

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 sur les populations et
l'environnement

Pour le compte de :

CERMEP



● Intervenants

CLIENT NOM DU CLIENT

Coordonnées CERMEP - Imagerie du Vivant - 59 Bd Pinel 69677 Bron France

Contacts David GONZALEZ, Conseiller en Radioprotection - david.gonzalez@cermep.fr

PRESTATAIRE NUMTECH

Coordonnées 13 rue verte, bâtiment V24, 63118 Cébazat – 06 72 11 52 38

Contacts Emmanuel DUTHIER – Cheffe de projet

VERSION DATE MODIFICATIONS

1.0	10/09/2024	Version initiale
-----	------------	------------------

REDACTION VERIFICATION

Cyril BRUNON
Ingénieur d'étude qualité de l'air – NUMTECH

Emmanuel DUTHIER
Cheffe de projet – NUMTECH



● Table des matières

1	Contexte et objectifs	5
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
2.3.1	Définition du domaine de calcul	9
2.3.2	Sites spécifiques	9
2.4	Topographie et nature des sols	11
2.4.1	Topographie	11
2.4.2	Nature des sols	11
2.5	Météorologie	11
2.6	Maquette numérique 3D	13
2.6.1	Modélisation 3D des obstacles présents	14
2.6.2	Discrétisation du domaine de calcul	14
2.7	Paramétrisation du modèle CFD	15
2.7.1	Choix des équations du modèle	15
2.7.2	Conditions aux limites	16
2.7.3	Variabilité des émissions	17
2.7.4	Caractéristiques des rejets	17
2.8	Post-traitement des activités	18
2.9	Post-traitement des doses réglementaires	19
3	Simulation de la dispersion des rejets atmosphériques	22
3.1	Cartes des doses moyennes annuelles pour le fonctionnement normal	22
3.2	Valeurs calculées aux sites spécifiques en moyenne annuelle pour le fonctionnement normal	23
3.3	Carte des doses en scénario incidentel	23
3.4	Valeurs calculées aux sites spécifiques en scénario incidentel	25
3.5	Commentaires sur les incertitudes	25
3.5.1	Incertainces intrinsèques à code_saturne et aux modèles CFD	25
3.5.2	Incertainces relatives aux données d'entrée	26
4	Principales conclusions	27



● Figures

Figure 1 - Localisation du site objet de l'étude (orthophotographie).....	5
Figure 2 - Localisation du site objet de l'étude (vue satellite).....	5
Figure 3 - Etendue du domaine CFD.....	9
Figure 4 - Pointage des sites spécifiques.....	10
Figure 5 - Rose des vents (station de l'aéroport Lyon Bron pour l'année 2023).....	12
Figure 6 : Rose des vents (station de l'aéroport Lyon Bron pour les années 2013 à 2023).....	13
Figure 7 - Maquette 3D.....	14
Figure 8 - Maillage surfacique.....	14
Figure 9 - Vue en coupe du maillage volumique.....	15
Figure 10 : Recalage des termes sources d'activité horaires pour les radio-isotopes.....	18
Figure 11 - Nuage de particules résultat d'une dispersion avec un modèle lagrangien.....	18
Figure 12 - Cartographie de la contribution du CERMEP à la dose moyenne annuelle en utilisant les coefficients publics adultes (âge > 17 ans) pour le scénario de fonctionnement annuel.....	22
Figure 13 - Cartographie de la contribution du CERMEP à la dose moyenne annuelle en utilisant les coefficients publics adultes (âge > 17 ans) pour le scénario incidentel.....	24

