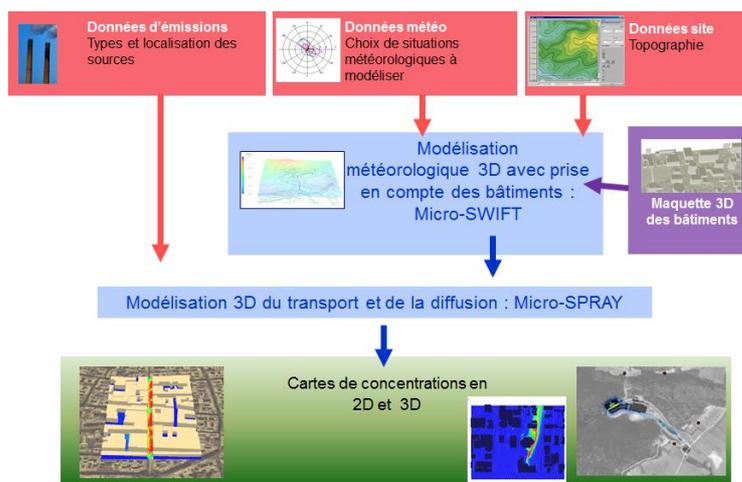
MSS repose sur la mise en œuvre de :

- SWIFT : modèle de calcul de champs tridimensionnels de vent et de température prenant notamment en compte l'influence du relief, de l'occupation des sols et des bâtiments. Il a été validé sur de nombreuses campagnes de mesures réalisées notamment par le US Department of Defence (Defence and Threat Response Agency) ainsi que sur des mesures en soufflerie atmosphérique ;
- SPRAY : modèle lagrangien tridimensionnel de type Monte-Carlo permettant de calculer la dispersion de polluant à partir du champ de vent tridimensionnel calculé par SWIFT, en utilisant un grand nombre de pseudo-particules (le polluant est simulé par des "particules virtuelles").

Une description technique du logiciel est présentée en Annexe 1.

La Figure 16 présente la méthodologie mise en œuvre pour déterminer les concentrations dans l'air.

Figure 16 : Méthodologie mise en œuvre



5.2.1.2 Paramétrages du modèle

5.2.1.2.1 Maillage

Le but étant de modéliser les obstacles présents dans la zone d'étude et pouvant influencer sur les écoulements d'air, ces obstacles ont été modélisés en fonction de leur volume et surtout de leur hauteur. Ces bâtiments ont été pris en compte avec une résolution de 10 mètres dans le plan horizontal et avec une hauteur qui dépend de la répartition des niveaux verticaux. Pour les simulations de la dispersion des polluants, il a été défini 10 niveaux verticaux répartis entre 0 et 60m d'altitude. La hauteur de maille la plus petite est de 2,5 mètres près du sol.

5.2.1.2.2 Surélévation du panache

Le point de départ des trajectoires est le sommet de la cheminée. Lorsque les rejets sont chauds ou que la vitesse d'éjection des fumées est importante, une surhauteur du panache peut être prise en compte. En effet, les fumées de combustion vont s'élever au-dessus de la cheminée jusqu'à ce que leur vitesse ascensionnelle initiale et les effets de différence de densité (due à la différence de température air/fumées) ne soient plus significatifs. MSS permet de prendre en compte la surhauteur d'origine thermique et d'origine dynamique (formule Briggs (US-EPA) modifiée par Anfossi).

5.2.1.2.3 Autres paramètres de calcul

Les simulations ont été réalisées pour des états stationnaires.

Les valeurs des différents paramètres de calcul pouvant influencer la qualité des résultats de modélisation sont :

- Pas de temps d'émissions des particules : 10 s ;
- Nombre de particules émis par pas de temps : 1000 ;
- Durée de moyennage : 3600 minutes.

Le Tableau 7 résume les valeurs utilisées dans le cadre de cette étude pour le calcul des dépôts.

Tableau 7 : paramètres de calcul des dépôts pour chacune des espèces étudiées

Polluant	Phase du polluant	Vitesse de dépôt sec (m/s)	Coefficient de lessivage (s ⁻¹)	Diamètre de particules	Source biblio.
Fluor 18	Particules	5.10 ⁻³	2.10 ⁻⁴	1 µm	[1]

[1] CERES (Code d'Évaluations Rapides Environnementales et Sanitaires)

5.2.2 Présentation des résultats

Les résultats sont exprimés sous forme de :

- concentration en moyenne annuelle exprimées en Bq/m^3 ;
- dépôts au sol pour les espèces particulières exprimés en $Bq/m^2/s$.

Les résultats de l'étude sont donnés sous forme de cartes et de tableaux. Ces résultats ne concernent que la contribution des rejets étudiés.

Les résultats sont également présentés au niveau de points cibles présentés sur la Figure 17.

Figure 17 : localisation des points cibles



5.2.3 Concentrations en moyenne annuelle

Le Tableau 8 présente les valeurs calculées en moyenne annuelle en fluor 18 exprimée en Bq/m³ pour la configuration retenue au niveau des points cibles présentés précédemment (cf. Figure 17) et au niveau de la zone la plus exposée du domaine d'étude (zone de parking à proximité du bâtiment).

Tableau 8 : concentrations en moyenne annuelle en fluor 18 (Bq/m³)

Zone	Concentrations en moyenne annuelle Fluor 18 (Bq/m ³)
Concentration maximale sur la zone d'étude	1,94
Ecole maternelle privée Ozar Hatorah	1,7
Ecole maternelle Anne Frank	0,50
Habitations Sud	0,18
EHPAD Mapi Sarcelles	0,01
Ecole maternelle Jean Macé	0,05
Centre sportif Nelson Mandela	0,05
Points cibles	
Terrain de football	0,04
Ecole élémentaire St Exupéry	0,03
Boulodrome	0,03
Ecole maternelle Robert Desnos	0,03
Ecole privée Ozar Hatorah	0,01
Espace petite enfance Chantepie	0,01
Centre commercial	0,01

La Figure 18 présente la carte de concentration en moyenne annuelle calculée au niveau du sol sur le domaine d'étude pour le fluor 18. Les aplats colorés montrent les zones où les concentrations au niveau du sol sont comprises entre deux valeurs, par exemple, les zones en « bleu clair » correspondent à des concentrations en fluor 18 comprises entre 0,01 et 0,10 Bq/m³. Les cartographies montrent que les concentrations les plus élevées sont situées au nord-est du site (zone de parking) et diminuent rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du site.

Figure 18 : carte de concentration en moyenne annuelle en fluor 18 en Bq/m³

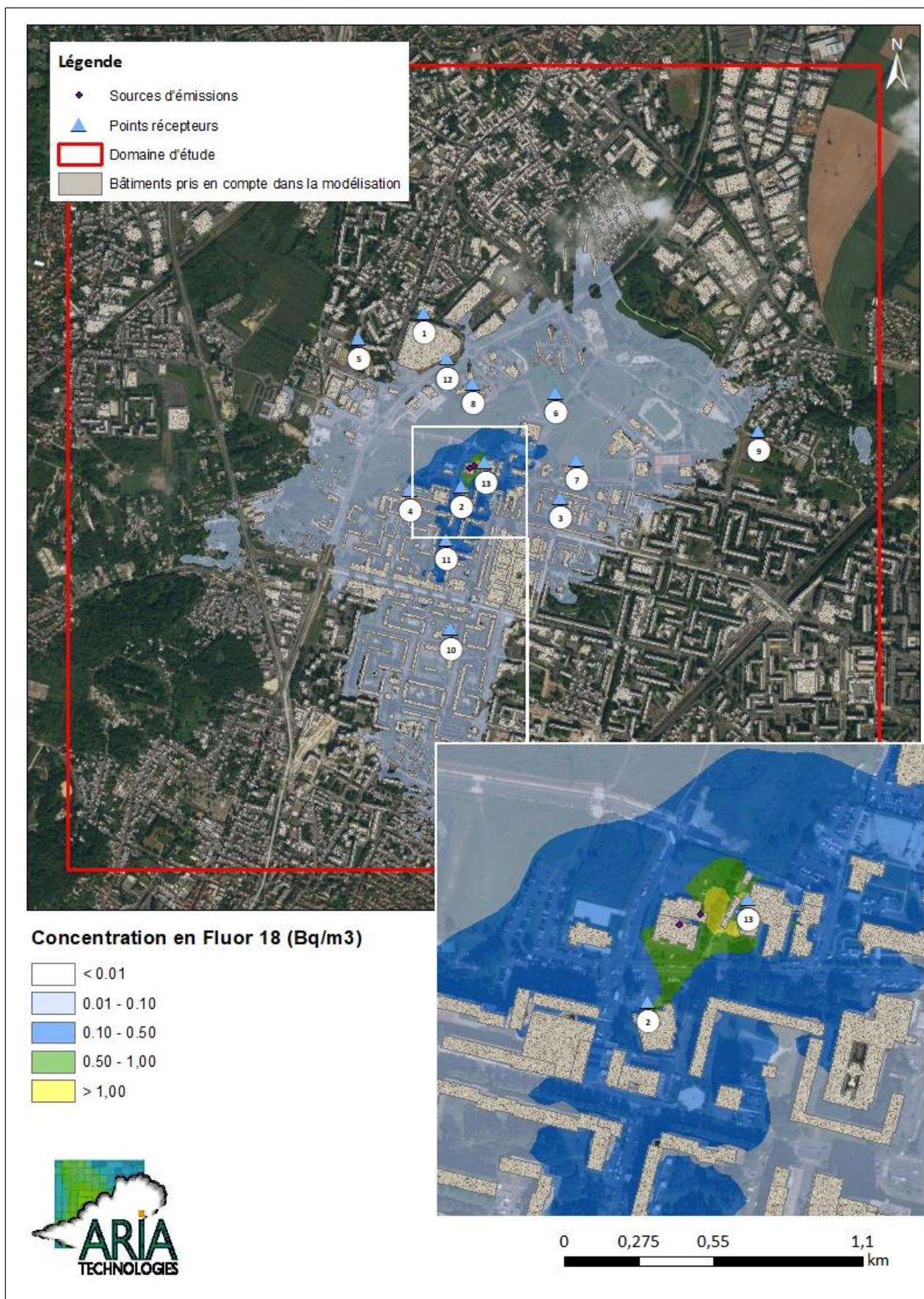
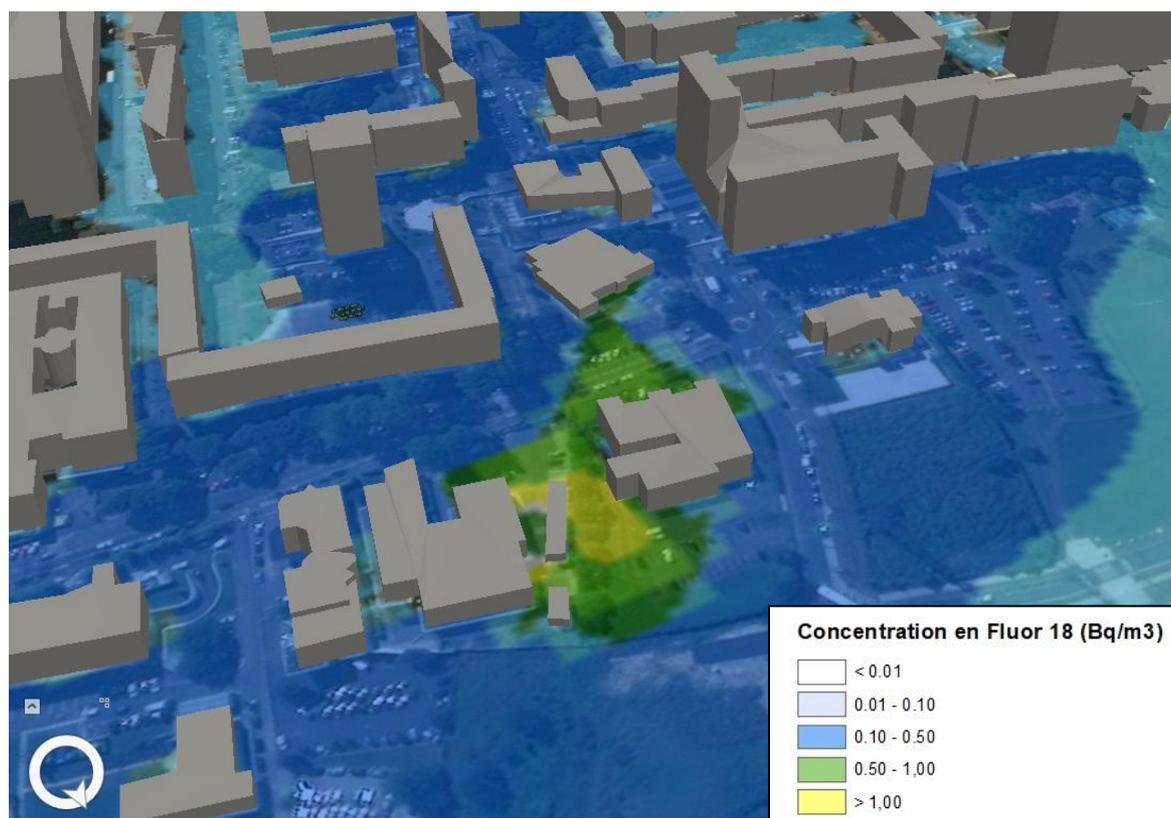


