

NUMTECH

CERMEP

**Centre d'Exploration et de Recherche
Médicale par Emission de Positons
de Bron (69)**

Modélisation de la dispersion atmosphérique des
rejets radioactifs du site et étude d'impact en
situation normale sur les populations et
l'environnement

RAPPORT D'ÉTUDE

Réf.:283.1216/QA V3.0 – Mai 2017

INTERVENANTS

CERMEP (CLIENT)

Adresse : CERMEP - Imagerie du Vivant - 59 Bd Pinel 69677 Bron France

Tél. : (33) 4 72 68 86 03

Fax : (33) 4 72 68 86 10

Contact :

E-mail : lebars@cermep.fr

Didier LE BARS, Responsable Radio-pharmacie

NUMTECH (PRESTATAIRE)

Adresse : 6 Allée Alan Turing - CS 60242
Parc Technologique de La Pardieu
63178 AUBIERE CEDEX

Tél. : 04 73 28 75 95

Fax : 04 73 28 75 99

Contacts :

Jamal YAHIA, Responsable Développement
Maghreb

E-mail : yahia@numtech.fr

Julien GALINEAU, Chef de projet

E-mail : cohn@numtech.fr

Florian COHN, Chef de projet

E-mail : galineau@numtech.fr

VERSION	DATE	DESCRIPTION DES MODIFICATIONS
1.0	24/03/2017	Version provisoire
2.0	28/03/2017	Version finale
3.0	30/05/2017	Ajout des références sur les débits respiratoires utilisés

REDACTION	CONTROLE QUALITE
Florian COHN, Chef de projet / Pôle Qualité de l'Air	Julien GALINEAU Chef de projet / Pôle Qualité de l'Air

TABLE DES MATIERES

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	6
2. MODELISATION DU SITE ET DE SON ENVIRONNEMENT	7
2.1 Description du modèle.....	7
2.2 Phénomènes pris en compte par le modèle.....	7
2.3 Domaine d'étude et sites spécifiques.....	9
2.4 Topographie et nature des sols.....	10
2.5 Météorologie.....	11
2.6 Construction de la maquette numérique 3D.....	12
2.7 Paramétrisation de l'outil CFD.....	14
2.8 Post-traitement des activités.....	16
2.9 Post-traitement des doses réglementaires.....	17
3. SIMULATION DE LA DISPERSION DES REJETS ATMOSPHERIQUES	19
3.1 Carte des doses moyennes annelles.....	19
3.2 Valeurs calculées aux sites spécifiques.....	20
3.3 Commentaires sur les incertitudes.....	21
3.3.1 Incertitudes intrinsèques à Code_Saturne et aux modèles CFD.....	21
3.3.2 Incertitudes relatives aux données d'entrée.....	22
4. PRINCIPALES CONCLUSIONS	24
ANNEXE A CARACTERISTIQUES DU MODELE CODE_SATURNE	26
ANNEXE B PLAN DU SITE	28

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 – LOCALISATION DU SITE OBJET DE L'ETUDE (ORTHOPHOTOGRAPHIE).....	6
FIGURE 2 – ETENDUE DE LA MAQUETTE CFD	9
FIGURE 3 – SITES SPECIFIQUES	10
FIGURE 4 – CARTE D'OCCUPATION DES SOLS URBAN ATLAS 2012	11
FIGURE 5 – ROSE DES VENTS MODELISES (STATION DE L'AEROPORT LYON BRON POUR L'ANNEE 2016)	12
FIGURE 6 – MAQUETTE 3D SIMPLIFIEE.....	13
FIGURE 7 – MAILLAGE SURFACIQUE	13
FIGURE 8 – VUE EN COUPE DU MAILLAGE VOLUMIQUE.....	14
FIGURE 9 – NUAGE DE PARTICULES RESULTAT D'UNE DISPERSION AVEC UN MODELE LAGRANGIEN.....	16
FIGURE 10 – CARTOGRAPHIE DE LA CONTRIBUTION DU CERMEP A LA DOSE MOYENNE ANNUELLE EN UTILISANT LES COEFFICIENTS PUBLICS ADULTES.....	19
FIGURE 11 – CARTOGRAPHIE DE LA CONTRIBUTION DU CERMEP A LA DOSE MOYENNE ANNUELLE EN UTILISANT LES COEFFICIENTS PUBLICS ADULTES (ZOOMEE SUR LE GROUPEMENT HOSPITALIER)	20

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 – PHENOMENES PRIS EN COMPTE DANS LA MODELISATION.....	8
TABLEAU 2 – COEFFICIENTS DE DOSE INTERNE UTILISE	17
TABLEAU 3 – DEBIT RESPIRATOIRE.....	17
TABLEAU 4 – COEFFICIENTS DE DOSE INTERNE UTILISE	17
TABLEAU 5 – DOSE AUX SITES SPECIFIQUES.....	21
TABLEAU 6 – QUALITE DES DONNEES D'ENTREE DU MODELE.	22

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le **Centre d'Exploration et de Recherche Médicale par Emission de Positons (CERMEP)**, centre de recherche en médecine nucléaire, se trouve dans l'enceinte du Groupement Hospitalier Lyon Est à Bron (cf. Figure 1).



Figure 1 – Localisation du site objet de l'étude (orthophotographie)

Dans le cadre d'une demande d'augmentation de ses rejets en carbone 11 et fluor 18, tous deux radioactifs, le CERMEP est soumis par l'**Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)** à une étude d'impact de ces rejets sur l'environnement et le public.

Dans le contexte précité, le CERMEP a consulté la société **NUMTECH** pour la réalisation d'une étude de dispersion atmosphérique des rejets gazeux de carbone 11 et de fluor 18 ainsi qu'une évaluation des risques sanitaire inhérents.

Cette étude de dispersion porte sur un seul scénario correspondant au fonctionnement normal du site.

L'objectif de la présente étude est de déterminer si le site dans son fonctionnement normal après augmentation des rejets gazeux de carbone 11 et de fluor 18, engendre des dépassements de la valeur réglementaire française de 1 mSv/an d'exposition et si elle présente des risques sanitaires pour le public reçu au centre hospitalier et pour les riverains.

Ce rapport présente la méthodologie suivie pour mener à bien la prestation. Les résultats des simulations sont ensuite présentés.

2. MODELISATION DU SITE ET DE SON ENVIRONNEMENT

2.1 Description du modèle

Le CERMEP est localisé dans l'enceinte du Groupement Hospitalier Est de Lyon, la source d'émission radioactive est étroitement entourée de bâtiments de grandes dimensions accueillant un public potentiellement sensible. Nous citerons principalement l'hôpital Femme-Mère-Enfant situé à moins de 100m au sud du site.

Du fait de la complexité topographique du domaine d'étude et de la proximité des cibles, la problématique traitée dans cette étude porte sur l'étude de l'écoulement 3D en champ proche. Elle nécessite donc un outil permettant de prendre en compte finement les obstacles présents dans la zone d'étude (bâtiments) et réalisant une modélisation détaillée des phénomènes physiques mis en jeu (couche limite atmosphérique, turbulence).

Pour cela un outil de type **CFD¹ 3D** a été mis en œuvre : le logiciel **Code_Saturne**. Il s'agit d'un logiciel généraliste de mécanique des fluides numérique développé et distribué par EDF sous licence Open Source. Il est aussi bien utilisé en recherche dans le milieu universitaire, que dans le secteur industriel.

Ce type d'outil effectue une modélisation des écoulements dans tout le domaine d'étude qui est basée sur une résolution approchée des équations de Navier Stokes par un modèle RANS². En outre la dispersion est modélisée par un module lagrangien stochastique.

Cette solution est particulièrement adaptée à la modélisation en champ proche, elle permet une prise en compte fine des obstacles présents dans la zone d'étude (bâtiments, cheminées) et est capable de réaliser une modélisation détaillée des phénomènes physiques mis en jeu.

2.2 Phénomènes pris en compte par le modèle

Pour cette étude, les principaux phénomènes physiques pris en compte par le modèle sont listés ci-dessous :

Phénomènes pris en compte	Commentaires
<input checked="" type="checkbox"/> Météorologie	Météorologique tri-horaire sur l'année 2016. Les conditions météorologiques sont issues de la station météorologique de l'aéroport de Bron à 3 Km du site étudié. Chacune des conditions météorologiques a été modélisée sur la zone d'étude par un calcul CFD.