● Tableaux

Tableau 1 - Phénomènes pris en compte dans la modélisation.....	8
Tableau 2 : Liste des points spécifiques.....	10
Tableau 3 - Termes sources d'activité pour les radio-isotopes.....	17
Tableau 4 - Doses efficaces engagées par unité d'activité incorporée par inhalation d'aérosols en Sv.Bq-1.....	19
Tableau 5 - Débit respiratoire (m3/s) par classe d'âge. Mention « CIPR » pour « Commission Internationale de protection radiologique, publication 66, 1993 »).....	20
Tableau 6 - Coefficients de dose externe induits par l'activité volumique.....	20
Tableau 7 - Coefficients de dose externe induits par le dépôt.....	21
Tableau 8 - Dose par classe d'âge aux sites spécifiques pour le scénario de fonctionnement annuel (en µSv pour 1 an).....	23
Tableau 9 - Dose aux sites spécifiques pour le scénario accidentel (en µSv).....	25
Tableau 10 - Qualité des données d'entrée du modèle.....	26



1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

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)



Figure 2 - Localisation du site objet de l'étude (vue satellite)

En 2016, dans le cadre d'une demande d'augmentation de ses rejets en carbone 11 (11C) et fluor 18 (18F), tous deux radioactifs, le CERMEP a été soumis par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) à une étude d'impact de ces rejets sur l'environnement et le public. Le CERMEP a alors consulté la société •numtech pour la réalisation d'une étude de dispersion atmosphérique des rejets atmosphériques de 11C et de 18F ainsi qu'une évaluation des risques sanitaire inhérents. Cette étude a été réalisée en 2017 sous la référence interne 283.1216/ECI-V2.0

Aujourd'hui le CERMEP consulte à nouveau •numtech pour la réalisation d'une étude de dispersion atmosphérique des rejets atmosphériques en 11C, 18F, 89Zr, 68Ga, 64Cu, 44Sc et des principaux produits d'activation 13N et 41Ar. Il s'agit de mettre à jour l'étude que nous avons réalisée en incluant ces nouveaux éléments.

Cette étude de dispersion portera sur deux scenarii correspondant au fonctionnement normal du site et à une situation incidentelle.

L'objectif de la présente étude est de déterminer si le site dans son fonctionnement normal ou en mode accidentel, engendre des dépassements de la valeur règlementaire française de 1 mSv/an d'exposition et conduit à 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. D'un point de vue modélisation, l'approche est similaire à celle utilisée en 2017. 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 via une approche 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 :

¹ Computational Fluid Dynamics

² Reynolds Averaged Navier-Stokes



Phénomènes pris en compte	Commentaires
<input checked="" type="checkbox"/> Météorologie	Météorologie tri-horaire sur l'année 2023. Les conditions météorologiques sont issues de la station météorologique de l'aéroport de Bron à 3 km du site étudié.
<input checked="" type="checkbox"/> Description verticale des vitesses, température et turbulence atmosphérique	Un forçage météorologique est imposé en entrée de domaine CFD, 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 ou particulaire. Le dépôt humide a été pris en compte. Le dépôt sec (négligeable pour les espèces gazeuses) n'a été considéré que pour les éléments solides.
<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 n'a pas été pris en compte.