Figure 19 : vue des concentrations en moyenne annuelle en fluor 18 en Bq/m³



5.2.4 Dépôts au sol

Le Tableau 9 présente les dépôts en fluor 18 exprimé en Bq/m²/s et en Bq/m² au bout d'un an au niveau des points cibles présentés précédemment (cf. Figure 17).

Tableau 9 : dépôts totaux au sol moyens annuels

Zone	Dépôts au sol en Bq/m ² /s	Dépôts au sol en Bq/m ² au bout d'un an
Dépôts sur la zone la plus exposée	0,011	107,5
Ecole maternelle privée Ozar Hatorah	0,008	78,2
Ecole maternelle Anne Frank	2,0.10 ⁻³	18,8
Habitations Sud	8,2.10 ⁻⁴	7,8
Ecole maternelle Jean Macé	2,5.10 ⁻⁴	2,4
Centre sportif Nelson Mandela	2,8.10 ⁻⁴	2,7
Terrain de football	2,0.10 ⁻⁴	1,9
Ecole maternelle Robert Desnos	1,8.10 ⁻⁴	1,7
Ecole élémentaire St Exupéry	1,7.10 ⁻⁴	1,6
Boulodrome	1,4.10 ⁻⁴	1,3
Centre commercial	7,0.10 ⁻⁵	0,7
EHPAD Mapi Sarcelles	5,0.10 ⁻⁵	0,5
Ecole primaire privée Ozar Hatorah	5,0.10 ⁻⁵	0,5
Espace petite enfance Chantepie	3,0.10 ⁻⁵	0,3

Les dépôts en Bq/m² au bout d'un an ont été estimés par la formule suivante :

$$A = A_{dep} \times \frac{(1 - e^{-(\lambda_r) \times t})}{\lambda_r}$$

Avec :

A : activité déposée sur le sol sur l'année (Bq.m⁻²),

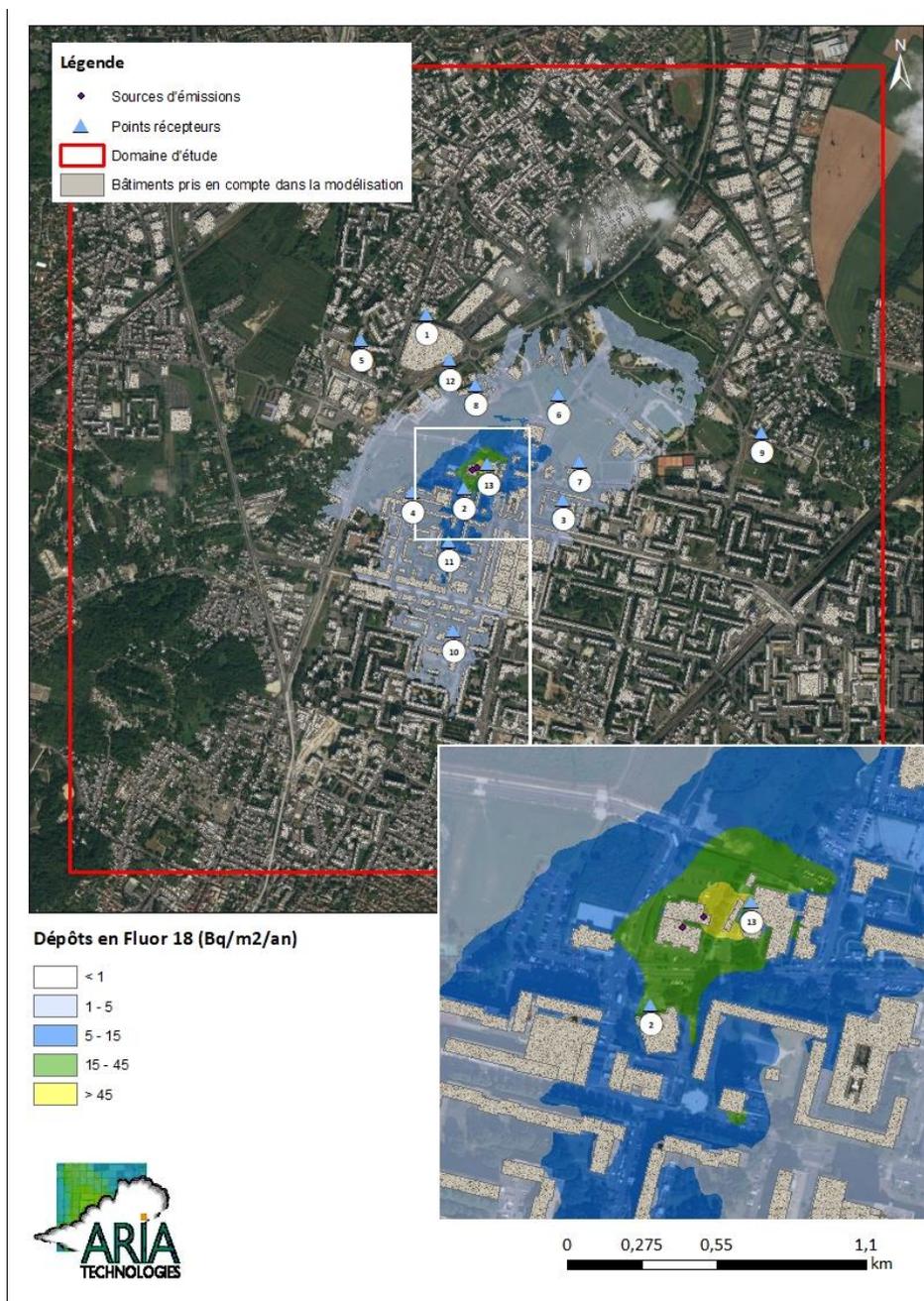
A_{dep} : activité déposée en moyenne sur le sol (Bq.m⁻².s⁻¹),

λ_r : constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s⁻¹) égale à 1.05E⁻⁰⁴ (correspondant à une période radioactive de 6580 s)

t : temps d'accumulation en s (ici t = 1 an)

La Figure 20 présente la carte des dépôts sur le domaine d'étude en fluor 18 exprimés en Bq/m² au bout d'un an.

Figure 20 : carte de dépôts en fluor 18 en Bq/m² au bout d'un an



6. EVALUATION DE L'IMPACT SANITAIRE

6.1 IDENTIFICATION DES DANGERS

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

Le fluor 18 est produit au moyen d'un cyclotron par réactions nucléaires. Le fluor 18 a une période radioactive de 109,8 minutes² et une activité massique de $3,53 \cdot 10^{18}$ Bq/g.

6.1.1 Effets sur la santé humaine et exposition des populations

6.1.1.1 Effets sur la santé humaine (source : www.asn.fr)

Les effets d'un rayonnement ionisant dépendent de sa nature, de la dose absorbée, de l'organe touché. Des doses importantes - qui peuvent être bénéfiques quand elles sont brèves et localisées comme en radiothérapie - provoquent des effets bien identifiés. Suivant la dose reçue et le type de rayonnements, les effets peuvent être plus ou moins néfastes pour la santé.

Ils peuvent être classés en deux catégories :

- les effets à incidences déterministes ou non stochastiques ;
- les effets à incidences aléatoires ou stochastiques.