¹ Computational Fluid Dynamics

² Reynolds Averaged Navier-Stokes

<input checked="" type="checkbox"/> Description verticale des vitesses, température et turbulence atmosphérique	Un forçage météorologique est imposé en entrée de domaine, au moyen de profils verticaux obtenus par la théorie de similitude de Monin-Obukhov.
<input checked="" type="checkbox"/> Source d'émission du polluant	La morphologie 3D de la cheminée a été représentée par un cylindre caractérisé par sa hauteur et son diamètre. La surface en son sommet a été affectée d'une condition limite de type « Velocity Inlet » sur laquelle a été imposée une vitesse d'éjection, une température d'émission et un débit en polluant.
<input checked="" type="checkbox"/> Cycle diurne du développement de la couche de mélange atmosphérique	Les données météorologiques ne sont pas traitées de façon indépendante. L'évolution de la hauteur de couche limite au cours de la journée a été prise en considération.
<input checked="" type="checkbox"/> Variabilité temporelle des émissions	Rejet uniquement les jours de semaine (du lundi au vendredi) de 9h à 18h. Une fermeture les 3 premières semaines d'août et les 2 dernières semaines de décembre a également été considérée.
<input checked="" type="checkbox"/> Nature des sols rencontrés	Une hauteur de rugosité variable a été appliquée sur le domaine afin de prendre en compte les éléments dont la morphologie 3D n'était pas représentée.
<input type="checkbox"/> Évolution chimique des rejets gazeux dans l'environnement	La chimie n'a pas été prise en compte.
<input checked="" type="checkbox"/> Évolution radiologique des rejets dans l'environnement	La décroissance de l'activité radiologique des radionucléides a été prise en considération. Les caractéristiques des radionucléides sont issues de la base NUCLEIDE-LARA (CEA-2008).
<input checked="" type="checkbox"/> Pris en compte du dépôt	Les espèces radiologiques ont été dispersées sous forme gazeuse. Le dépôt humide a été pris en compte. Le dépôt sec (négligeable pour les espèces gazeuses) n'a pas été considéré.
<input checked="" type="checkbox"/> Effet aérodynamique des obstacles présent sur le site	La morphologie 3D des bâtiments du site a été prise en compte.
<input type="checkbox"/> Effet du relief	Le relief a été n'a pas été pris en compte.

Tableau 1 – Phénomènes pris en compte dans la modélisation

2.3 Domaine d'étude et sites spécifiques

▼ Définition du domaine de calcul

Les calculs de champs de vent et de dispersion sont réalisés sur un domaine de 1 km de rayon et 1 km de hauteur centré sur l'installation. La dose est calculée par post-traitement à une hauteur de 1.5 m au-dessus du sol permettant ainsi de cartographier l'impact du rejet autour du site et sur l'ensemble du domaine d'étude. Le calcul de dose prend en compte la dose interne et externe calculée à partir de l'activité volumique et la dose externe dû au dépôt calculée à partir de l'activité surfacique au niveau du sol.

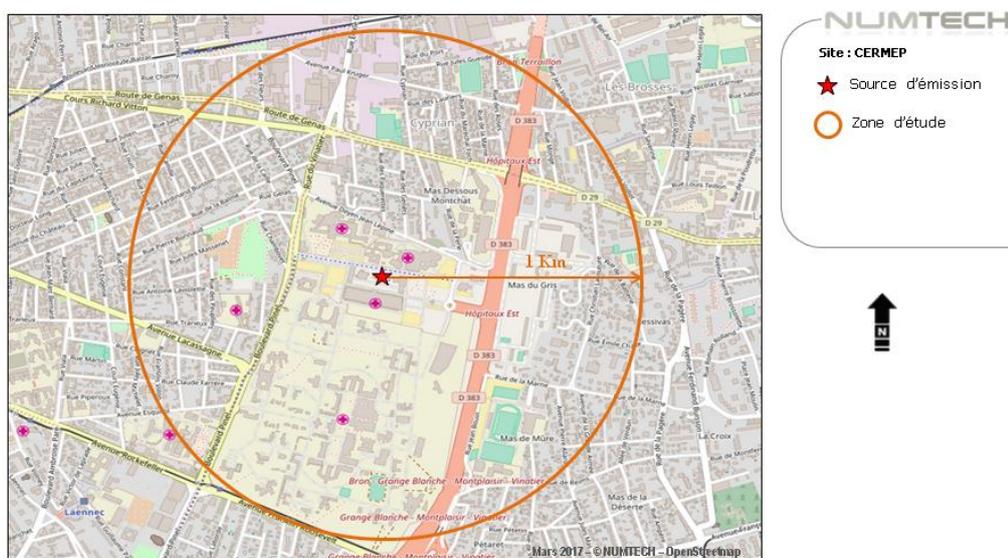


Figure 2 – Etendue de la maquette CFD

▼ Sites spécifiques

Les calculs ont été également réalisés pour un ensemble de sites spécifiques.

Pour les sites spécifiques la dose est alors calculée à une hauteur de 1.5 m sur toute la surface occupée par le site. La valeur restituée est la dose maximum calculée sur cette surface.

Voici la liste des sites spécifiques considérés et leur positionnement sur une carte (Figure 3):

- 1) Le parvis de l'hôpital Femme-mère-enfant
- 2) L'hôtel Ibis Lyon Est Bron (36 Avenue du Doyen Jean Lépine, 69500 Bron)
- 3) Une barre d'immeuble localise (rue de la Perle, Bron)
- 4) Le lycée technique automobile Béjuit (route de Genas, Bron)
- 5) L'école maternelle les Genets (8 rue Jacques Daligand, Bron)
- 6) Le bâtiment A3 : Le centre biologique et pathologique est.
- 7) Le bâtiment B15 : Le restaurant du groupement hospitalier.

- 8) Le bâtiment DSII : direction du système d'information et de l'informatique
- 9) Le bâtiment B14 : Centre de médecine nucléaire
- 10) Le bâtiment B16 : hôpital cardiologie Louis Pradel

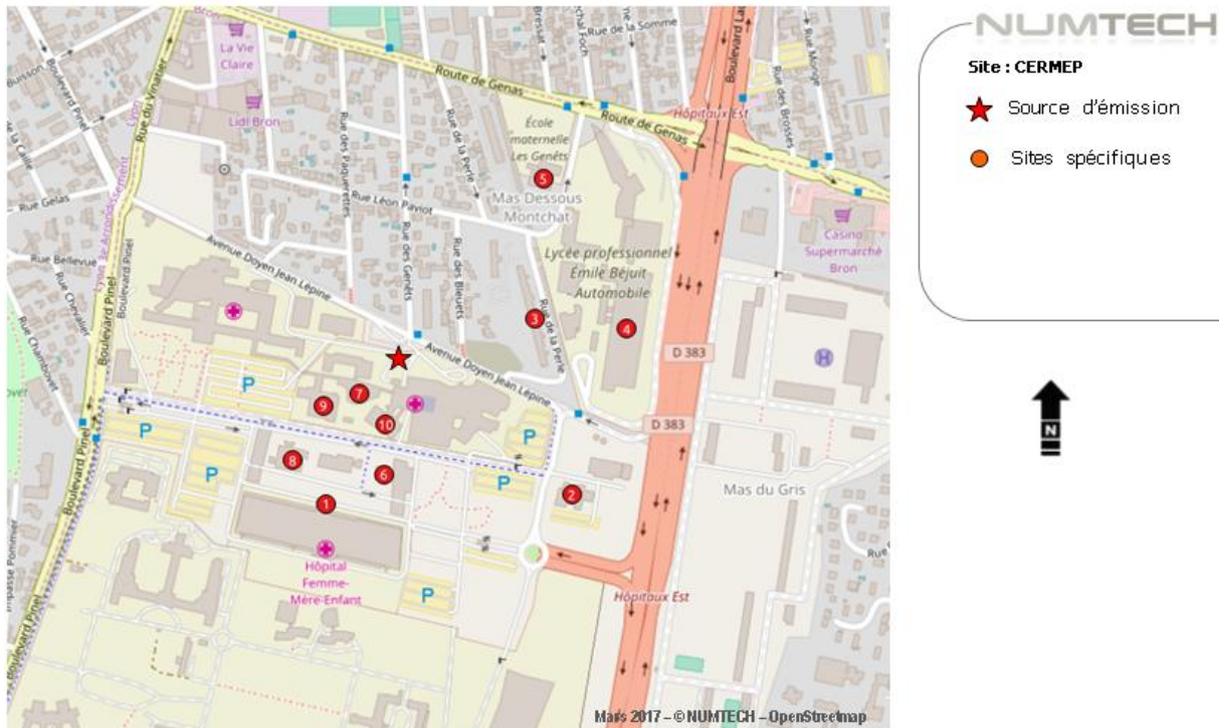


Figure 3 – Sites spécifiques

2.4 Topographie et nature des sols

▼ Topographie

Compte tenu de la topographie de l'environnement du site (très peu marquée), et des dimensions du domaine d'étude considéré, l'effet du relief n'a pas été intégré à la modélisation.