Tableau 1 - Phénomènes pris en compte dans la modélisation

2.3 Domaine d'étude et sites spécifiques

2.3.1 DEFINITION DU DOMAINE DE CALCUL

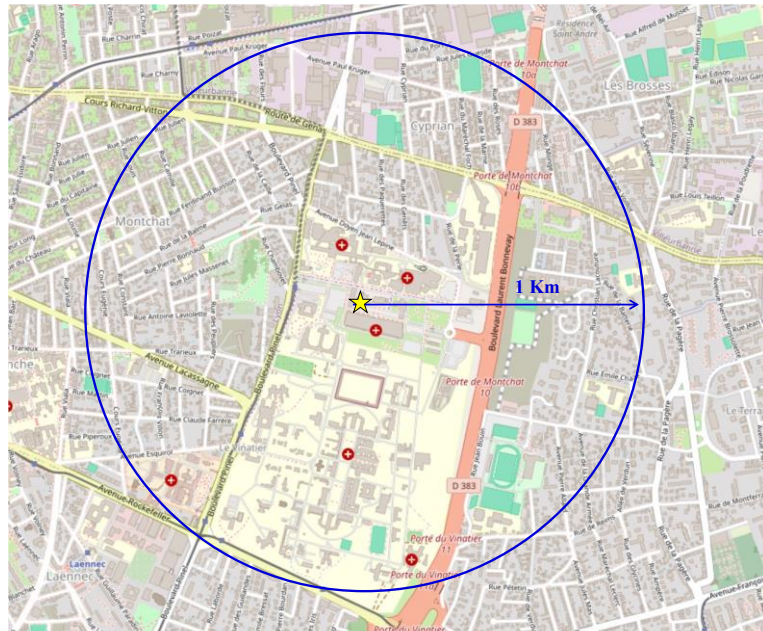
Les calculs de champs de vent et de dispersion sont réalisés sur un domaine de 1 km de rayon et 1 km de hauteur centré sur l'installation. La dose est calculée par post-traitement à une hauteur de 1.5 m au-dessus du sol permettant ainsi de cartographier l'impact du rejet autour du site et sur l'ensemble 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 due au dépôt calculé à partir de l'activité surfacique au niveau du sol.

Etendue du site d'étude

numtech
INTELLIGENCE ENVIRONNEMENTALE

CERMEP
Lyon (69)

- ★ Centre du domaine
- Zone d'étude



Aout 2024

Figure 3 - Etendue du domaine CFD