6.1.1.1.1 *Les effets déterministes*

Les effets déterministes se produisent de manière certaine. Pour des doses élevées (supérieures à plusieurs grays), ils sont observés chez tous les sujets exposés. Ce sont donc des effets à seuil.

Ils se déclarent en général de manière précoce, avec des temps de latence compris entre quelques jours et quelques mois. Leur gravité augmente avec la dose absorbée.

Généralement, les effets déterministes se produisent dans le cas d'une exposition unique à fort débit de dose. Ce sont donc souvent dans le cas de situations accidentelles. Ils ne sont pas étudiés dans le cadre de la présente étude.

6.1.1.1.2 *Les effets à incidences 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 ou de mutations génétiques affectant sa descendance. Dans ce cas, la gravité de l'effet demeure identique quelle que soit la dose ; seule la probabilité d'apparition de l'effet est fonction de la dose absorbée. En d'autres termes, le pourcentage de sujets exposés chez qui on observe ce type d'effet augmente avec la dose.

Le temps de latence (temps séparant l'exposition de l'apparition de l'effet) est en moyenne beaucoup plus long que pour les effets déterministes (plusieurs dizaines d'années). Enfin, on considère que la moindre dose de rayonnement est susceptible de provoquer ce type d'effets.

² source : <https://ecrin.irsn.fr>

6.1.1.2 Exposition des populations

Les radionucléides contenus dans les rejets atmosphériques peuvent atteindre l'homme via l'air, le sol et la chaîne alimentaire. L'exposition d'une personne aux rayonnements ionisants peut exister sous deux formes différentes :

- une **exposition externe** lorsque la source est à l'extérieur de l'organisme ;
- une **exposition interne** lorsque la source de rayonnement est absorbée à l'intérieur de l'organisme.

Les voies de contamination possibles sont les suivantes :

- l'exposition pendant le passage du panache, qui conduit à une exposition externe par irradiation et à une exposition interne par inhalation ;
- l'exposition externe due aux dépôts sur le sol ;
- l'exposition interne par ingestion de produits d'origine végétale cultivés sur des zones de dépôts ; l'activité transférée par cette voie d'exposition provient des dépôts d'aérosols lors du passage du panache et de la pluie sur les végétaux, ainsi que des transferts racinaires depuis les dépôts sur le sol ;
- l'exposition interne par ingestion de produits d'origine animale provenant d'élevages qui ont consommé des produits issus des zones de dépôt.

L'eau de boisson et le poisson ne sont pas considérés comme des vecteurs de transfert des radionucléides émis dans l'atmosphère.

6.1.2 **Relation Dose-Réponse**

Il n'existe pas de Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour l'exposition aux rayonnements.

La réglementation nationale de la santé publique et du travail fixe, pour le public et les travailleurs, définit des limites de doses individuelles annuelles cumulées admissibles. Pour le public, la limite de la dose efficace est fixée à 1 mSv/an. Pour les travailleurs, cette limite est fixée à 20 mSv/an.

L'évaluation des risques se fait en comparant l'exposition des personnes exposées vis-à-vis de la limite pour le public de 1 mSv par an.

6.2 SCHEMA CONCEPTUEL D'EXPOSITION

6.2.1 Voies d'exposition

L'exposition des personnes vivant au voisinage d'une installation émettrice de substances radioactives dans l'atmosphère peut se produire :

- pendant le passage du panache
=> exposition externe par irradiation
=> exposition interne par inhalation
- par les dépôts sur le sol
=> exposition externe par irradiation
- par la consommation des végétaux exposés aux dépôts d'aérosols lors du passage du panache et de la pluie sur les végétaux, ainsi que les transferts racinaires depuis les dépôts sur le sol
=> exposition interne par ingestion
- par la consommation de produits d'origine animale provenant d'élevages qui ont consommé des produits issus des zones de dépôt.
=> exposition interne par ingestion

L'eau de boisson et le poisson ne sont pas considérés comme des vecteurs de transfert des radionucléides émis dans l'atmosphère.

6.2.2 Schéma conceptuel d'exposition

L'installation se trouve dans une zone urbanisée, l'exposition par ingestion est donc peu probable. De plus, le fluor 18 présente une période radioactive courte (moins de 2 heures) ; les phénomènes d'accumulation dans l'environnement et de transfert dans la chaîne alimentaire peuvent donc être considérés comme non significatifs. Par ailleurs, il n'existe pas de facteur de transfert dans les produits animaux pour le fluor 18. L'étude réalisée en 2014 par le CEA³ a montré de plus que la voie d'exposition par ingestion était négligeable. L'exposition par consommation des végétaux et des produits animaux (exposition interne par ingestion) ne sera donc pas retenue dans la présente étude.

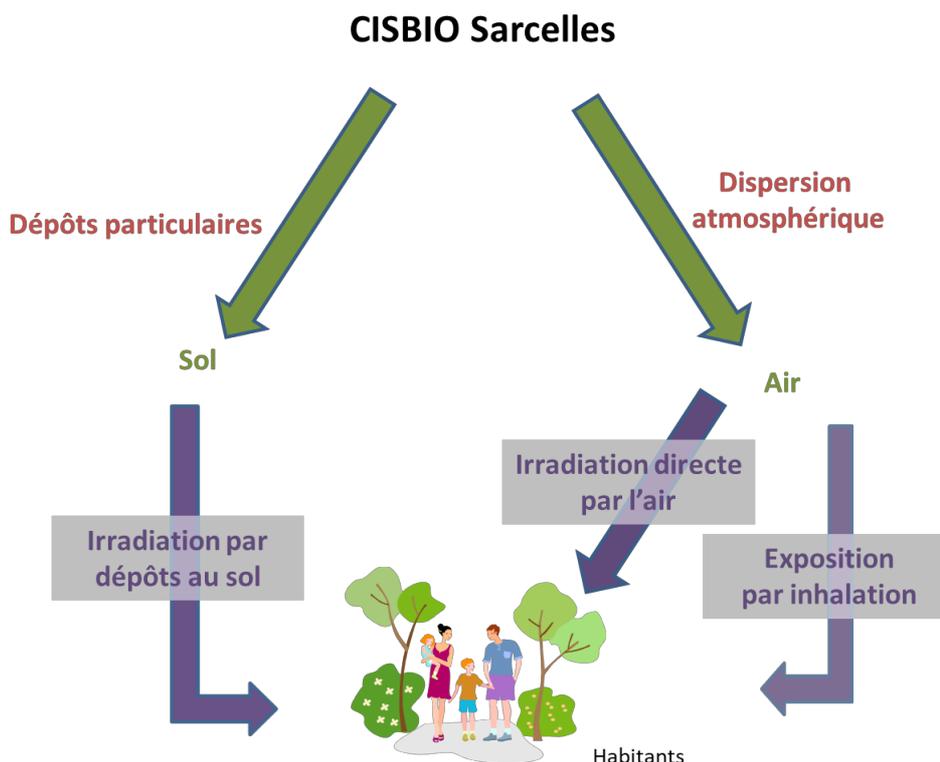
Les voies d'exposition retenues sont donc :

- **L'exposition externe par irradiation (exposition externe au panache et aux dépôts) ;**
- **L'exposition interne par inhalation.**

Le Schéma Conceptuel d'Exposition autour du site est présenté sur la Figure 21.

³ Note CEA d'incidence des rejets gazeux en F18 sur la population pour les sites TEP Paris et Sarcelles, CEA/DIF/DASE/SRCE/211/2014/DO

Figure 21 : schéma conceptuel d'exposition



6.3 ESTIMATION DES DOSES D'EXPOSITION

Les voies d'exposition retenues sont :

- L'exposition externe par irradiation (exposition externe au panache et aux dépôts) ;
- L'exposition interne par inhalation.

L'ensemble des paramètres relatifs au fluor 18 sont issus de la plate-forme ECRIN⁴.

6.3.1 Scénario d'exposition

L'impact radiologique est calculé pour l'adulte (17 ans et plus), l'enfant de 10 ans (représentatif de la tranche 7 à 12 ans) et l'enfant de 1 à 2 ans au niveau :

- de la zone la plus exposée ;
- de la zone habitée la plus exposée (Habitation Sud, cf. Figure 17) ;
- de l'école la plus exposée (Ecole maternelle privée Ozar Hatorah, cf. Figure 17).

En l'absence de données sur le temps passé par les populations sur le domaine d'étude et en dehors du domaine d'étude, et en l'absence aussi de données sur les concentrations d'exposition des personnes pendant le temps passé en dehors du domaine d'étude, il est posé l'hypothèse majorante que les populations séjournent **24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an** sur le domaine d'étude.

Pour l'exposition externe par les dépôts, l'accumulation des dépôts est intégrée classiquement sur un an, et également sur la vie entière (50 ans pour les adultes, et 70 ans pour les enfants quel que soit leur âge).

⁴ <https://ecrin.irsn.fr>

Vue la période du fluor 18 (< 2 heures), les impacts après 1 an, 50 et 70 ans de fonctionnement sont identiques. Seuls les résultats après 1 an d'exposition sont donc présentés dans la suite du document.

6.3.2 Exposition externe (exposition par irradiation)

6.3.2.1 Méthodologie

L'irradiation a lieu :

- Par exposition au panache ;
- Par exposition aux dépôts.