▼ Nature des sols

La nature des sols, pouvant influencer la progression des panaches, a été caractérisée grâce à un paramètre de rugosité variable. Ce paramètre, couramment utilisé dans les modèles de dispersion atmosphérique, représente la nature rugueuse des obstacles occupant le sol. Il a la dimension d'une longueur variant entre 10^{-3} mètre (surface désertique) et environ 1,5 mètre pour les sols urbains les plus denses. Pour cette étude, une hauteur de rugosité variable a été utilisée sur le domaine. Les valeurs sont issues de la base Urban Atlas 2012, disponible auprès de l'EEA (European Environment Agency).

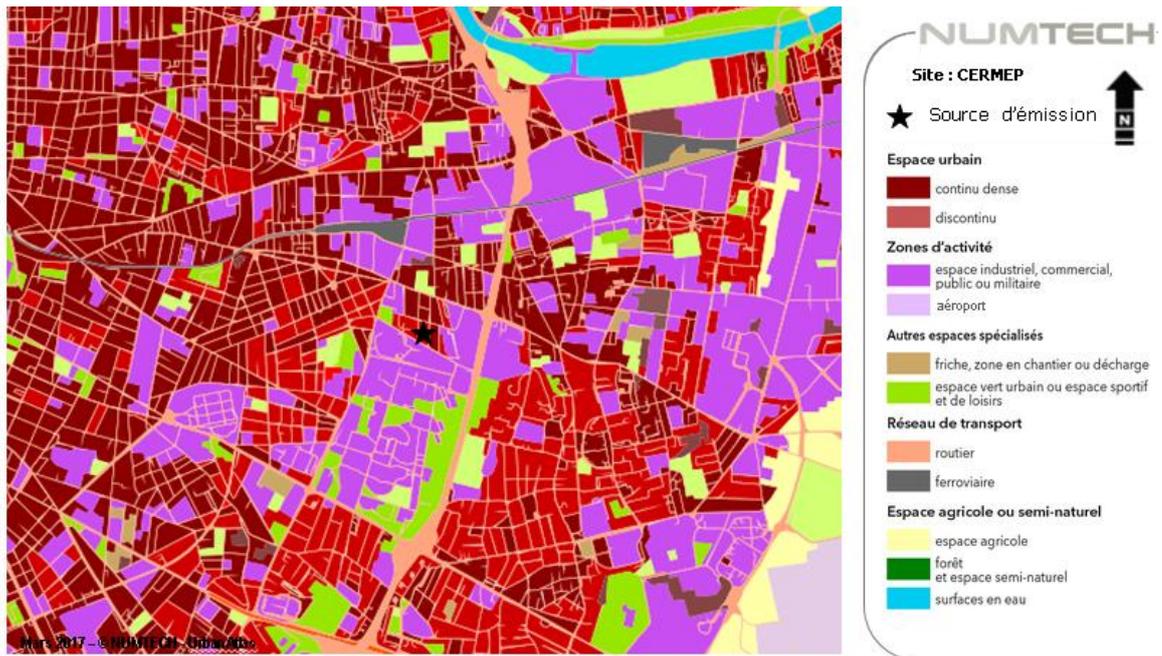


Figure 4 – Carte d'occupation des sols Urban Atlas 2012

2.5 Météorologie

La connaissance des paramètres météorologiques est primordiale pour l'étude de la dispersion des rejets dans l'atmosphère. La direction et la vitesse du vent et la stabilité atmosphérique sont des grandeurs physiques qui permettent de bien représenter la climatologie locale, en particulier les mouvements d'air dans les premières couches de l'atmosphère.

Les données de surface utilisées sont des données météorologiques mesurées à la station Météo France Lyon-Bron, située à environ 3 km à l'est de la source étudiée. Les paramètres collectés et fournis en entrée du modèle de dispersion sont la température, les vitesses, directions du vent, la nébulosité et la pluviométrie à fréquence tri-horaire.

Pour le paramètre nébulosité, les données enregistrées par la station de Lyon-Bron comportent de nombreuses valeurs manquantes. Le système d'acquisition de la station ne mesure en effet que la nébulosité pour les valeurs allant de 6 à 8 octas. Nous avons choisi de compléter les valeurs manquantes avec le paramètre mesuré par la station la plus proche se trouvant à l'aéroport Saint-Exupéry. La station Saint-Exupéry se situe également à l'est du site à une distance de 13 Km. Elle est équipée d'un système d'acquisition mesurant la nébulosité sur une plage allant de 1 à 8 octas. La démarche que nous venons de décrire se justifie car la variabilité géographique du paramètre nébulosité est beaucoup moins importante que celles des autres paramètres enregistrés par les stations.

La direction et la vitesse du vent, paramètres conditionnant la dispersion des rejets, sont représentées sur la Figure 5. Cette rose des vents a été calculée à partir des données de l'année 2016. Elle montre des vents provenant principalement du secteur nord-nord-est, puis d'un large secteur sud-ouest.

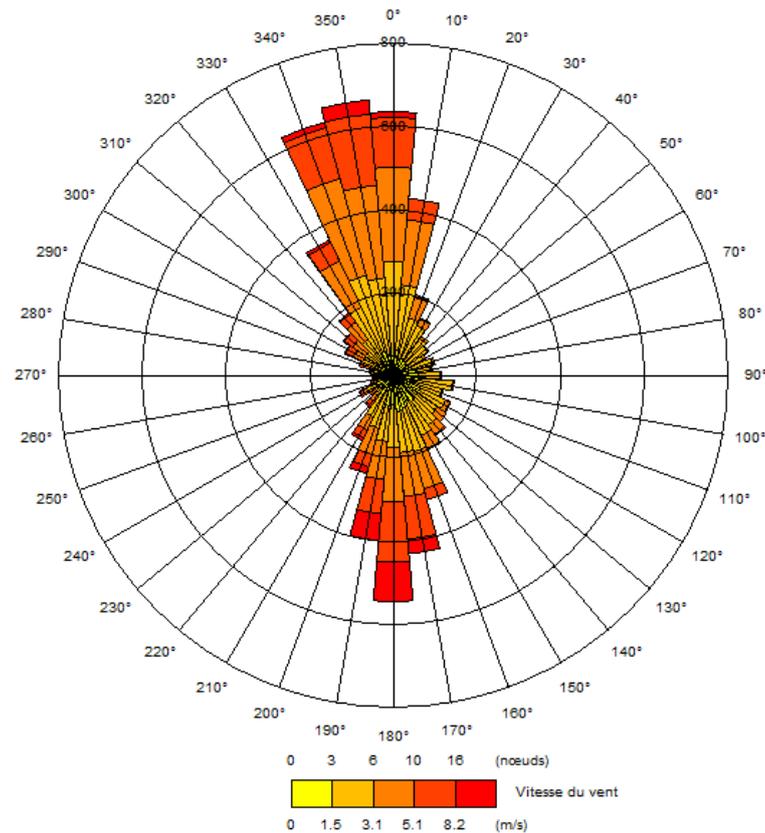


Figure 5 – Rose des vents modélisés (station de l'aéroport Lyon Bron pour l'année 2016)

2.6 Construction de la maquette numérique 3D

La morphologie 3D des bâtiments présents sur le site a été prise en compte. La géométrie de chaque bâtiment a été simplifiée de manière à ne modéliser que les éléments susceptibles d'impacter de manière significative l'écoulement.

Un modèle de parois rugueuses vient compléter la maquette 3D pour prendre en compte les détails non représentés géométriquement. Ce modèle permet principalement de représenter l'effet des quartiers résidentiels et la végétation.

▼ Modélisation 3D des obstacles présents

La modélisation en 3D du bâti du groupement hospitalier a été réalisée à partir d'un plan de masse fourni au format PDF (voir ANNEXE B). Ces données ont été enrichies et complétées à l'aide des données bâti 3D téléchargées sur l'opendata du Grand Lyon³. Certains bâtiments localisés en dehors du site ont été modélisés du fait de leur hauteur ou de leur proximité de la source ou des points récepteurs. La construction de la maquette a consisté en l'extrusion verticale de chaque esquisse par leur élévation.

³ <https://data.grandlyon.com/>



Figure 6 – Maquette 3D simplifiée

▼ Discrétisation de la maquette de calcul

La maquette numérique a ensuite été discrétisée sous forme de maillage pour répondre aux exigences du code de calcul CFD.

Cette étape s'effectue en deux étapes :

- Dans un premier temps, chaque face du domaine est maillée à l'aide d'éléments triangles et de quadrilatères (maillage surfacique).
- Puis l'intérieur du domaine est rempli de calcul de mailles tétraédriques et prismes (maillage volumique).