2.3.2 SITES SPECIFIQUES

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

Pour ces sites spécifiques, la dose est 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.

Ci-dessous est présentée la liste des sites spécifiques considérés et leur positionnement sur une carte ainsi que leur distance à la source :



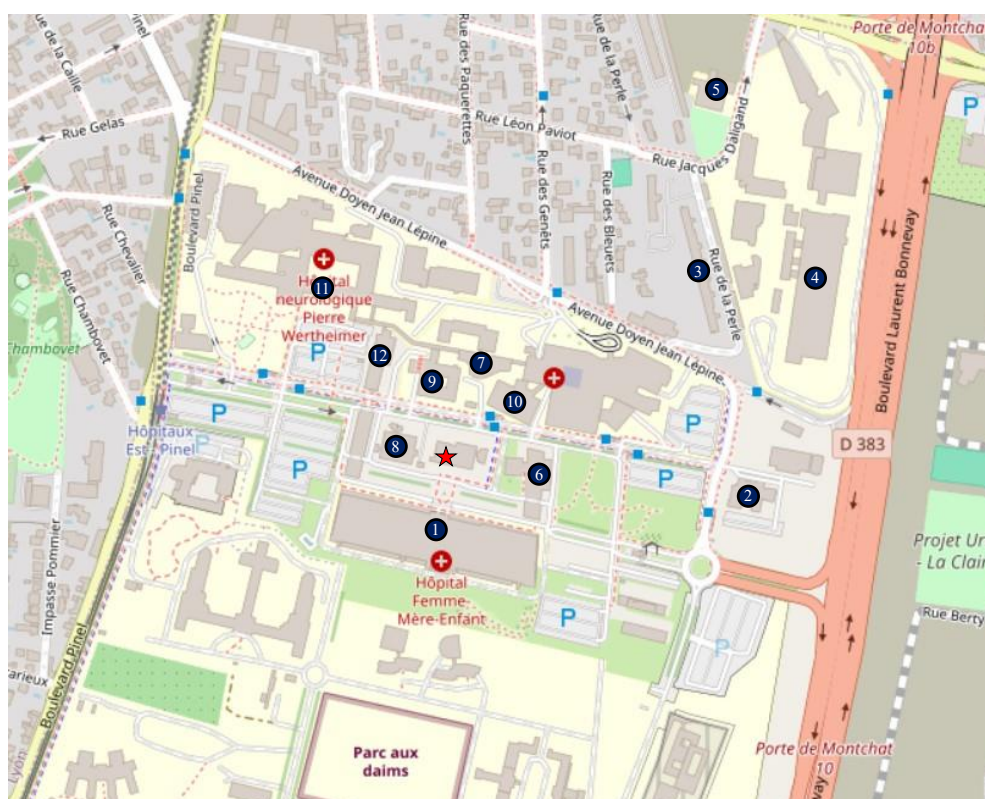
identifiant	Nom	Distance à la source(m)
1	Parvis de l'hôpital Femme-mère-enfant	80
2	L'hôtel Ibis	461
3	Immeuble rue de la Perle	478
4	Le lycée technique automobile Béjuit	630
5	L'école maternelle les Genets	701
6	Le centre biologique et pathologique est.	90
7	Restaurant	147
8	Bâtiment DSII	88
9	Centre de médecine nucléaire	124
10	hôpital cardiologie Louis Pradel	130
11	Hôpital neurologique	280
12	Extension hôpital neurologique	150