6.3.2.1.1 Exposition externe au panache

La dose efficace annuelle due à l'exposition externe au panache est donnée par :

$$E_{pan} = A_{air} \times CD_{pan} \times F_{tp} \times t$$

Avec :

E_{pan} : dose efficace annuelle due au panache (Sv.an⁻¹)

A_{air} : concentration dans l'air (Bq.m⁻³)

CD_{pan} : coefficient de dose efficace externe au panache (Sv. s⁻¹)/(Bq.m⁻³)

F_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache (s.d.)

t : durée d'exposition (en secondes)

6.3.2.1.2 Exposition externe aux dépôts

La dose efficace annuelle due à l'exposition externe aux dépôts est donnée par :

$$E_{dep} = A_{dep} \times \frac{(1 - e^{-(\lambda_m + \lambda_r) \times t})}{\lambda_r} \times CD_{dep} \times F_{tp} \times t$$

Avec :

E_{dep} : dose efficace annuelle due au dépôt (Sv.an⁻¹),

A_{dep} : activité déposée sur le sol ((Bq.m⁻¹.s⁻¹),

CD_{dep} : coefficient de dose efficace externe au dépôt (Sv.s⁻¹ / Bq.m⁻²)

F_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition externe au dépôt (s.d.).

t : durée d'exposition (en secondes)

λ_r : constante de décroissance radioactive du radionucléide considéré (s⁻¹),

λ_m : constante de décroissance par migration dans le sol du radionucléide considéré (s⁻¹)

En général, la valeur par défaut de la constante de décroissance par migration dans le sol correspond à une période de 100 ans (CCE, 1995) ; elle a été négligée dans cette étude. La formule se simplifie donc de la manière suivante :

$$E_{dep} = A_{dep} \times \frac{(1 - e^{-\lambda_r \times t})}{\lambda_r} \times CD_{dep} \times F_{tp} \times t$$

6.3.2.2 Hypothèses

Les valeurs par défaut des coefficients de dose efficace externe au panache sont issues du Federal Guidance 12 (FGR 12, 1993) et sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : Coefficients de dose utilisés pour l'exposition externe

	Unités	18F
Période radioactive	secondes	6588
constante de décroissance radioactive (λ_r)	s^{-1}	1.05E-4
Irradiation panache (CD_{pan})	((Sv/s)/(Bq/m ³))	4.90E-14
Irradiation dépôt (CD_{dep})	((Sv/s)/(Bq/m ²))	1.01E-15
Durée d'exposition (t)	année	1
	secondes	31536000
Fraction annuelle (F_{tp})	-	1

La fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache est prise égale à 1 par défaut. Il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de cette voie d'exposition.

6.3.2.3 Calcul de la dose d'exposition externe

Les Tableaux 11 à Tableau 13 présentent les doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) respectivement :

- Au niveau de la zone la plus exposée (zone de parking non habitée) ;
- Au niveau de la zone habitée la plus exposée ;
- Au niveau de l'école la plus exposée (école maternelle privée Ozar Hatorah).

Rappelons que vue la période du fluor 18 (< 2 heures), les impacts après 1 an, 50 et 70 ans de fonctionnement sont identiques. Seuls les résultats après 1 an d'exposition sont donc présentés.

Quel que soit l'individu étudié, la dose d'exposition par irradiation est identique car l'exposition par irradiation ne dépend d'aucun paramètre physique lié à l'individu.

Tableau 11 : doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) – Zone la plus exposée

doses d'exposition par irradiation	Unités	Max hors site		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Irradiation Panache	Sv/s	$9,5 \cdot 10^{-14}$	$9,5 \cdot 10^{-14}$	$9,5 \cdot 10^{-14}$
	Sv/h	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$
	Sv/j	$8,2 \cdot 10^{-09}$	$8,2 \cdot 10^{-09}$	$8,2 \cdot 10^{-09}$
	mSv/an	$3,0 \cdot 10^{-03}$	$3,0 \cdot 10^{-03}$	$3,0 \cdot 10^{-03}$
Irradiation dépôts	Sv/s	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$
	Sv/h	$3,9 \cdot 10^{-10}$	$3,9 \cdot 10^{-10}$	$3,9 \cdot 10^{-10}$
	Sv/j	$9,4 \cdot 10^{-09}$	$9,4 \cdot 10^{-09}$	$9,4 \cdot 10^{-09}$
	mSv/an	$3,4 \cdot 10^{-03}$	$3,4 \cdot 10^{-03}$	$3,4 \cdot 10^{-03}$
Irradiation totale	mSv/an	$6,4 \cdot 10^{-03}$	$6,4 \cdot 10^{-03}$	$6,4 \cdot 10^{-03}$

Tableau 12 : doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) – Habitation la plus exposée

doses d'exposition par irradiation	Unités	Habitation la plus exposée		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Irradiation Panache	Sv/s	$9,0.10^{-15}$	$9,0.10^{-15}$	$9,0.10^{-15}$
	Sv/h	$3,2.10^{-11}$	$3,2.10^{-11}$	$3,2.10^{-11}$
	Sv/j	$7,8.10^{-10}$	$7,8.10^{-10}$	$7,8.10^{-10}$
	mSv/an	$2,8.10^{-04}$	$2,8.10^{-04}$	$2,8.10^{-04}$
Irradiation dépôts	Sv/s	$7,9.10^{-15}$	$7,9.10^{-15}$	$7,9.10^{-15}$
	Sv/h	$2,8.10^{-11}$	$2,8.10^{-11}$	$2,8.10^{-11}$
	Sv/j	$6,8.10^{-10}$	$6,8.10^{-10}$	$6,8.10^{-10}$
	mSv/an	$2,5.10^{-04}$	$2,5.10^{-04}$	$2,5.10^{-04}$
Irradiation totale	mSv/an	$5,3.10^{-04}$	$5,3.10^{-04}$	$5,3.10^{-04}$

Tableau 13 : doses d'exposition par irradiation (panache + dépôts) – Ecole la plus exposée

doses d'exposition par irradiation	Unités	Ecole la plus exposée		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Irradiation Panache	Sv/s	$8,3.10^{-14}$	$8,3.10^{-14}$	$8,3.10^{-14}$
	Sv/h	$3,0.10^{-10}$	$3,0.10^{-10}$	$3,0.10^{-10}$
	Sv/j	$7,2.10^{-09}$	$7,2.10^{-09}$	$7,2.10^{-09}$
	mSv/an	$2,6.10^{-03}$	$2,6.10^{-03}$	$2,6.10^{-03}$
Irradiation dépôts	Sv/s	$7,7.10^{-14}$	$7,7.10^{-14}$	$7,7.10^{-14}$
	Sv/h	$2,8.10^{-10}$	$2,8.10^{-10}$	$2,8.10^{-10}$
	Sv/j	$6,6.10^{-09}$	$6,6.10^{-09}$	$6,6.10^{-09}$
	mSv/an	$2,4.10^{-03}$	$2,4.10^{-03}$	$2,4.10^{-03}$
Irradiation totale	mSv/an	$5,0.10^{-03}$	$5,0.10^{-03}$	$5,0.10^{-03}$

6.3.3 Exposition interne par inhalation

Cette voie d'exposition résulte de l'activité inhalée.

6.3.3.1 Méthodologie

La dose efficace annuelle due à l'inhalation est obtenue selon la formule suivante :

$$E_{inh} = A_{air} \times D_{resp} \times CD_{inh} \times F_{tp} \times t$$

Avec :

E_{inh} : dose efficace annuelle par inhalation (Sv.an⁻¹),

D_{resp} : débit respiratoire de l'individu (m³. h⁻¹),

CD_{inh} : coefficient de dose efficace par inhalation (Sv.Bq⁻¹),

F_{tp} : fraction annuelle de temps où l'individu est soumis à l'exposition interne par inhalation (s.d.).

t : durée d'exposition (en heures)

6.3.3.2 Hypothèses

Pour les doses efficaces internes par inhalation, les coefficients de dose utilisés proviennent de l'arrêté du 1er septembre 2003. Ces coefficients de dose correspondent à un diamètre de particules de 1 µm.

Les débits respiratoires considérés sont calculés à partir des volumes d'air inhalés quotidiennement indiqués dans la CIPR 66⁵.

Tableau 14 : volumes d'air inhalés

	Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
volumes d'air inhalés en m³/h (D_{resp})	0,96	0,64	0,22
coefficient de dose efficace en Sv.Bq⁻¹ (CD_{inh})	5.90E-11	1.00E-10	3.10E-10
Fraction annuelle (F_{tp})	1	1	1

La fraction annuelle de temps où l'individu est immergé dans le panache est prise égale à 1 par défaut. Il n'est pas tenu compte de la protection apportée par les habitations vis-à-vis de cette voie d'exposition.

6.3.3.3 Calcul de la dose d'exposition interne

Les Tableau 15 à Tableau 17 présentent les doses d'exposition par inhalation respectivement :

- Au niveau de la zone la plus exposée ;
- Au niveau de la zone habitée la plus exposée ;
- Au niveau de l'école la plus exposée.

Tableau 15 : doses d'exposition interne par inhalation – Zone la plus exposée

doses d'exposition par irradiation	Unités	Max hors site		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Inhalation	Sv/h	1,1.10 ⁻¹⁰	1,2.10 ⁻¹⁰	1,3.10 ⁻¹⁰
	Sv/j	2,6.10 ⁻⁰⁹	3,0.10 ⁻⁰⁹	3,2.10 ⁻⁰⁹
	mSv/an	9,6.10 ⁻⁰⁴	1,1.10 ⁻⁰³	1,2.10 ⁻⁰³

Tableau 16 : doses d'exposition interne par inhalation – Habitation la plus exposée

doses d'exposition par irradiation	Unités	Habitation la plus exposée		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Inhalation	Sv/h	1,0.10 ⁻¹¹	1,2.10 ⁻¹¹	1,2.10 ⁻¹¹
	Sv/j	2,5.10 ⁻¹⁰	2,8.10 ⁻¹⁰	3,0.10 ⁻¹⁰
	mSv/an	9,1.10 ⁻⁰⁵	1,0.10 ⁻⁰⁴	1,1.10 ⁻⁰⁴

⁵ Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Ann. ICRP 24 (1-3), 1994

Tableau 17 : doses d'exposition interne par inhalation – Ecole la plus exposée

doses d'exposition par irradiation	Unités	Ecole la plus exposée		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Inhalation	Sv/h	$9,6.10^{-11}$	$1,1.10^{-10}$	$1,2.10^{-10}$
	Sv/j	$2,3.10^{-09}$	$2,6.10^{-09}$	$2,8.10^{-09}$
	mSv/an	$8,4.10^{-04}$	$9,5.10^{-04}$	$1,0.10^{-03}$

6.4 EVALUATION DES RISQUES

6.4.1 Méthodologie

Il n'existe pas de Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour l'exposition aux rayonnements. L'évaluation des risques se fait en comparant l'exposition des personnes exposées vis-à-vis de la limite pour le public de 1 mSv par an.

L'objectif de l'évaluation de l'impact du rejet de substances radioactives en fonctionnement normal est de situer l'impact ajouté vis-à-vis de la limite réglementaire d'exposition pour le public (1 mSv par an) et des objectifs de sûreté pour les travailleurs. Cet impact ajouté pour le public est comparé à la dose moyenne annuelle en France (2,4 mSv). Les doses efficaces sont évaluées après 1 an et 50 ans de fonctionnement des installations ou encore pour la durée de vie prévue des installations si celles-ci sont bien définies a priori.