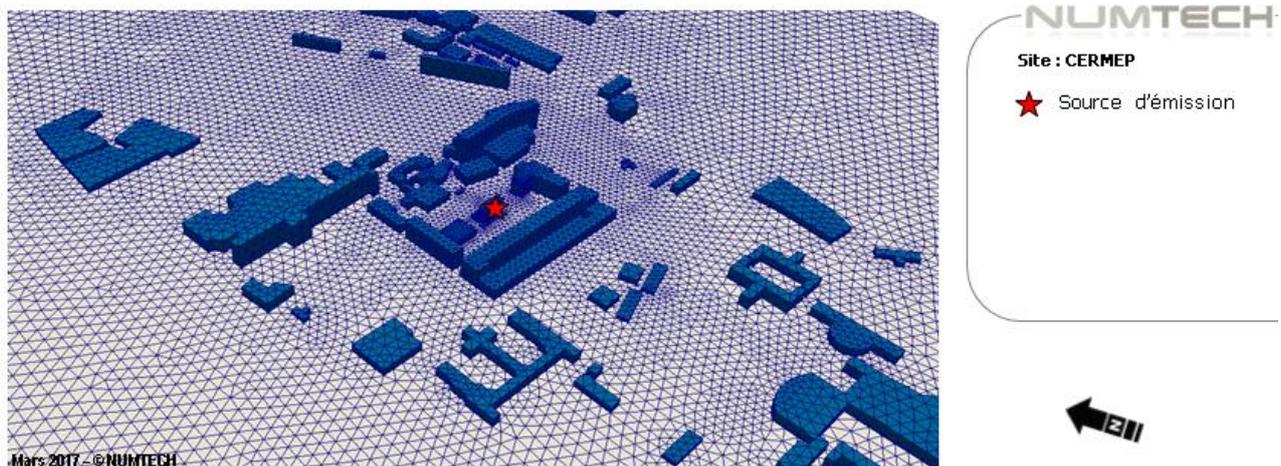


Figure 7 – Maillage surfacique

Certains détails géométriques ont fait l'objet d'un raffinement local (cas du CERMEP), une résolution fine de l'ordre de 10 cm a été atteinte.

Dans l'environnement proche du site, la taille caractéristique des éléments au niveau du sol et des bâtiments est fixée à 10 m. C'est cette taille qui définit la précision des résultats.

Au voisinage du sol, un raffinement de la taille des mailles est nécessaire pour garantir la conservation des profils imposés dans le domaine de calcul. On utilise pour cela des éléments

de type « prismes » qui permettent d'obtenir **une densité maîtrisée** d'éléments dans la direction perpendiculaire à l'écoulement.

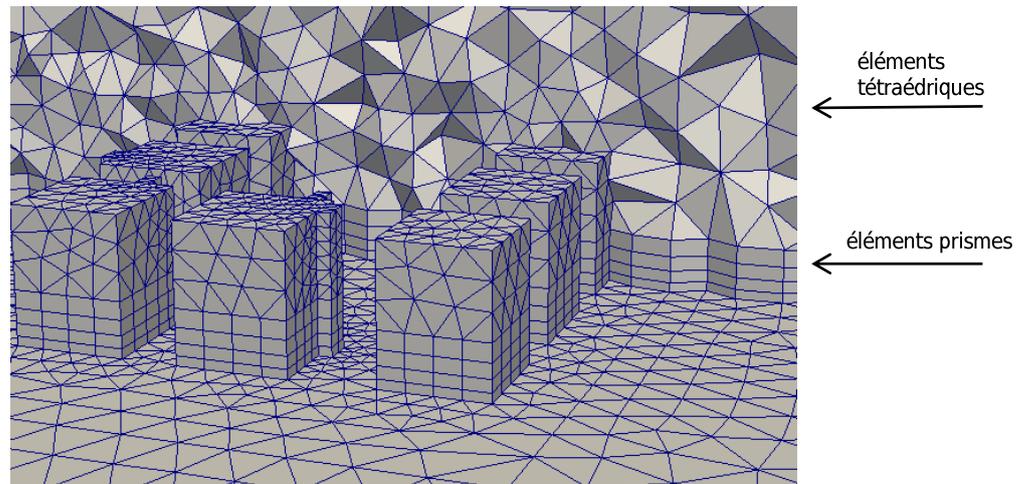


Figure 8 – Vue en coupe du maillage volumique

Un effort particulier a été apporté à la qualité de la discrétisation du maillage car c'est un élément déterminant qui conditionne la validité des résultats de simulation.

2.7 Paramétrisation de l'outil CFD

▼ Choix des équations du modèle

La résolution des équations de Navier Stokes est faite à partir d'un système d'équations basé sur une méthode RANS⁴. Elle consiste à décrire l'écoulement moyen en paramétrant les effets de la turbulence à l'aide d'un modèle de fermeture. Nous avons choisi pour cela une fermeture de type « k-ε » qui est adaptée aux calculs d'écoulements complexes et donne des résultats satisfaisants lors de la modélisation de la couche limite atmosphérique. Cette fermeture est basée sur la résolution de deux équations de transport : l'une pour l'énergie cinétique turbulente « k », l'autre pour le taux de dissipation « ε ».

Les équations de conservation résolues pour cette étude sont finalement :

- L'équation de conservation de la masse (hypothèse d'incompressibilité) ;
- Les 3 équations de quantité de mouvement (équation de la vitesse u, v et w) ;
- Les 2 équations de fermeture pour le modèle de turbulence (k et ε) ;
- L'équation de conservation de l'énergie (équation sur la température) ;

Le modèle utilisé pour réaliser la dispersion des polluants est de type lagrangien stochastique. Il s'agit du modèle Langevin généralisé développé par Miner et Peirano⁵ qui est implémenté dans Code_Saturne. Les deux radionucléides ont été dispersés sous forme

⁴ Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations

⁵ Miner JP, Chibbaro, S. The PDF approach to turbulent polydispersed two-phase flows. Physics Reports 352, 1-3 (Oct. 2001), 1-214.

gazeuse. Le dépôt sec est négligé dans cette étude. Le dépôt humide est traité par un coefficient de lessivage s'appliquant sur l'ensemble du panache.

Ce coefficient est défini par :

$$\Lambda = AI^B$$

Avec :

Λ : coefficient de lessivage (s-1)

I : intensité de précipitation (mm/h)

A = 1.10^{-4}

B = 1

▼ Conditions aux limites

- Entrée de domaine

Un forçage météorologique est imposé en entrée de domaine, au moyen de profils verticaux obtenus par la théorie de similitude de Monin-Obukhov. Ces profils caractérisent la vitesse, la température ainsi que les grandeurs turbulentes (k et ϵ).

Ces conditions correspondent aux mesures de la station météorologique Météo-France (SYNOP) située à l'aéroport de Lyon-Bron.

- Paroi supérieur du domaine :

Une condition de symétrie est appliquée à la paroi supérieure du domaine.

- Le sol et bâtiments

Une loi de paroi rugueuse est appliquée au sol. La hauteur de rugosité imposée est fonction du type d'occupation des sols (bati, eau, végétation). Pour les bâtiments dont la morphologie 3D a été représentée, une loi de paroi lisse a été utilisée.

- Source d'émission

Le sommet de la cheminée est affecté d'une condition limite de type « Velocity Inlet » sur laquelle sont imposés une vitesse d'éjection, une température d'émission et un débit en polluant.

▼ Variabilité des émissions

Nous avons considéré que le rejet avait lieu uniquement les jours de semaine (du lundi au vendredi) de 9h à 18h. Une fermeture les 3 premières semaines d'août et les 2 dernières semaines de décembre a également été considérée.

v Caractéristiques des rejets

La vitesse d'éjection en sortie de cheminée a été imposée à 5 m/s. La hauteur de cheminée est de 8.7 mètres. Le taux d'émission en carbone 11 a été fixé à 1800 GBq/an, celui du en fluor à 200 GBq/an.

2.8 Post-traitement des activités

La dispersion étant réalisée par un module de dispersion lagrangien, la sortie brute est constituée d'un nuage de points pour lesquels nous disposons des informations suivantes :

- ♣ La position dans l'espace ;
- ♣ Le temps écoulé depuis le rejet dans l'atmosphère ;
- ♣ Les radionucléides représentés ;
- ♣ L'activité initiale en sortie de cheminée.