Tableau 2 : Liste des points spécifiques

Localisations des points spécifiques

CERMEP
 Lyon (69)

- ★ Source d'émission
- Sites spécifiques



Aout 2024

Figure 4 - Pointage des sites spécifiques

2.4 Topographie et nature des sols

2.4.1 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.

2.4.2 NATURE DES SOLS

La nature des sols, pouvant influencer la progression des panaches, a été prise en compte via une valeur de rugosité. Etant donné l'homogénéité de l'occupation des sols dans l'environnement proche du site d'intérêt, une valeur constante de 0.5 a été considérée. Cette dernière correspond à un environnement de type « banlieue dégagée », ce que l'on observe proche du site, hors bâtiments déjà représentés dans le modèle.

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, pour l'année 2023. 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 des données simulées issues du modèle AROME de météo France. Il s'agit d'une méthode très classique pour compléter des données de station.

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 2023. Elle montre des vents provenant principalement du secteur nord-nord-ouest, puis du secteur sud-sud-ouest.



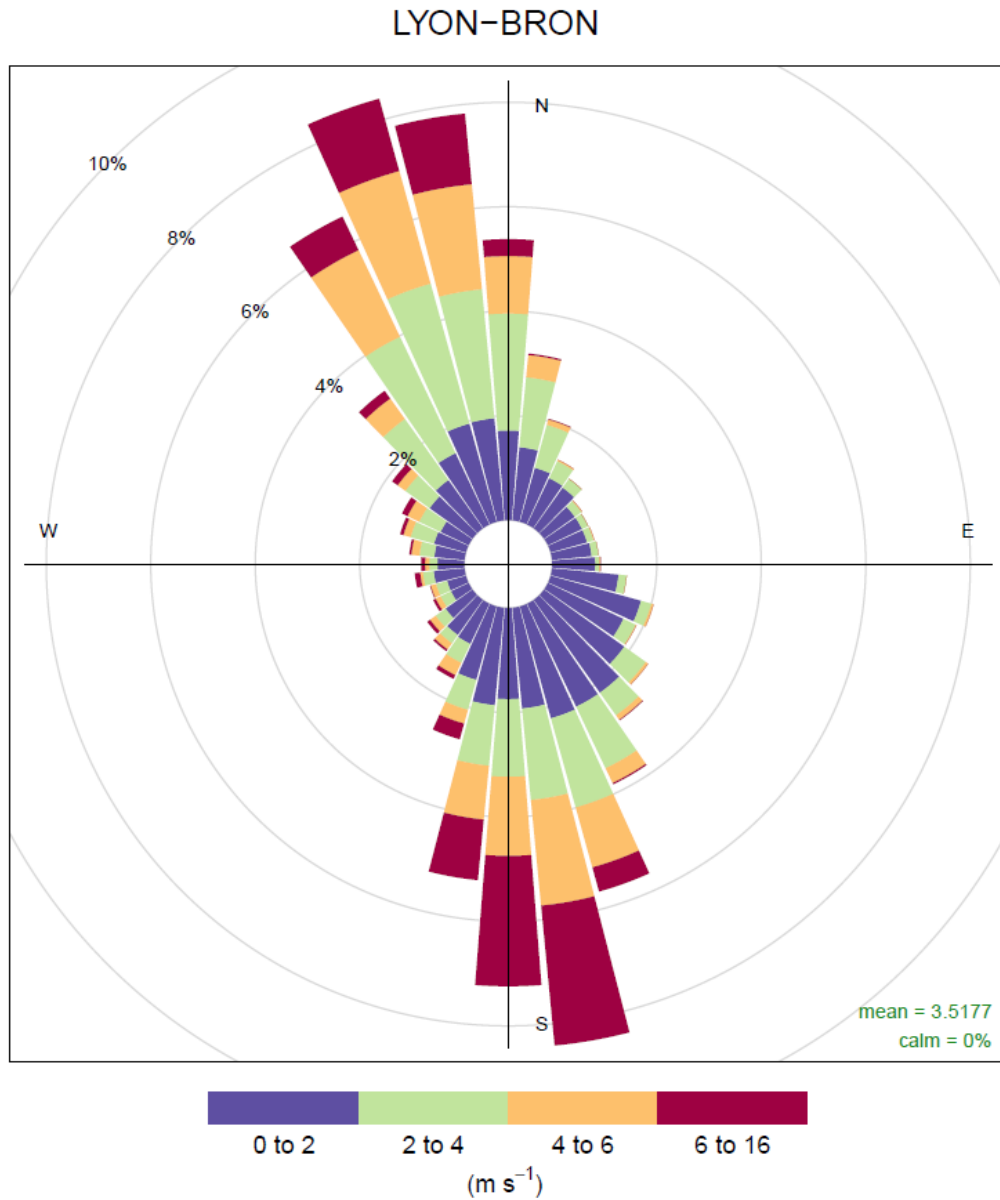


Figure 5 - Rose des vents (station de l'aéroport Lyon Bron pour l'année 2023)

Nous avons comparé cette rose des vents à celle observée pour les 10 dernière années (2013 à 2023), on peut voir que leur allure est très similaire, on retrouve des valeurs proches aussi bien en termes de direction que de vitesse de vent.