6.4.2 Evaluation des risques sanitaires

Les Tableau 11 à Tableau 13 présentent les doses efficaces d'exposition pour respectivement :

- Au niveau de la zone la plus exposée ;
- Au niveau de la zone habitée la plus exposée ;
- Au niveau de l'école la plus exposée (école maternelle privée Ozar Hatorah).

L'impact sanitaire est essentiellement dû à l'exposition externe par irradiation (lors du passage du panache et à l'irradiation par les dépôts). Quelle que soit la zone étudiée et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions en fluor 18 émis par CISBIO est très faible vis-à-vis de la dose admissible en France (0.76% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

Tableau 18 : doses efficace totale – zone la plus exposée

	Unités	Max hors site		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Dose externe (irradiation panache et dépôts)	mSv/an	$6,4.10^{-03}$	$6,4.10^{-03}$	$6,4.10^{-03}$
Dose interne par inhalation	mSv/an	$9,6.10^{-04}$	$1,1.10^{-03}$	$1,2.10^{-03}$
Dose efficace totale	mSv/an	$7,4.10^{-03}$	$7,5.10^{-03}$	$7,6.10^{-03}$
<i>Dose efficace admissible en France</i>	<i>mSv/an</i>	1		
<i>Dose efficace moyenne annuelle en France</i>	<i>mSv/an</i>	2,4		

Tableau 19 : doses d'exposition interne par inhalation – Habitation la plus exposée

	Unités	Habitation la plus exposée		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Dose externe (irradiation panache et dépôts)	mSv/an	$5,3.10^{-04}$	$5,3.10^{-04}$	$5,3.10^{-04}$
Dose interne par inhalation	mSv/an	$9,1.10^{-05}$	$1,0.10^{-04}$	$1,1.10^{-04}$
Dose efficace totale	mSv/an	$6,2.10^{-04}$	$6,3.10^{-04}$	$6,4.10^{-04}$
<i>Dose efficace admissible en France</i>	<i>mSv/an</i>	1		
<i>Dose efficace moyenne annuelle en France</i>	<i>mSv/an</i>	2,4		

Tableau 20 : doses d'exposition interne par inhalation – Ecole la plus exposée

	Unités	Ecole la plus exposée		
		Adulte	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
Dose externe (irradiation panache et dépôts)	mSv/an	$5,0.10^{-03}$	$5,0.10^{-03}$	$5,0.10^{-03}$
Dose interne par inhalation	mSv/an	$8,4.10^{-04}$	$9,5.10^{-04}$	$1,0.10^{-03}$
Dose efficace totale	mSv/an	$5,9.10^{-03}$	$6,0.10^{-03}$	$6,1.10^{-03}$
<i>Dose efficace admissible en France</i>	<i>mSv/an</i>	1		
<i>Dose efficace moyenne annuelle en France</i>	<i>mSv/an</i>	2,4		

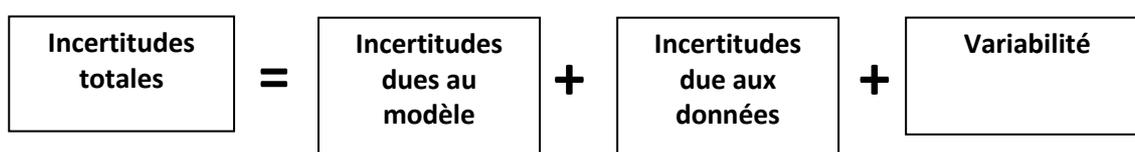
6.5 INCERTITUDES

Ce chapitre a pour objectif d'inventorier les incertitudes liées à la démarche d'évaluation des risques sanitaires ou aux hypothèses retenues dans les différentes étapes.

Les incertitudes sont classées en fonction de l'influence qu'elles peuvent avoir sur les résultats d'évaluation des risques sanitaires, chaque fois que cette précision peut être apportée.

6.5.1 Incertitudes relatives à la modélisation atmosphérique

Les incertitudes liées à la modélisation de pollution de l'air ont été définies (Morgan M.G, 1990) comme étant le cumul, au prorata de leurs contributions, des incertitudes des différentes données nécessaires au fonctionnement du modèle et au modèle lui-même. Ces incertitudes peuvent être résumées par l'équation ci-dessous :



Pour d'autres auteurs, elles ont pour origine trois sources majeures (Hanna, 2004) en ce qui concerne la modélisation de la qualité de l'air :

- La variabilité des résultats due aux fluctuations naturelles de la concentration dans l'atmosphère (turbulence aléatoire). Ce type d'incertitude sera présent dans n'importe quel modèle prenant en compte des phénomènes météorologiques ;
- Les erreurs sur les données d'entrées : émissions, données sur les instruments de mesures ou manque de représentativité des instruments de mesures par exemple ;
- Les erreurs dues à la représentation de la physique dans les modèles soit dues à des erreurs de formulation soit dues à des incertitudes dans les paramètres utilisés dans les formulations.

6.5.1.1 Incertitudes liées au modèle

Dans les modèles complexes prenant en compte de façon fine les géométries et ayant des paramétrisations fines des phénomènes physiques, l'incertitude liée au choix par l'utilisateur des paramètres du modèle, c'est-à-dire des options de calcul mais également de la génération du maillage de calcul peut être grande. Des études ont montré qu'à données identiques, le même modèle mis en œuvre par deux équipes différentes pouvait conduire à des résultats présentant des écarts importants.

Dans le cadre de cette étude, le modèle ARIA Impact retenu est un modèle très simple dont l'essentiel des paramètres a été présenté dans le paragraphe 5.2.1. Les options du modèle retenues pour cette étude sont ceux qui ont été utilisés pour les études de validation du modèle définies ci-dessus. Les limites d'utilisation du modèle ont été respectées.

Concernant les paramètres liés aux polluants (vitesse de dépôt, coefficient de lessivage, type particulière ou non), ces paramètres sont issus de l'état de l'art actuel des connaissances.

6.5.1.2 Incertitudes liées aux données d'entrée

Les données d'entrées du modèle sont de trois natures :

- Les émissions ;
- La météorologie ;
- Les paramètres du modèle choisis.

6.5.1.2.1 Incertitudes liées aux émissions

La concentration calculée par le modèle à une échéance donnée est directement proportionnelle aux flux émis par l'installation pour chaque polluant. Les approximations faites au niveau des émissions ont donc un impact direct sur les concentrations et dépôts calculés.

6.5.1.2.2 Incertitudes liées aux mesures météorologiques

Les données météorologiques sont issues des mesures Météo-France

L'incertitude la plus grande dans la fourniture des données météorologiques est l'incertitude sur la direction du vent qui est de +/- 5°. Ce manque de précision sur la direction de vent peut avoir pour incidence la surestimation des concentrations dans les 36 directions « mesurées » et une sous-estimation dans les zones entre deux données de direction « mesurées ».

Les précisions des mesures de vent d'un dixième m/s et celle de la température d'un dixième de degré Celsius sont largement suffisantes compte tenu de leur intervention dans les équations.

6.5.1.2.3 Incertitudes liées aux paramètres du modèle

Dans les modèles complexes prenant en compte de façon fine les géométries et ayant des paramétrisations fines des phénomènes physiques, l'incertitude liée au choix par l'utilisateur des paramètres du modèle, c'est-à-dire des options de calcul mais également de la génération du maillage de calcul peut être grande. Des études ont montré qu'à données identiques, le même modèle mis en œuvre par deux équipes différentes pouvait conduire à des résultats présentant des écarts importants.

6.5.1.3 Incertitudes liées à la variabilité

Les phénomènes de turbulence de micro-échelle peuvent induire des fluctuations importantes des concentrations et des paramètres météorologiques. Le modèle ARIA Impact ne permet pas aujourd'hui de quantifier les fluctuations de concentrations autour de la concentration moyenne calculée.

6.5.2 Incertitudes relatives à l'évaluation des risques sanitaires

6.5.2.1 Facteurs de sous-estimation des risques

Exposition par voie cutanée non considérée

Il n'existe pas de VTR spécifique à cette voie d'exposition. De plus, la transposition à partir des VTR pour les voies respiratoire et orale n'est pas recommandée (note d'information DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014). Cette sous-estimation n'a pas forcément d'impact sur les résultats d'évaluation des risques sanitaires, étant donné que l'absorption des polluants par voie cutanée est négligeable devant l'absorption par voies respiratoire et/ou digestive (surface d'échange plus importante et transferts facilités).

6.5.2.2 Facteurs de surestimation des risques

La méthodologie pour estimer les risques sanitaires potentiels emploie par nature les principes de précaution et sont par défaut conservatrices.

Durée d'exposition

En absence de données sur le temps d'exposition des personnes, il est pris l'hypothèse qu'elles séjournent sur leur lieu d'habitation en permanence (365 j/an, 24h/24). Cette hypothèse est majorante puisque les personnes ne seront pas exposées en permanence car elles sont amenées à se déplacer pour des raisons personnelles (congés, loisirs) et professionnelles.

Pénétration des polluants dans les habitats

Il est posé l'hypothèse que les polluants ont un taux de pénétration dans les habitats de 100 %, ce qui est une hypothèse majorante.

6.5.2.3 Facteurs dont le sens d'influence sur les résultats n'est pas connu ou est variable

Constance des paramètres

Toutes les données utilisées (émissions, dispersion, transferts, exposition) sont supposées rester constantes pendant les années d'exposition futures étudiées.

Interactions des polluants

En absence de connaissances scientifiques suffisantes sur les interactions des polluants les uns par rapport aux autres et des conditions d'interactions en eux, il a été considéré que les polluants qui avaient la même cible organique et le même mécanisme d'action cumulaient leurs risques. En réalité, les polluants peuvent également avoir des effets antagonistes (dans ce cas nous aurions majoré les risques) ou synergiques (dans ce cas nous aurions minimisé les risques).

7. CONCLUSION

Dans le cadre de sa demande d'autorisation pour le site de Sarcelles, CISBIO a demandé à ARIA Technologies de réaliser une étude de dispersion afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques en fluor 18 sur les riverains du site.