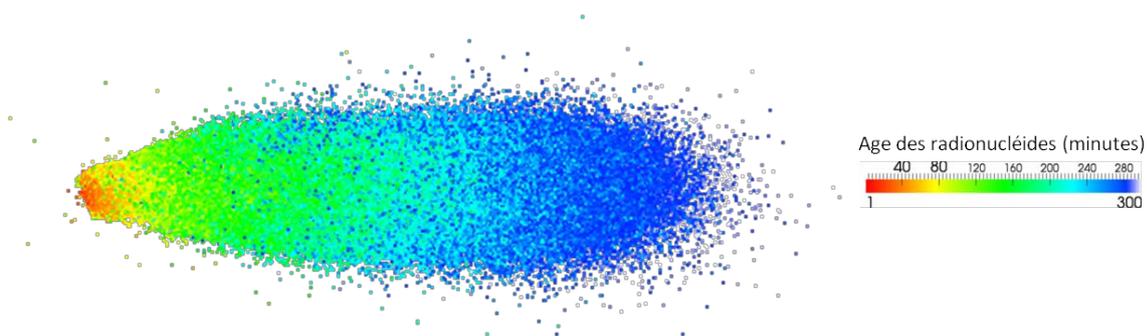
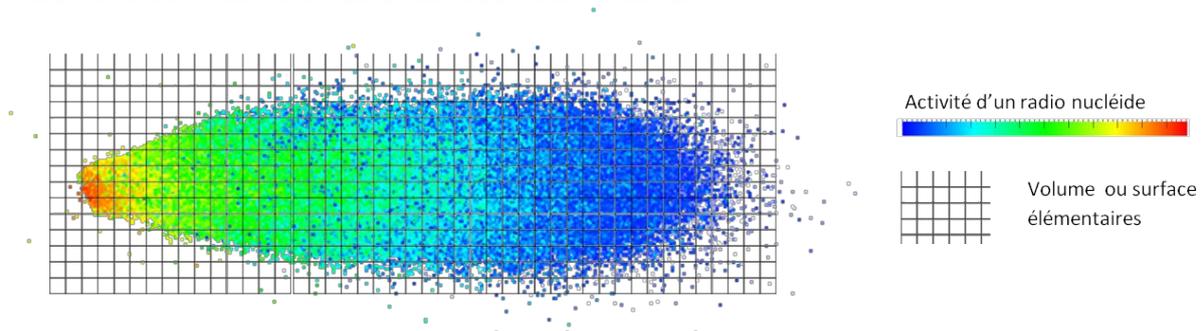


Figure 9 – Nuage de particules résultat d'une dispersion avec un modèle lagrangien

Dans un premier temps, nous évaluerons la décroissance radioactive et la filiation de chaque radioélément en fonction du temps écoulé depuis l'émission dans l'atmosphère. Nous utiliserons pour cela les caractéristiques physiques de la table NUCLEIDE-LARA (CEA- 2008).

Ensuite, la somme des activités totales de chaque radionucléide est réalisée en considérant des volumes élémentaires (grille régulière 3D) pour le panache et sur des surfaces élémentaires (grille régulière 2D) pour les espèces déposées.

Pour chaque condition météorologique, nous réaliserons le décompte des activités de chaque radioélément dans les volumes et surfaces élémentaires.



Le post-traitement des résultats obtenus pour chaque condition météorologique traitée, permet d'estimer la moyenne annuelle en chaque point de l'espace.

L'extraction de ces résultats est réalisée sur un plan à l'altitude 1,5 m et au niveau du sol pour le dépôt humide. Elle permet d'obtenir l'activité moyenne annuelle en Bq/m³ et l'activité moyenne déposée en Bq/m².

2.9 Post-traitement des doses réglementaires

Conformément à la réglementation, le calcul de dose interne annuelle est réalisé en appliquant les coefficients de conversion activité vers dose présents dans l'arrêté du 1er septembre 2003 relatif à l'exposition du public et des travailleurs aux rayonnements ionisants. Pour cette étude nous réaliserons les calculs de doses en utilisant uniquement les coefficients relatifs aux jeunes publics et aux publics adultes.

Radionucléides	Adultes > 17 ans	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
C-11	5,90E ⁻¹¹ Sv.Bq ⁻¹	1,00E ⁻¹⁰ Sv.Bq ⁻¹	3,10E ⁻¹⁰ Sv.Bq ⁻¹
F-18	3,20E ⁻¹² Sv.Bq ⁻¹	6,10E ⁻¹² Sv.Bq ⁻¹	1,80E ⁻¹¹ Sv.Bq ⁻¹

Tableau 2 – Coefficients de dose interne utilisé

Les débits respiratoires considérés sont calculés à partir des volumes d'air suivants :

Adulte > 17 ans	Enfant âgé de 10 ans	Enfant âgé de 1 à 2 ans
20 m ³ / jour	15,3 m ³ / jour	5,3 m ³ / jour

Tableau 3 – Débit respiratoire

Les débits respiratoires « adulte » et « enfant âgé de 10 ans » sont issus du rapport INVS « Variables humaines d'exposition »⁶. Le débit respiratoire « enfant âgé de 1 à 2 ans » est issu de la publication 66 de l'ICRP⁷.

Pour la dose externe liée à l'immersion dans le panache radioactif ou l'exposition à des sols irradiés nous utilisons les coefficients du Fédérale Guidance n°12.

Radionucléides	Panache	Dépôt
C-11	4,89E ⁻¹⁴ Sv/s par Bq/m ³	1,01E ⁻¹⁵ Sv/s par Bq/m ²
F-18	4,90E ⁻¹⁴ Sv/s par Bq/m ³	1,01E ⁻¹⁵ Sv/s par Bq/m ²

Tableau 4 – Coefficients de dose externe utilisé

⁶ Tardy G, Kairo C, Dereumeaux C. Variables humaines d'exposition (VHE) disponibles en France pour les évaluations quantitatives des risques sanitaires (EQRS). Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire ; 2013.

⁷ Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Ann. ICRP 24 (1-3) ; 1994



Chapitre 2, ce qu'il faut retenir :

Le modèle CFD Code_Saturne a été mis en œuvre sur la base d'une maquette 3D précise du site et de son environnement proche.

Des calculs de champs de vent et de dispersion ont été réalisés sur la base de condition tri-horaire mesurées par la station Météo-France (SYNOP) durant l'année 2016.

Les calculs de dose ont été réalisés à partir de la dose interne et externe dû au panache et de la dose externe dû au dépôt humide.

3. SIMULATION DE LA DISPERSION DES REJETS ATMOSPHERIQUES

Les calculs de dispersion ont permis d'obtenir les activités moyennes horaires à 1,5 m du sol d'une part et les flux de dépôt d'autre part. Le post-traitement de ces grandeurs permet de

Les valeurs moyennes simulées ont été comparées au seuil réglementaire de 1 mSv/an, permettant ainsi de qualifier l'impact du projet sur l'environnement et sur les populations.

3.1 Cartes des doses moyennes annuelles

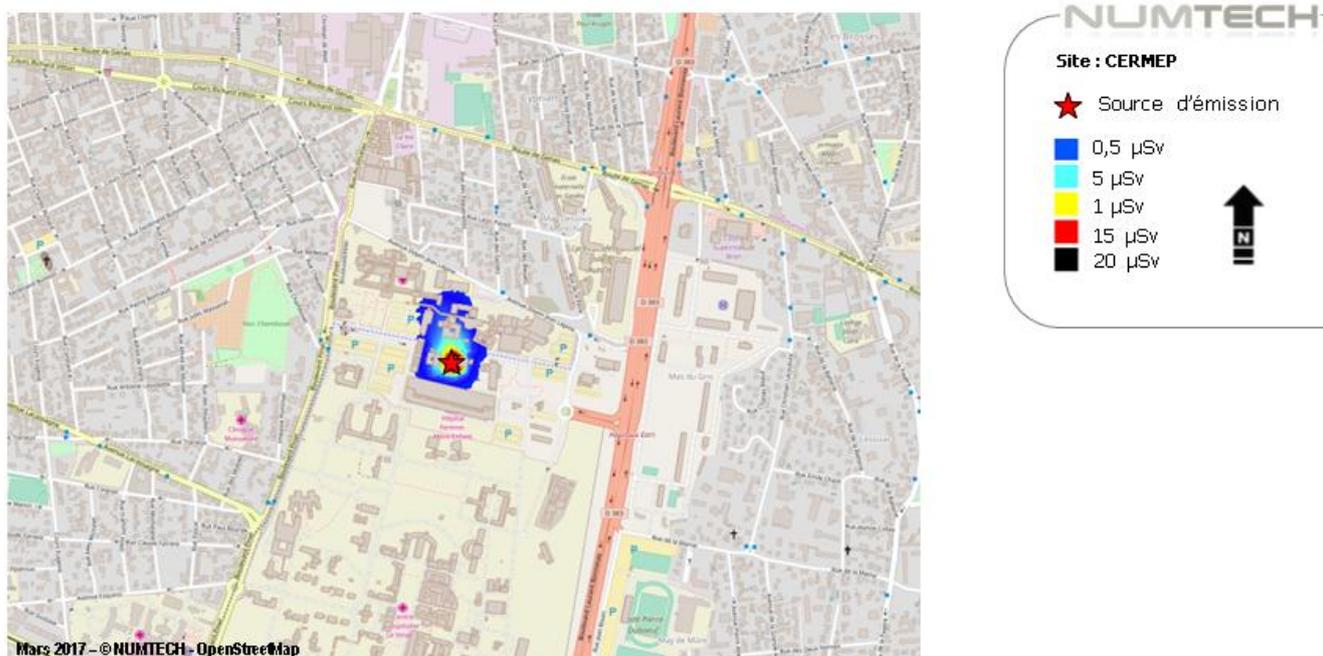


Figure 10 – Cartographie de la contribution du CERMEP à la dose moyenne annuelle en utilisant les coefficients publics adultes