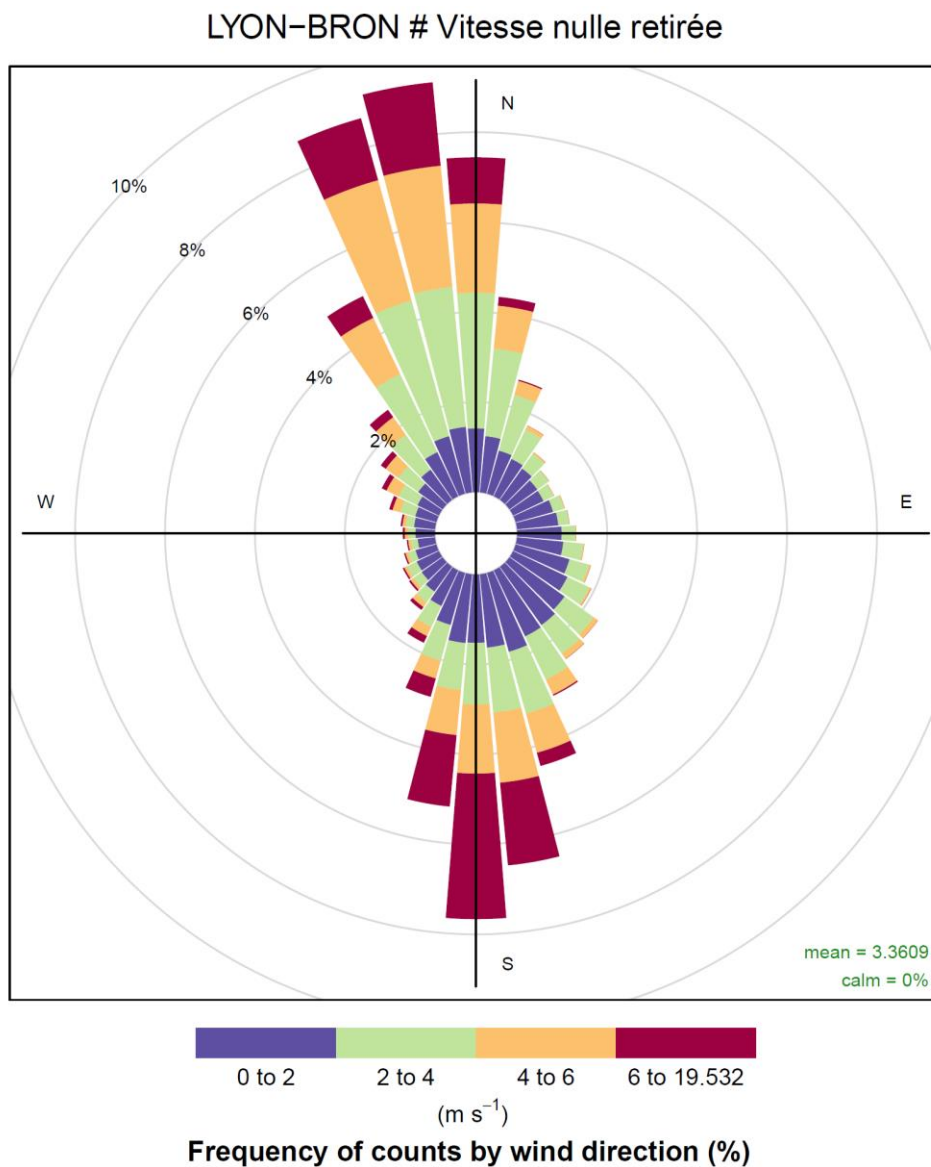


Figure 6 : Rose des vents (station de l'aéroport Lyon Bron pour les années 2013 à 2023)

2.6 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 de la végétation.

2.6.1 MODELISATION 3D DES OBSTACLES PRESENTS

La modélisation 3D du bâti du groupement hospitalier ainsi que des bâtiments environnants a été reprise de l'étude précédente réalisée en 2017.

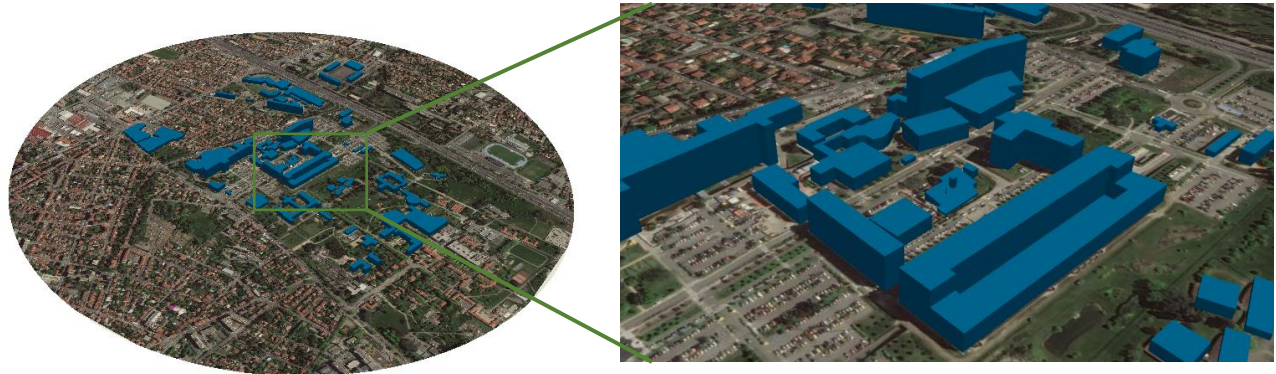


Figure 7 - Maquette 3D

2.6.2 DISCRETISATION DU DOMAINE DE CALCUL

De la même façon, le maillage a été conservé de l'étude précédente.