Dans ce contexte, ARIA Technologies a réalisé une étude de dispersion et une estimation des doses d'expositions afin d'estimer l'impact des rejets atmosphériques en fluor 18 sur les riverains du site.

Compte-tenu des propriétés du fluor 18 et de l'environnement urbain du site, les voies d'exposition retenues sont :

- **l'exposition externe par irradiation (exposition externe au panache et aux dépôts) ;**
- **l'exposition interne par inhalation.**

L'impact sanitaire est essentiellement dû à l'exposition externe par irradiation (lors du passage du panache et à l'irradiation par les dépôts). Les doses efficaces totales sont de plus du même ordre de grandeur quelle que soit la classe d'âge considérée pour un même scénario (zone la plus exposée, habitation la plus exposée, école la plus exposée).

Quels que soient la zone étudiée et le profil (enfant de 1 à 2 ans, enfant de 10 ans ou adulte), la dose efficace totale due aux émissions en fluor 18 du site CISBIO de Sarcelles en fonctionnement normal est très faible vis-à-vis de la dose admissible en France (0,7% de la dose admissible pour la dose efficace la plus élevée).

ANNEXES

Annexe 1 : Rose des vents décennale de la station Météo-France Le Bourget



ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Du 01 JANVIER 2006 au 31 DÉCEMBRE 2015

LE BOURGET (95)

Indicatif : 95088001, alt : 49 m., lat : 48°58'00"N, lon : 02°25'36"E

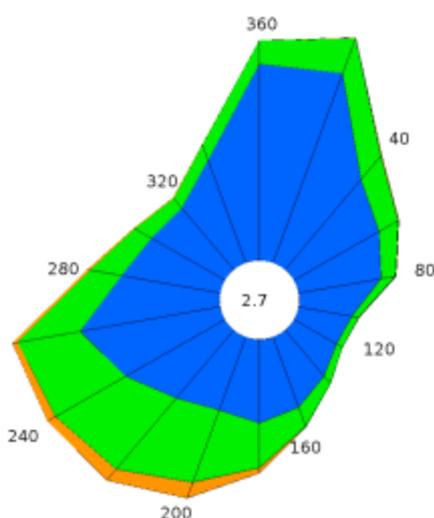
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs trihoraires entre 0h00 et 21h00, heure UTC

Tableau de répartition

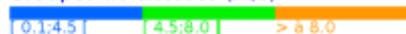
Nombre de cas étudiés : 29213

Manquants : 3



Dir.	[0.1;4.5 [[4.5;8.0 [> = 8.0 m/s	Total
20	7.9	1.4	+	9.4
40	4.6	1.2	+	5.9
60	3.8	0.9	+	4.7
80	3.3	0.6	+	3.8
100	2.1	0.3	+	2.4
120	1.9	0.3	0.0	2.2
140	2.4	0.4	+	2.7
160	2.9	0.8	+	3.8
180	3.3	1.8	0.2	5.3
200	3.0	3.0	0.6	6.7
220	3.5	3.6	0.6	7.7
240	4.4	3.2	0.4	8.0
260	5.5	2.5	0.2	8.2
280	3.9	1.3	+	5.2
300	3.3	0.8	+	4.1
320	3.1	0.5	+	3.7
340	4.3	0.7	+	4.9
360	7.7	0.9	+	8.6
Total	70.9	24.0	2.4	97.3
[0.0;1 [2.7

Groupes de vitesses (m/s)



Pourcentage par direction



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° = Est, 180° = Sud, 270° = Ouest, 360° = Nord
 le signe + indique une fréquence non nulle mais inférieure à 0.1%

Page 1/1

Edité le : 23/09/2016 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Direction de la Production
 42 avenue Gustave Coriolis 31057 Toulouse Cedex
 Fax : 05 61 07 80 79 – Email : climatheque@meteo.fr

Annexe 2 : Description du logiciel MSS

Descriptif du modèle Micro SWIFT

1. Le domaine

Le domaine horizontal est un rectangle (L_x , L_y) dans le système de projection plane choisi (ex.: Lambert, UTM). Les dimensions L_x et L_y varient de 500 m à 500 km.

Le domaine vertical est défini par les masses d'air comprises entre la topographie (définie par un MNT, ie Modèle Numérique de Terrain) et une altitude de contrôle H , typiquement de l'ordre de 1500 à 2500 m, qui doit être plus élevée si le domaine comprend une topographie importante (domaines montagneux).

2. Le maillage

Le maillage horizontal définit un réseau X-Y régulier ou irrégulier, dont le pas peut varier de 1 mètre (en cas de prise en compte de bâtiments) à plusieurs kilomètres. Le maillage horizontal coïncide exactement avec les données du MNT, contenant la matrice des altitudes $ZG_{ij} = ZG(X_i, Y_j)$, où ZG est l'altitude de contrôle de chaque maille.

Le maillage vertical est défini par deux choix :

1. Définition d'une coordonnée verticale transformée S permettant de suivre le terrain:

$$S = (Z - ZG) / (H - ZG)$$

où: Z = altitude / mer de chaque point du maillage.

On a $S=0$ au sol et $S=1$ à l'altitude H par définition.

2. Définition d'un vecteur S_k contenant les valeurs de la coordonnée verticale S pour chaque niveau vertical de maillage, de sorte que les niveaux sont plus rapprochés près du sol ($S=0$) qu'en altitude ($S=1$).

3. Variables

Les variables 3D principales traitées sont toujours les trois composantes du vecteur vent moyen $V(u,v,w)$ dans un système cartésien classique, et de manière optionnelle la température (T) et la diffusivité turbulente suivant la verticale (K_z).

Les variables 3D auxiliaires sont un champ de potentiel de Lagrange intermédiaire (P) calculé pour assurer la conservation de la masse (divergence nulle) et un facteur de transmissivité verticale (α) lié à la stabilité, et dépendant éventuellement de la température et de la vitesse du vent.

4. Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle sont :

Le modèle numérique de terrain (MNT) ;

La description de l'occupation des sols sur le même maillage horizontal ;

Le masque terre - mer (le cas échéant) ;

Une description des bâtiments (facultatif) ;

Toutes les données météorologiques disponibles (Vent, Température).

Les données météorologiques fournies en entrée peuvent être des données de mesure éparées, des données de prévision, des valeurs arbitraires (simulations à caractère académique). Il n'est pas obligatoire que les données météorologiques soient situées à l'intérieur du domaine géographique traité, défini par le MNT.

5. Méthodes de calcul

Micro SWIFT comporte trois étapes de calcul distinctes :

Interpolation des données existantes pour fournir une première ébauche des champs de vent et de température recherchés.

Ajustement itératif, par une méthode variationnelle, de la solution, destiné à créer un champ de vitesses à divergence nulle, en prenant en compte les contraintes imposées par la stabilité atmosphérique.

Calcul de la turbulence de fond (méthode EPA) et éventuellement de la turbulence induite du fait de la présence de bâtiments.

6. Description des sorties

Les champs de vent 3D et de turbulence obtenus à l'issue de l'étape de turbulence :

Respectent les valeurs fournies en entrée au voisinage des points de données.

Satisfont l'équation de continuité sous sa forme incompressible (divergence nulle)

Restituent l'influence de la stabilité atmosphérique sur les déviations du vent.

Comportent un champ de vitesse verticale cohérent avec la topographie et les obstacles.

Fournissent une turbulence tridimensionnelle représentative du site étudié.

7. Références

Micro SWIFT appartient à la famille des modèles d'analyse objective à divergence nulle. Il est dérivé du modèle MINERVE, développé à partir de 1980 initialement par Electricité de France (EDF), qui a été appliqué à l'étude des sites nucléaires français, et validé notamment par EDF à l'occasion de campagnes météorologiques intensives, comportant une couverture météorologique à petite échelle rarement atteinte: jusqu'à 15 stations sol et 3 radars acoustiques vent (SODARS). On peut citer entre autres les expériences EDF de CREYS-MALVILLE 1983, CHOOZ 1986, VALLEE DU RHONE 1989 et la Campagne Européenne FOS 1983.

Les principales références applicatives commerciales du modèle MINERVE (études ou systèmes) sont les suivantes :

SNCF (2000)

CERTU, DDE 42, ADEME (1999)

DRIRE Haut.10-Normandie (1998)

BORDEAUX - Etude pour le compte de l'ADEME et EDF (1996-1997)

ROUEN-LE HAVRE Réseau AIR NORMAND (1997)

Regione Campania (NAPLES-ITALIE) Réseau de surveillance de la qualité de l'air.

Regione ABBRUZZO (ATRI-ITALIE) Réseau de surveillance de la qualité de l'air.

ENEL Centre de Recherches (MILAN-ITALIE)

CISE Centre d'études (SEGRAT.10-ITALIE)

RHONE-POULENC SA (LYON-FRANCE)

Institut Paul SCHERRER (VILLIGEN-CH)

Institut Josef STEFAN (Slovénie)

IBERDROLA SA (Madrid- Espagne)

Defence Nuclear Agency (Washington - USA)

HANFORD Nuclear Center (Seattle - USA)

CNRS Service d'aéronomie et LMD (Paris - France)

FOS-BERRE 1995 - Etude pour le compte de DRIR.10-PACA (Marseille - France)

Les principales références applicatives commerciales du modèle Micro SWIFT (études ou systèmes) sont les suivantes:

United States Department of Defence (US-DOD) (2002-2005)

CEA-DAM (2005)

Città di BOLOGNA (2003)

Description du modèle Micro SPRAY

INFORMATIONS DE BASE

Version :

Version 5.0

Champs d'application :

Modèle de dispersion lagrangien à particules. Il simule la dispersion des émissions atmosphériques par le mouvement stochastique de pseudo-particules dans le flux turbulent atmosphérique sur terrain complexe. Il peut effectuer des simulations de l'échelle locale (500 m-5 km) à la méso-échelle (100 km).

INFORMATIONS DETAILLEES

Description :

Micro SPRAY est un modèle tridimensionnel pour la simulation de la dispersion des polluants dans l'atmosphère et peut tenir compte des variations du flux et de la turbulence atmosphérique aussi bien dans l'espace (conditions hétérogènes) que dans le temps (conditions non stationnaires). Il est en mesure de reconstruire des champs de concentration à partir de sources ponctuelles, linéaires, surfaciques ou volumiques.