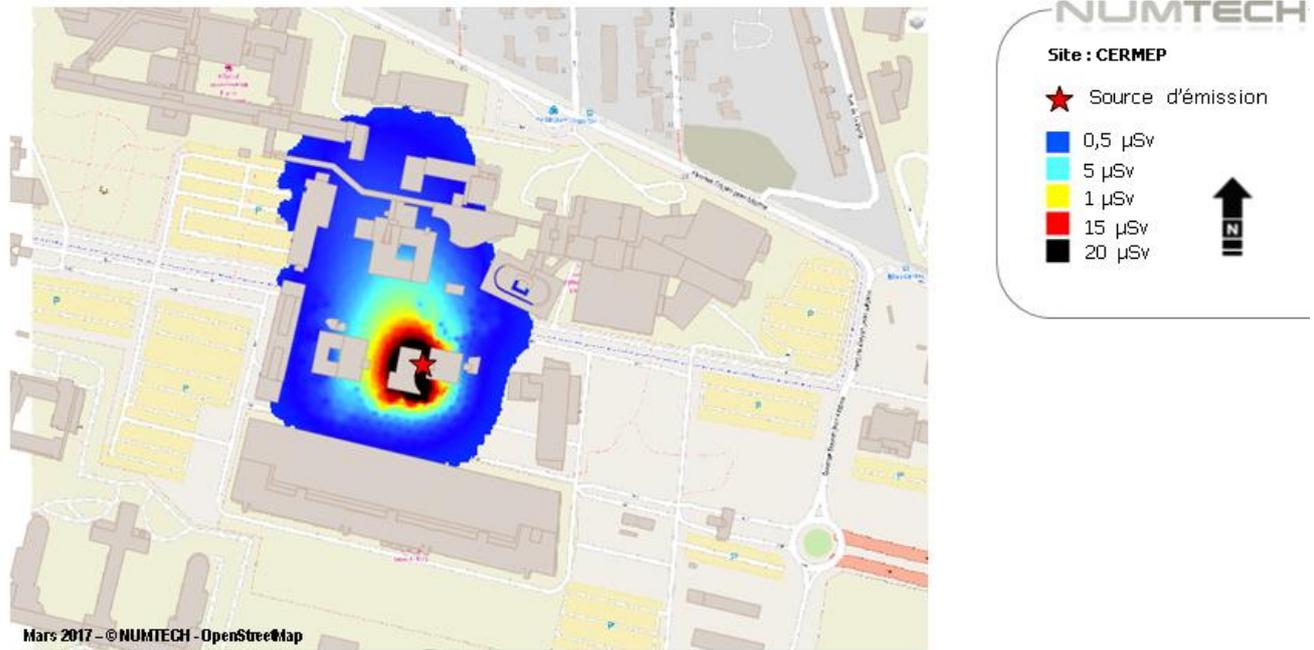


Figure 11 – Cartographie de la contribution du CERMEP à la dose moyenne annuelle en utilisant les coefficients publics adultes zoomée sur le groupement hospitalier.

Les valeurs calculées à 1.5 mètres du sol sont inférieures au seuil réglementaire de 1 mSv par an. La doses maximums relevées est de 36,5 µSv et se situe au pied du bâtiment du CERMEP.

Les bâtiments les plus impactés sont le bâtiment DSII localisé à l’ouest du CERMEP et le bâtiment B14 abritant le Centre de médecine nucléaire localisé au nord du CERMEP. Les valeurs de dose de ces deux bâtiments sont données dans le tableau Tableau 5.

3.2 Valeurs calculées aux sites spécifiques

identifiant	Nom (abrégé)	Distance (m)	Dose public adulte mSv	Dose jeune public mSv (10 ans)	Dose jeune public mSv (1-2 ans)
1	Parvis de l’hôpital Femme-mère-enfant	80	9,48E-04	9,56E-4	9,57E-4
2	L’hôtel Ibis	461	1,88E-05	1,90E-05	1,90E-05
3	Immeuble rue de la Perle	478	4.40E-05	4,44E-05	4,45E-05
4	Le lycée technique automobile Béjuit	630	4,12E-05	4,15E-05	4,16E-05
5	L’école maternelle les Genets	701	1,03E-04	1,04E-04	1,04E-04
6	Le centre biologique et pathologique est.	90	5,88E-04	5,93E-04	5,94E-04

7	Restaurant	147	2,64E-03	2,66E-03	2,67E-03
8	Bâtiment DSII	88	1,02E-02	1,03E-02	1,03E-02
9	Centre de médecine nucléaire	124	6,60E-03	6,65E-03	6,67E-03
10	hôpital cardiologie Louis Pradel	130	1,44E-03	1,45E-03	1,45E-03

Tableau 5 – Dose aux sites spécifiques

3.3 Commentaires sur les incertitudes

Les incertitudes relatives aux calculs de modélisation sont de deux types : celles intrinsèques au modèle numérique, compte tenu notamment de la complexité du site et de la problématique à modéliser, et celles relatives à la qualité des données d'entrée du modèle.

3.3.1 INCERTITUDES INTRINSEQUES A CODE_SATURNE ET AUX MODELES CFD

Code_Saturne est un logiciel développé sous assurance qualité par EDF R&D, avec une campagne de validation intensive avant la sortie de version. Le dossier de validation est composé de :

- 30 à 50 cas académiques ou industriels ;
- de 1 à 10 simulations par cas ;
- de quelques cellules jusqu'à 2 à 3 millions et plus ;
- temps CPU 0.04 secondes jusqu'à 12 jours.

Code_Saturne est utilisé régulièrement dans les **applications industrielles** d'EDF, notamment dans les applications liées à la **sûreté nucléaire**.

Le module Atmosphérique de Code_Saturne est issu d'un développement réalisé par le CEREAS nommé « Mercure_Saturne ». Ce développement a été intégré à Code_Saturne suite à une fusion des deux projets.

Les modèles CFD étant bâtis sur la résolution d'équations physiques, les incertitudes proviennent essentiellement de la qualité des données d'entrées et des hypothèses de simplification effectuées. De nombreuses publications proposent des guides de bonnes pratiques « best practices » expliquant comment paramétrer au mieux ces modèles. La configuration de la modélisation a suivi la consigne des guides de bonnes pratiques COST 732⁸.

Ces « bonnes pratiques » sont validées à l'aide de résultats expérimentaux issus de campagnes de mesures (Model Validation Kit). On s'intéresse le plus souvent à des

⁸ COST Action 732 : Best practice Guideline for the CFD simulation of flow in urban environment

expériences représentant des environnements urbains (Kit Fox, Must field experiment, EMU L-SHAPED Buildings, Flamanville, Oklahoma City).

Un autre paramètre qui rentre en jeu est le maillage. En CFD la précision de la solution est liée à la résolution du maillage. Dans notre cas, une résolution de 10 m nous assure des résultats satisfaisants.

3.3.2 INCERTITUDES RELATIVES AUX DONNEES D'ENTREE

Un bon modèle peut donner de mauvais résultats, si les données d'entrée sont de mauvaise qualité. Le tableau suivant regroupe les principaux paramètres d'entrée du modèle de dispersion ADMS, et les qualifie selon les critères suivants : mauvaise, moyenne, bonne.

Données d'entrée	Qualité	Commentaires
Occupation des sols	Bonne	Données issues de la base Urban Atlas.
Données météorologiques	Bonne	Données tri-horaires, issues de la station Lyon Bron localisée à moins de 3 km du site.
Localisation des sources	Bonne	Sources localisées précisément
Caractéristiques physiques des sources	Bonne	La modélisation du site et la description des sources proviennent de plans fournis par le CERMEP au format PDF.
Morphologies des obstacles	Bonne	Construit sur la base d'un plan de masse fourni par le CERMEP. Données complétée par des données bâti 3D téléchargées sur l'opendata du Grand Lyon.
Valeurs d'émission des sources	Bonne	Il s'agit d'une prévision de rejet annuel estimé par le CERMEP.