Le maillage est constitué de la sorte :

- 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 de calcul est rempli de mailles tétraédriques et prismes (maillage volumique).

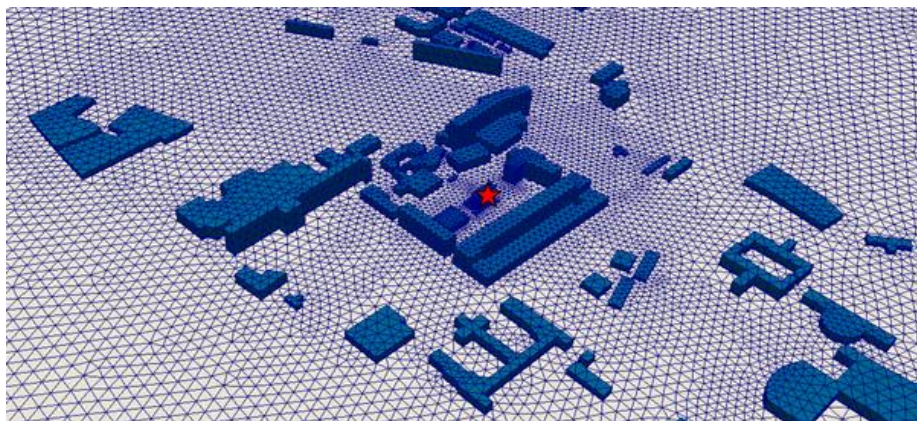


Figure 8 - Maillage surfacique

Certains détails géométriques ont fait l'objet d'un raffinement local (cas des bâtiments 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.

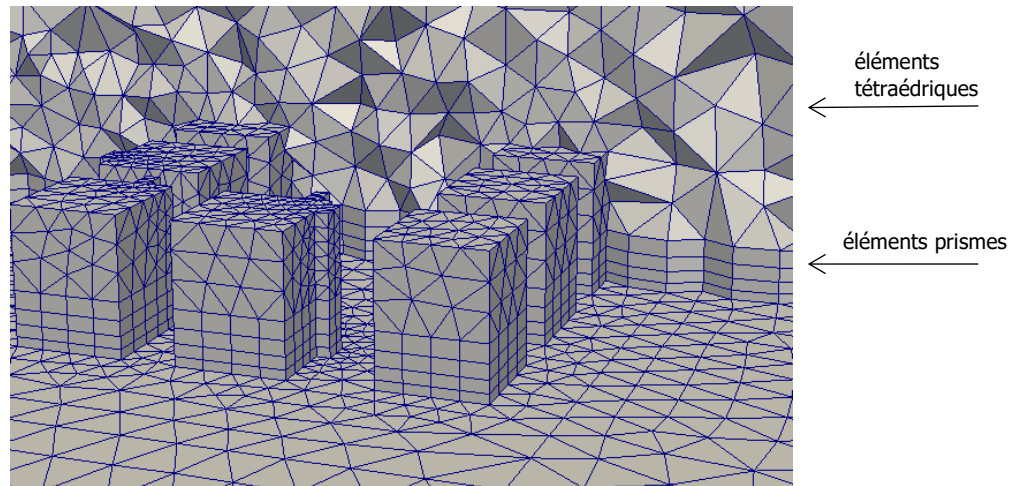


Figure 9 - Vue en coupe du maillage volumique

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 du modèle CFD

2.7.1 CHOIX DES EQUATIONS DU MODELE

La résolution des équations de Navier Stokes est faite à partir d'un système d'équations basé sur une méthode RANS³. 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) ;

³ Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations

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 Peirano⁴ qui est implémenté dans Code_Saturne.