Le polluant est simulé par des "particules virtuelles" dont le mouvement dans un domaine tridimensionnel est défini par le vent local et dont la dispersion est obtenue par le truchement de fluctuations de vitesse aléatoires solution des équations différentielles stochastiques, qui reproduisent les caractéristiques de la turbulence atmosphérique locale. De cette façon, différentes parties du panache émis peuvent "voir" différentes conditions atmosphériques, permettant des simulations plus réalistes en conditions difficiles que des modèles traditionnels (vent calme, inversion de température avec l'altitude, impact avec une topographie complexe, dispersion sur des sites avec de fortes discontinuités spatiales de type "terre - mer" ou "ville - campagne").

Le modèle simule la dispersion des polluants à l'intérieur d'un domaine de calcul de forme parallélépipédique dont la limite inférieure est représentée par une fonction $Z_g(x,y)$ obtenue en interpolant avec une bilinéaire les niveaux du terrain dans chaque cellule d'un maillage tridimensionnel défini par l'utilisateur. Le mouvement moyen des particules est décrit par des matrices tridimensionnelles de module de vent dans le système de référence "terrain-following" x, y, s dont la coordonnée verticale s est définie comme:

$$s = \frac{Z - Z_g}{Z_{top} - Z_g}$$

où:

Z est la coordonnée géométrique verticale

Z_{top} est l'altitude du sommet du domaine fluide étudié (en m)

$Z_g = Z_g(x,y)$ est l'altitude du relief (en m) au point de coordonnées (x,y) du maillage horizontal considéré.

Les particules interpolent linéairement la valeur du vent au point x, y, z où elles se trouvent en utilisant les valeurs de ces matrices. Il est possible de simuler des conditions non stationnaires en interpolant linéairement dans le temps la valeur entre deux matrices successives.

Le mouvement turbulent des particules est décrit à l'aide de l'intégration le long des axes cartésiens x, y, z , de 3 équations de Langevin pour les composantes des vitesses selon les schémas optionnels suivants :

Equations linéaires couplées avec une fonction de forçage aléatoire correspondant à une distribution de probabilité tridimensionnelle non gaussienne selon une réalisation du schéma de Thomson (1984). Des schémas de travail plus simples sont en outre pris en compte (équations découplées) pour traiter des problèmes à plus grande échelle.

Equations non linéaires avec forçage gaussien selon le schéma de Thomson (1987). Des schémas de description non gaussienne de la turbulence verticale sont également pris en compte selon la distribution bi-gaussienne Gram-Charlier du 3^{ème} ordre ou du 4^{ème} ordre. Sur le niveau de la couche limite, la part turbulente du mouvement des particules peut être optionnellement obtenue par l'intégration des équations stochastiques sur les déplacements.

La turbulence est décrite par des matrices tridimensionnelles dans le système x, y, z de :

$$\sigma_{u'_x}, \sigma_{u'_y}, \sigma_{u'_z}, \overline{u'^3_z}$$

$$\overline{u'_x u'_y}, \overline{u'_x u'_z}, \overline{u'_y u'_z}$$

$$\mathbf{T}_{L_{u'_x}}, \mathbf{T}_{L_{u'_y}}, \mathbf{T}_{L_{u'_z}}$$

dans le cas des schémas de Thomson 1984 ou bien :

$$\sigma_{u'_x}, \sigma_{u'_y}, \sigma_{u'_z}, \overline{u'^3_z}$$

$$\mathbf{T}_{L_{u'_x}}, \mathbf{T}_{L_{u'_y}}, \mathbf{T}_{L_{u'_z}}$$

K_x, K_y, K_z (options sur la couche limite)

dans le cas des schémas de Thomson 1987.

Schéma de génération interne des champs de turbulence, construits à travers les profils verticaux de similarité obtenus en considérant les caractéristiques du terrain.

Les variables d'échelle de la couche de surface (hauteur de la couche limite h_{mix} , vitesse de frottement u_* , longueur de Monin-Obukhov L , et vitesse convective verticale d'échelle w_*) sont calculées, sur la base des données d'entrée, pour chaque point du maillage grâce à un pré-processeur météorologique (Paine, 1988). Puis, les profils verticaux des variables turbulentes nécessaires à la simulation sont générés à partir de relations dépendantes de la stabilité atmosphérique (Hanna, 1982). La surhauteur des panaches est calculée par la formule d'Anfossi (Anfossi, 1985), capable de tenir compte des variations verticales et horizontales du vent et de la stabilité atmosphérique, grâce à une matrice tridimensionnelle de température sur la même grille que les matrices météorologiques.

Limitations :

Le modèle ne contient pas de réactions chimiques entre les espèces émises, qui sont donc considérées comme inertes. La version 3.0 contient un schéma de dépôt sec et humide, et peut tenir compte de la chute gravitationnelle. La radio décroissance radioactive peut être également appliquée.

Résolution :

Résolution spatiale horizontale :

Maillage à pas fixe régulier: $\Delta x = \Delta y$

Résolution minimale conseillée: 0,1 m (en cas de prise en compte de bâtiments)

Résolution maximale conseillée: 10km

Résolution spatiale verticale :

Maillage de type "terrain - following" de coordonnées S à pas variable défini par l'utilisateur.

Résolution temporelle :

Possibilité de choisir entre des pas d'intégration Δt des équations de mouvement fixes ou variables.

Δt variables limités automatiquement par les caractéristiques du vent moyen et de la turbulence vue par la particule.

Techniques de résolution :

Différences finies pour l'évolution temporelle des particules.

Optimisation du choix des pas de temps sur des échelles de temps Lagrangien dans le cas du schéma à Δt variable.

Données d'entrées requises :

Générales :

Le positionnement, les dimensions, la structure horizontale et verticale du domaine, la topographie sont définis dans un fichier météorologique, en format binaire, contenant au minimum les champs de vent tridimensionnels. Les options du calcul (période et durée de la simulation, schémas numériques, conditions initiales et aux limites) sont contenues dans un fichier ASCII.

Météorologiques :

Micro SPRAY reçoit en entrée une série temporelle de champs tridimensionnels de vent, de température voire de turbulence sur le maillage décrit précédemment, dans un format binaire. Les champs de turbulence peuvent être générés en interne ou fournis sur le même maillage dans le même fichier que le vent, issu d'un modèle de dynamique des fluides externe. Dans le premier cas, doivent être fournies au modèle les matrices bidimensionnelles de caractérisation du sol, contenant les valeurs de: la hauteur de la rugosité Z_0 , l'albédo et le rapport de Bowen (rapport entre le flux de chaleur sensible et latente au point du maillage). Il est en outre nécessaire d'avoir une série temporelle des données météorologiques qui couvre la période complète de simulation, en particulier pour la radiation solaire, la température et le gradient thermique vertical à l'aube, utilisés dans les schémas de paramétrisation de la turbulence de la couche limite.

Emissions :

La description des émissions: des sources de typologie multiple sont prévues (ponctuelles, linéaires et surfaciques) ce qui permet donc de simuler des cheminées ou des routes. Chacune peut émettre diverses espèces non réactives. On doit définir: la position, la géométrie et le taux d'émissions de chaque source pour chaque espèce considérée, sur des intervalles de temps quelconques non réguliers. Le nombre de particules pour chaque source est sélectionné par l'utilisateur et le modèle en détermine automatiquement la masse en fonction des caractéristiques de l'émission.

Données de sorties générées :

Fichiers binaires de particules contenant la position, la masse, la source d'origine et le temps de vie de chaque particule, mémorisées à des intervalles de temps sélectionnés par l'utilisateur.

Matrices tridimensionnelles de concentrations sur un maillage "terrain-following" sélectionné par l'utilisateur, sur des temps moyennés et à des intervalles présélectionnés, avec la méthode du comptage dans chaque maille, sur un fichier binaire de structure similaire à celle du fichier de vents utilisé en entrée.

Fichiers binaires de reprise générés à des intervalles réguliers choisis par l'utilisateur et utilisés soit pour la récupération après d'éventuelles ruptures du calcul, soit pour diviser les simulations de longue durée en sections plus brèves analysées séparément.

Fichier ASCII d'informations sur le déroulement de la simulation.

Disponibilité d'interfaces :

Le modèle a une interface à fichiers et ne nécessite pas d'interfaces utilisateurs graphiques particulières. Pour effectuer une simulation, seuls sont suffisants les outils d'édition standard présents sous les divers systèmes. Cette modalité permet la portabilité du code.

Il existe des interfaces utilisateurs graphiques développées par ARIA Technologies pour définir en mode interactif le contenu informatique de tous les fichiers ASCII d'entrée.

Les sorties binaires de particules et de concentration peuvent être lues et interfacées avec le pack graphique EWB de WINDLOGICS.

Documentation :

La documentation est disponible en français, en italien et en anglais sur support papier ou sur support informatique.

Validation :

Simulations sur terrain plat :

Confrontation à des données mesurées durant une campagne dans la vallée du Rhin près de Karlsruhe (Thomas et al., 1983).

Le modèle a été modifié dans la partie relative à l'équation de mouvement vertical, de façon à tenir compte des hétérogénéités de la turbulence et a été appliqué pour la simulation des conditions neutres et convectives de l'expérience de Karlsruhe (Brusasca et al., 1989).

Simulation en conditions d'atmosphère stable et vent faible.

Il a été implémenté un algorithme ad hoc pour la simulation du vent meandering dans des conditions de vent faible et dans cette version, le modèle a été utilisé pour simuler l'expérience de traçage réalisé près du laboratoire INEL en Idaho (Sagendorf and Dickson, 1974). Les résultats ont été publiés dans deux articles (Anfossi et al., 1990; Brusasca et al., 1992).

Simulations de la surhauteur dynamique.

Il a été inséré et validé un algorithme pour le calcul de la surhauteur des fumées chaudes. Les résultats ont été confrontés avec des données de Lidar enregistrés durant la campagne internationale de Sostanj en 1991 en Slovénie (Anfossi et al., 1993).

Simulations sur terrain complexe :

Expérimentation en soufflerie EPA sur des collines bidimensionnelles.

Des confrontations avec les données obtenues dans le cadre de l'expérience EPA RUSHIL (Khurshudyan et al., 1981) de dispersion sur des collines bidimensionnelles ont été réalisées. Les résultats obtenus ont été publiés (Tinarelli et al., 1994) et présentés aux congrès internationaux de l'American Meteorological Society de Portland - 1992 (Tinarelli et al., 1992) et du CCMS NATO à Valencia - Espagne (Tinarelli et al., 1993).