Tableau 6 – Qualité des données d'entrée du modèle.

Les données d'entrée du modèle sont globalement de moyenne qualité.



Chapitre 3, ce qu'il faut retenir :

Les calculs de dispersion réalisés montrent que les doses moyennes annuelles ne dépassent pas la valeur réglementaire.

4. PRINCIPALES CONCLUSIONS

L'objectif de la présente étude était de modéliser le rejet radiologique du site dans son fonctionnement normal après augmentation des rejets gazeux de carbone 11 et de fluor 18, et de regarder si ces augmentations engendraient des dépassements de la valeur réglementaire française de 1 mSv/an d'exposition.

Ces modélisations ont été réalisées par le biais d'un outil de modélisation 3D couplé à un modèle lagrangien, en prenant en compte la topographie du site, l'occupation des sols, la météorologie locale et les caractéristiques des sources d'émissions.

Les calculs de doses ont été réalisés pour un public adulte et pour un jeune public.

Les résultats obtenus en moyenne annuelle ont été comparés à valeur la réglementaire.

Les calculs réalisés montrent que les doses moyennes annuelles ne dépassent pas la valeur réglementaire.

Nous rappelons que les calculs ont été effectués à l'aide de modèles numériques, et donc qu'un certain niveau d'incertitudes est associé aux résultats présentés.

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE A	CARACTERISTIQUES DU MODELE CODE_SATURNE	26
A.1	Présentation.....	26
A.2	Caractéristiques	27
ANNEXE B	PLAN DU SITE	28

ANNEXE A Caractéristiques du modèle Code_Saturne

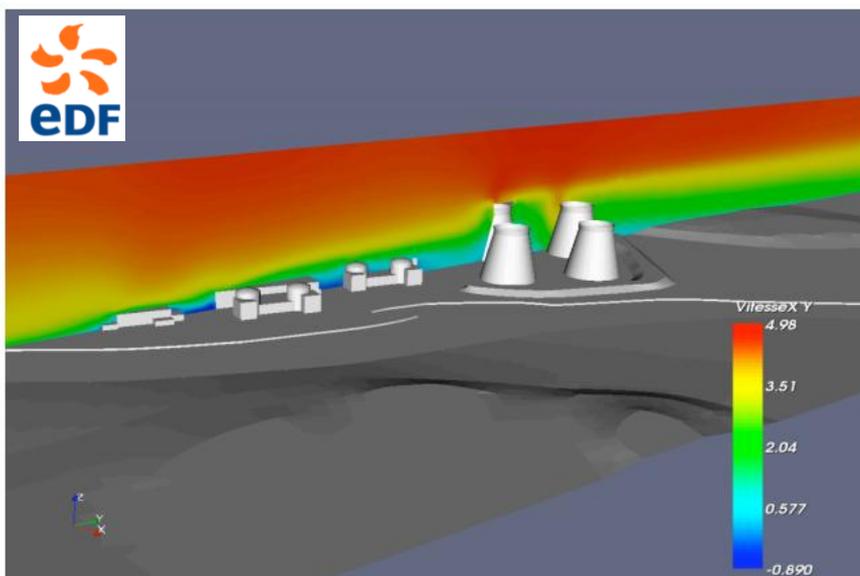
Code_Saturne est le logiciel généraliste de Mécanique des Fluides Numérique (CFD) développé par EDF.



Code_Saturne permet de modéliser les écoulements incompressibles ou dilatables, avec ou sans turbulence ou transfert de chaleur. Des modules dédiés sont disponibles pour des physiques particulières comme le transfert de chaleur par rayonnement, la combustion (gaz, charbon pulvérisé, fioul lourd, ...), la magnéto-hydrodynamique, les écoulements compressibles, les écoulements polyphasiques (approche Euler/Lagrange avec couplage inverse), ou bien des extensions à des applications spécifiques (par exemple Mercure_Saturne pour les écoulements atmosphériques).

A.1 Présentation

Code_Saturne est un code de CFD open source développé par EDF et distribué sous licence GNU GPL depuis 2007. Il est utilisé par plus de 500 ingénieurs et chercheurs partout dans le monde. Il est utilisé par EDF dans de nombreuses applications allant de la sûreté des centrales nucléaires à la recherche sur le futur mix énergétique. Il est également un logiciel de référence dans le projet Européen PRACE.



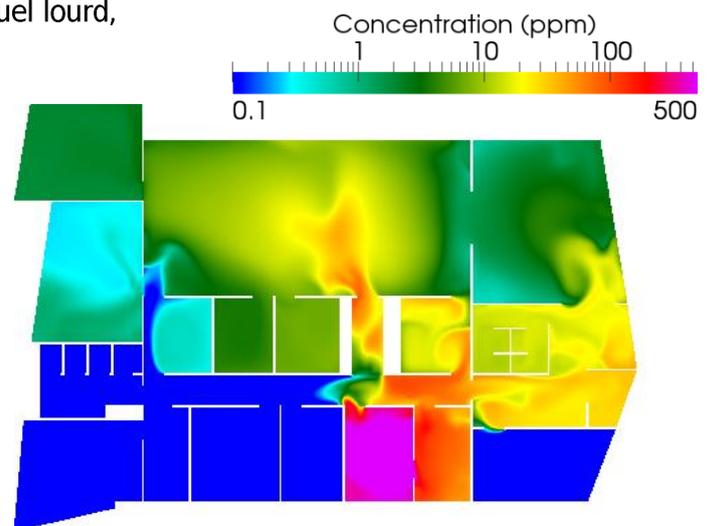
Champ de vitesse autour d'une centrale nucléaire.

A.2 Caractéristiques

Code_Saturne permet de résoudre les équations de Navier-Stokes et peut donc être utilisé dans de nombreuses applications incluant les écoulements stationnaires ou instationnaires, laminaire ou turbulent, isotherme ou non, incompressible ou faiblement dilatable en 2D, 2D axisymétrique et 3D. Il est également possible d'ajouter la résolution d'une équation de transport pour un scalaire passif.

Code_Saturne contient de nombreux modèles de turbulence, comme le Reynolds Averaged ou le Large-Eddy Simulation. Il contient également différents modules permettant de modéliser de nombreuses physiques particulières comme :

- la combustion du gaz, du charbon et du fuel lourd,
- le transfert radiatif semi-transparent,
- l'effet joule, les arcs électriques,
- les écoulements faiblement compressibles,
- les écoulements atmosphériques, les interactions
- rotor/stator.



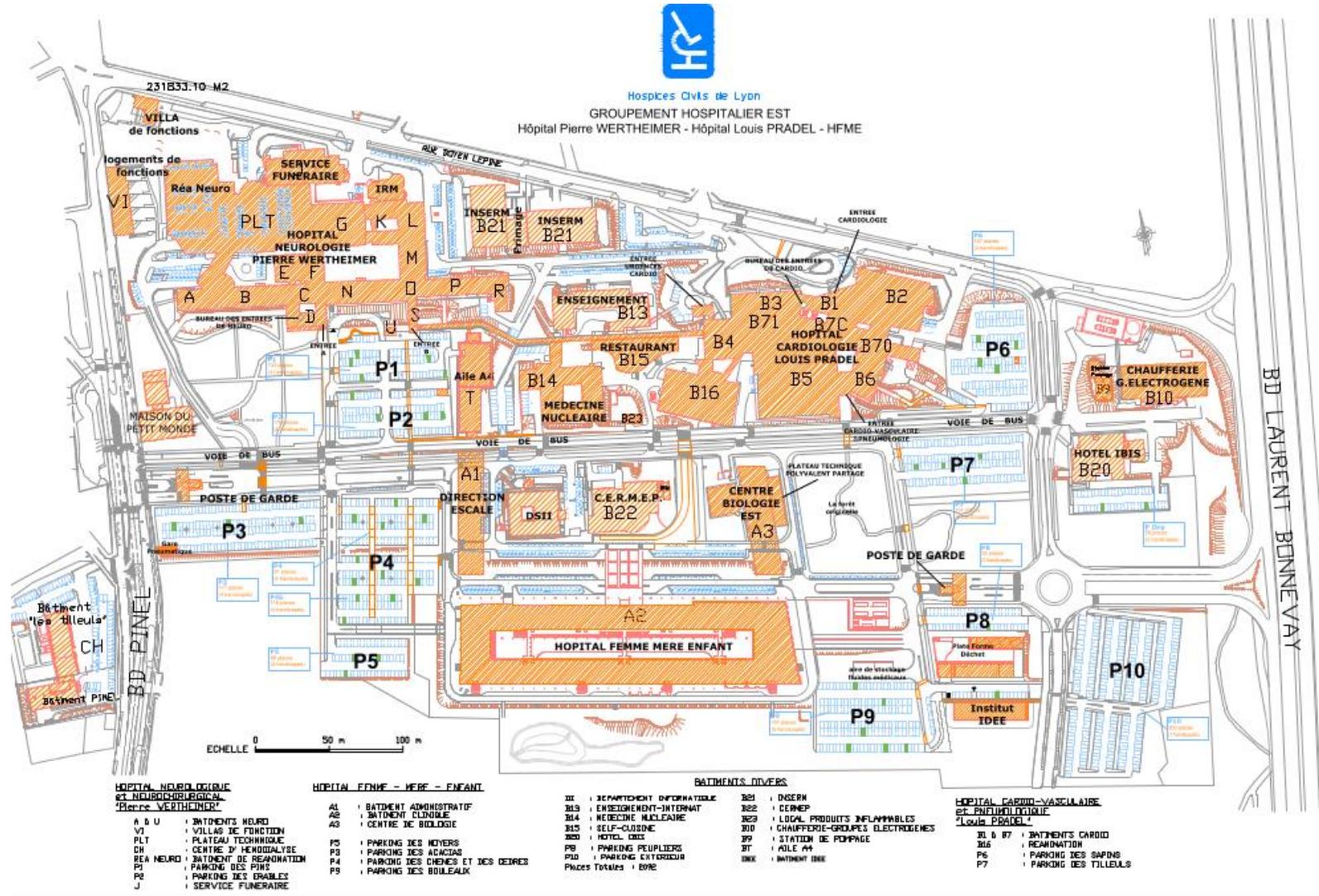
Concentration en polluant en air intérieur