Expérience Transalpine.

Des simulations ont été effectuées sur l'expérience Transalp. 1989, qui consistait au rejet d'une substance traçante à l'embouchure des vallées Levantina et Blenio dans le canton Ticino (Suisse) dans le but de vérifier les effets de la canalisation. Le jour simulé est le 19 octobre, de 11h à 17h, avec des conditions d'atmosphère instable à stable et sur une topographie extrêmement complexe. Les résultats ont été publiés dans un numéro spécial "d'Atmospheric Environment" consacré à la campagne Transalp. (Anfossi

et al., 1998). Le travail a été entre autre présenté au congrès international CCMS NATO de 1995 à Baltimore (Brusasca et al., 1995).

Campagne Sostani.

Des simulations de la période relative à la campagne de 1991 près de la centrale thermique de Sostani en Slovénie ont été réalisées conjointement par ENEL, CISE et Josef Stefan Institute de Lubiana. Le site est modérément montagneux et les situations de stabilité simulées étaient caractérisées par des conditions neutres et instables, avec quelques périodes de vent calme. Les résultats, présentés au congrès ENVIROSOFT 1994 de Barcelone (Espagne) et au workshop de Manno "Intercomparison of advanced practical short range atmospheric dispersion models" de 1993 (Tinarelli et al., 1993), ont été comparés avec ceux de modèles eulériens simples pour terrain complexe et d'un modèle lagrangien à bouffées montrant une supériorité de la part du modèle SPRAY qui se prête mieux à la simulation de situations complexes. Le travail mis en œuvre pour effectuer ces simulations avec SPRAY est décrit entre autre dans un rapport interne de l'ENEL (Tinarelli et al., 1994).

Applications :

Poste de centralisation intelligent de Fusina et Porto Marghera. Une version simplifiée du code dénommée SPRAY/S a été mis en œuvre sur le nœud automatique de relevé environnemental de la région de Fusina et port Marghera (Stefani et al. 1997) où il est en mesure de fonctionner en temps réel, alimenté par des données fournies en automatique par le système d'acquisition des données.

Système de mesure environnemental de la décharge de Barricalla (Torino). A été mis en œuvre, sur un financement européen dans le cadre du projet LIFE 1, un système de contrôle de l'impact des émissions provenant de la décharge d'ordures toxiques située près de Turin dans la commune Barricalla (Pacitti et al., 1997). Le modèle SPRAY a été inséré dans ce système sur PC (Pacitti et al., 1997), et est utilisable sur demande pour réaliser des simulations de la dispersion des substances émises par la décharge ou des émissions du trafic provenant des axes routiers environnements.

Application dans le cadre de l'étude pluridisciplinaire du dépérissement du pin forestier et des autres espèces biogéniques de la vallée d'Aoste (Manzi et al., 1998). Des simulations de la dispersion des polluants provenant des principales émissions (trafic routier, industrie et chauffage domestique) recensées dans la région ont été effectuées sur un domaine de $100 \times 80 \text{ km}^2$. Les simulations, sur une durée moyenne de 10 à 15 jours, ont permis de fournir une description climatologique du site sur un domaine extrêmement complexe, aussi bien pour des conditions estivales qu'hivernales.

Simulation des émissions provenant de la centrale thermoélectrique de Vado Ligure, pour le compte de la province de Savone. Des simulations de la dispersion des fumées émises par la centrale ont été réalisées sur une durée d'environ 10 jours sur un domaine de $20 \times 23 \text{ km}^2$. L'objectif était de contrôler l'impact de la centrale sur le territoire environnant, à forte complexité topographique, et le niveau de représentativité du réseau de mesures météorologiques ou de qualité de l'air géré par l'ENEL et la province de Savone.

Références :

- Anfossi D. (1985) Analysis of plume rise data from five TVA Steam Plants. J. Clim. appl. Met. 24, 1225-1236
- Anfossi D., Brusasca G., Tinarelli G. (1990): "Simulation of atmospheric diffusion in low windspeed meandering conditions by a Monte Carlo dispersion model". Il Nuovo Cimento C 13, N. 6, 995 - 1006.
- Anfossi D., Brusasca G., Tinarelli G. (1990): "Results from a random walk dispersion model in low windspeed stable conditions", Proc. of 9th Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Roskilde (Denmark), April 30 - May 3, 6.1, 160-163.
- Anfossi D., Ferrero E., Brusasca G., Marzorati A., Tinarelli G. (1993): "A simple way of computing buoyant plume rise in Lagrangian stochastic dispersion models", Atmospheric Environment 27A, 1443-1451.
- Anfossi D., Desiato F., Tinarelli G., Brusasca G., Ferrero E., Sacchetti D. (1998): "TRANSALP 1989 Experimental Campaign - part II: Simulation of a tracer experiment with Lagrangian particle models.", Atmospheric Environment, 32, 7, 1157-1166.
- Brusasca G., Tinarelli G., Anfossi D. (1989): "Comparison between the results of a Monte Carlo atmospheric diffusion model and tracer experiments", Atmospheric Environment 23, 1263-1280.
- Brusasca G., Tinarelli G., Anfossi D. (1992): "Particle model simulation of diffusion in low windspeed stable conditions", Atmospheric Environment 26, 707-723.
- Brusasca G., Ferrero E., Anfossi D., Desiato F., Tinarelli G., Morselli M.G., Finardi S., Sacchetti D. (1995): "Intercomparison of 3-D flow and particle models with Transalp 1989 meteorological and tracer data", Proc. of the 21st CCMS-NATO meeting, Baltimore, 6-10 November, 1995, 386-394. Air Pollution Modelling and its Application XI, Plenum Press, 559-567
- Hanna S. R. Application in air pollution modelling in "Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling". Ed. by S.T.M. Nieuwstadt and H. Van Dop, D.Reitell Pub. Comp., 1982, pp.275-310.
- Berkowicz, R., Hertel, O., Sørensen, N.N. and Michelsen, J.A., (1997), Modelling air pollution from traffic in urban areas. In Flow and Dispersion Through Groups of Obstacles, R.J.
- Perkins and S.E. Belcher (editors), Clarendon Press, Oxford, pp. 121-141.
- Hertel, O. and Berkowicz, R., (1989), Modelling pollution from traffic in a street canyon. Evaluation of data and model development, DMU Luft A-129, 77pp.
- Hertel, O and Berkowicz, R., (1989), Operational Street Pollution Model (OSPM). Evaluation of model on data from St. Olavs street in Oslo, DMU Luft A-135, 34pp. Khurshudyan L.H., W.H. Snyder, and I.Y. Nekrasov, 1981: Flow and dispersion of pollutants over two-dimensional hills. Rpt. No. EPA-600/4-81-067, Envir. Prot. Agcy., Res. Tri. Pk., N.C., USA
- Manzi G., Brusasca G., Morselli M.G., Tinarelli G. (1998): "Indagine generale per lo studio pluridisciplinare del deperimento del pino silvestre ed altre specie botaniche in Val D'Aosta, simulazione della dispersione in atmosfera degli inquinanti emessi dal traffico veicolare e dal riscaldamento", relazione ENEL/CRAM 1998-0022
- Pacitti M., Mensio P., Brusasca G., Tinarelli G., Genon G., Marchese F., Nobile G., Malvasi G. (1997): "Global evaluation of the activity of toxic and hazardous waste landfills using monitoring and modeling integrated system". Proc. of 5th International Conference "Air Pollution 1997", 16-18 September, Bologna, Italy. Air Pollution V, modelling, monitoring and management, 517-526, Computational Mechanics Publications.
- Paine, R.J. User's guide to the CTDM meteorological preprocessor (METPRO) program. US-EPA report EPA/600/8-88/004, 1988.
- Sagendorf J.D. and Dickson C.R. (1974): Diffusion under low windspeed, inversion conditions. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-52

- Stefani A., Brusasca G., Grigolon E., Martinelli U., Marzorati A. (1997) "Integrazione di un sistema di supervisione ambientale nel sistema informativo della Centrale Termoelettrica di Fusina", Atti del 97° convegno AEI - Baveno (VB) 7-9 Maggio 1997.
- Tinarelli G., Giostra U., Ferrero E., Tampieri F., Anfossi D., Brusasca G., Trombetti F., (1992): "SPRAY, a 3-D particle model for complex terrain dispersion", Proc. of 10th Symposium on Turbulence and Diffusion, American Meteorological Society, Portland, Oregon (USA), 29-Sept. - 2 Oct, P2.9, 147-150.
- Tinarelli G., D. Anfossi, G. Brusasca, E. Ferrero, J. Moussafir (1993) "A complete 3-D Lagrangian particle model to simulate the dispersion of non-reacting airborne pollutants over complex terrain". Workshop on: Intercomparison of Advanced Practical Short-Range Atmospheric Dispersion Models. Manno (Svizzera), August 29 - September 3, 1993
- Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Tampieri F., Trombetti F. (1993): "Lagrangian model simulation of 3-d concentration distribution over complex terrain", Proc. of the 20th CCMS-NATO meeting, Valencia, 29 November-3 December 1993; Air Pollution Modelling and its Application X, Plenum Press, 621-622.
- Tinarelli G., Anfossi D., Brusasca G., Ferrero E., Giostra U., Morselli M.G., Moussafir J., Tampieri F., Trombetti F. (1994): "Lagrangian particle simulation of tracer dispersion in the lee of a schematic two-dimensional hill", Journal of Applied Meteorology, Vol. 33, N. 6, 744-756.
- Tinarelli G., Brusasca G., Morselli M.G. (1994): "Il modello Lagrangiano a particelle SPRAY - Descrizione generale e validazioni", relazione ENEL/CRAM N. E1/94/10.
- Thomas P., Hubschmann W., Schuttelkops H., Vogt S., (1983): "Experimental determination of the atmospheric dispersion parameters at the Karlsruhe Nuclear Research Center for 160 m and 195 m emission heights. Part I: measured data. KfK Report 3456.
- Thomson D.J., (1984), Random walk modelling of diffusion in inhomogeneous turbulence, Q.J.R.Met.Soc. 110, 1107-1120.
- Thomson D.J. (1987), Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. J. Fluid Mech., 1987, 180, 529-556.