Code_Saturne est basé sur une approche Volumes Finis co-localisés qui accepte des maillages de tout type (structuré, structuré par bloc, non structuré, hybride, conforme, non conforme, ...) et contenant tout type d'élément (tétraèdre, hexaèdre, pyramide, polyèdre quelconque, ...).

Code_Saturne peut être couplé avec d'autres codes mais également avec lui-même (pour les interactions Rotor/Stator, les couplages RANS/LES, ...). Par exemple, il peut être couplé avec le code de thermique SYRTHES ou le code de mécanique Code_Aster.

Code_Saturne est déjà utilisé de manière intensive sur des machines HPC (CCRT, IBM Blue Gene, HECToR (EPCC), ...). Il contient des schémas de partitionnement classiques (METIS, SCOTCH or internal Morton space-filling curve) associé avec toutes bibliothèques MPI 1.2 ou MPI 2.x compatibles.

ANNEXE B Plan du site





NUMTECH

6, Allée Alan Turing

CS 60242

Parc Technologique de La Pardieu

63178 AUBIERE CEDEX

www.numtech.fr

ANNEXE AU DOSSIER D'ANALYSE D'IMPACT :
REPONSES AUX OBSERVATIONS DE L'IRSN

➤ Prise en compte de l'azote 13 dans l'évaluation de la dose

Lors de l'irradiation de la cible, l'azote 13, qui est un radionucléide parasite, est également produit. Sa prise en compte dans les rejets de l'établissement et l'évaluation de la dose sont à préciser.

Demande 1 : Je vous demande de préciser comment l'azote 13 est intégré dans les rejets et pris en compte dans l'évaluation de dose de l'étude d'impact et, dans la négative, de compléter votre évaluation.

L'azote-13 produit lors de la préparation de carbone-11 est stocké dans un ballon de rétention des effluents, et n'entre pas en compte pour les rejets carbone-11. *A contrario*, l'azote produit lors de la préparation de fluor-18 (en quantité moindre, dépendant de l'enrichissement en oxygène-18 de l'eau H₂¹⁸O) n'est pas piégé et compte donc dans les rejets.

➤ Prise en compte des voies d'exposition externe liée aux dépôts secs et interne par ingestion

L'étude d'impact néglige l'exposition externe liée aux dépôts secs et l'exposition interne par ingestion. Ce point mérite d'être justifié.

Demande 2 : Je vous demande de justifier le caractère négligeable de l'exposition externe liée aux dépôts secs et l'exposition interne par ingestion.

Argument 1 : Les quantités déposées sont infimes

Lors de cette étude, nous avons considéré que les deux radionucléides (C-11 et F-18) étaient sous forme gazeuses en sortie de cheminée.

Le dépôt sec des composés gazeux dépend de leur solubilité et réactivité chimique ainsi que des caractéristiques des surfaces rencontrées (solide ou liquide, réactivité chimique). Les vitesses de dépôt sont généralement très faibles, les quantités déposées

sont infimes.

Argument 2 : La solution est majorante

La solution consistant à négliger le dépôt sec est majorante pour le calcul de dose. Un Bq présent dans l'atmosphère a beaucoup plus d'impact qu'un Bq déposé au sol.

L'activité présente dans l'atmosphère impacte à la fois la dose interne et externe, alors que l'activité déposée au sol n'impacte que la dose externe. A activité égale, le coefficient de dose externe par submersion dans le nuage est bien plus important que le coefficient externe d'exposition à un sol contaminé.

Argument 3 : Il n'y a pas d'accumulation de l'activité déposée

Les deux radionucléides ont une période radioactive courte (1h48 et 20 min), il n'y a pas d'accumulation des dépôts.

Les substances étant sous forme gazeuse, elles ne peuvent pas directement être ingérées. Elles doivent dans un premier temps se déposer sur le sol, puis être transférée vers des végétaux ou animaux avant d'être ingérées.

Les deux radionucléides ayant une période radioactive courte (1h48 et 20 min), les phénomènes d'accumulation dans l'environnement et de transfert dans la chaîne alimentaire ne sont pas significatifs.

La contamination par la voie digestive n'a pas été retenue.

➤ Précisions relatives au temps de présence des individus des groupes de référence et des facteurs de protection de l'habitat éventuellement retenus

Les hypothèses retenues en termes de temps de présence des personnes appartenant aux groupes de référence et des facteurs de protection liés à l'habitat ne sont pas précisées.

Demande 3 : Je vous demande de préciser vos hypothèses relatives au temps de présence des personnes appartenant aux groupes de référence et aux facteurs de protection liés à l'habitat.

Les résultats fournis en chaque point de la carte représentent des moyennes annuelles. Cela correspond au scénario d'exposition le plus majorant (cas d'un individu qui resterait toute l'année au même endroit).

Coefficient de protection lié à l'habitat :

Le calcul a été réalisé à l'extérieur des bâtiments à 1,5 m du sol, il n'y a pas de calcul dans les bâtiments. De ce fait aucun coefficient de protection pour prendre en compte

l'atténuation à l'intérieur du bâti n'a été appliqué.

➤ Estimation des marges entre les valeurs maximales de rejets sollicitées et les rejets en fonctionnement normal

Les marges entre les valeurs maximales demandées et les rejets attendus pourraient utilement être évaluées.

Demande 4 : Je vous demande d'évaluer les marges entre les valeurs maximales demandées et les rejets attendus.

Les rejets gazeux du Cermep carbone-11 et de fluor-18 sont monitorés par une balise Berthold et un système de suivi au fil de l'eau.

En moyenne, une synthèse de traceur marqué au carbone-11 entraîne un rejet de 3 à 5 GBq (soit moins de 5 % de la production initiale de carbone-11 par le cyclotron), et une synthèse fluorée 1 GBq. L'azote-13 produit par les réactions nucléaires secondaires est piégé par des ballons de rétention lors des synthèses carbonées, mais est intégré dans les calculs de rejets en fluor-18.

On retiendra la borne haute de 5 GBq par synthèse carbone-11, et 1 GBq pour les synthèses au fluor-18.

Dans l'hypothèse maximaliste de 30 synthèses de carbone-11 par mois et 10 synthèses de fluor 18, on arrive à 150 GBq par mois donc 1,8 TBq par an (sur 12 mois) et 120 GBq/an en fluor 18.

Une hypothèse réaliste sur l'activité actuelle du centre ramène ce nombre de synthèses à 25 synthèses de carbone-11 par mois et 5 synthèses de fluor-18, soit 1250 GBq par an (sur 10 mois travaillés) en carbone-11 et 50 GBq/an en fluor-18.

Notre demande de 2 TBq dont 1,8 TBq de ^{11}C est donc un peu surestimée, en cohérence avec les principes de radioprotection. Elle intègre un développement probable des synthèses dans l'avenir et est du même ordre de grandeur que les centres de recherches similaires (SHFJ Orsay).