Les radionucléides ont été dispersés sous forme gazeuse et particulaire. Le dépôt sec (au sol uniquement) est négligé pour la dispersion gazeuse tandis qu'il est pris en compte pour la dispersion particulaire. Les éléments que nous avons considéré sous forme particulaire sont le ⁸⁹Zr, ⁶⁴Cu, ⁴⁴Sc et ⁶⁸Ga (donc avec prise en compte du dépôt solide au sol), tandis que les éléments ¹⁸F, ¹¹C, ⁴¹Ar et ¹³N sont considérés comme gazeux (pas de dépôt solide).

Le dépôt humide est traité classiquement 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

2.7.2 CONDITIONS AUX LIMITES

- **Entrée de domaine**

Les conditions limites appliquée en entrée du domaine se basent sur les mesures de la station métrologique Météo-France (SYNOP) située à l'aéroport de Lyon-Bron, corrigées, présentées plus haut.

Pour chaque condition météorologique, on calcule la classe de stabilité à laquelle elle se rattache (classes de stabilité de Pasquill ordonnées de A à F, de la plus instable à la plus stable). Une fois la vitesse et direction de vent (directement issues des données météorologiques) et la classe de stabilité (calculée à partir des données météorologiques) connues, on peut en déduire, pour chaque condition, un profil vertical de vitesse et de grandeurs turbulentes (k et ϵ) d'après la théorie de similitude de Monin-Obukhov.

Ce sont ces profils verticaux (vitesse et grandeurs turbulentes) qui sont imposées en entrée du domaine pour modéliser le vent arrivant sur le domaine modélisé.

- **Paroi supérieure du domaine :**

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

⁴ Miner JP, Chibbaro, S. The PDF approach to turbulent polydispersed two-phase flows. Physics Reports 352, 1-3 (Oct. 2001), 1-214.

- **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.

2.7.3 VARIABILITE DES EMISSIONS

Pour le scénario de fonctionnement annuel, sur la base des informations transmises par le CERMEP, nous avons considéré que le rejet avait lieu uniquement les jours de semaine (du lundi au vendredi) de 9h à 18h. Une fermeture sur 3 semaines en été (dernière semaine de juillet et 2 premières semaines d'aout) et sur les 2 dernières semaines de décembre a également été considérée.

Pour le scénario accidentel nous nous sommes appuyés sur les calculs menés pour le scénario de fonctionnement annuel, on suppose donc que ce scénario accidentel ne peut advenir que sur les horaires d'ouvertures du CERMEP. En considérant les émissions du cas accidentel pour toutes les conditions météo, on détermine la dose maximale en tout point du domaine (, dit autrement, le percentile 100 horaire).

2.7.4 CARACTERISTIQUES DES REJETS

La vitesse d'éjection en sortie de cheminée a été imposée à 5,4 m/s. La hauteur de cheminée est de 8.7 mètres. Les taux d'émissions des différents radio-isotopes sont détaillés dans le tableau suivant :

Radio-isotope	18F	11C	89Zr	41Ar	13N	64Cu	44Sc	68Ga
Scénario annuel - Activité annuelle (GBq/an)	200	1800	0.5	2.38	/	0.37	0.150	0.5
Scénario incidentelle - Activité (GBq)	1.11	100	0.05	0.017	0.111	0.037	0.015	0.05

Tableau 3 - Termes sources d'activité pour les radio-isotopes

On peut calculer, pour les deux scénarios l'activité horaire. Pour le scénario annuel, on divise par le nombre d'heures ouvrées. Pour le scénario accidentel, on sait que cet évènement se déroule sur un intervalle de temps court (inférieur à 2h), on fait donc l'hypothèse que toute l'activité est émise en une heure. On obtient alors les activités horaires suivantes :



Radio-isotope	18F	11C	89Zr	41Ar	13N	64Cu	44Sc	68Ga
Scénario annuel - Activité horaire (GBq/h)	9.46E-02	8.51E-01	2.36E-04	1.13E-03	/	1.75E-04	7.09E-05	2.36E-04
Scénario incidentelle - Activité horaire (GBq/h)	1.11E+00	1.00E+02	5.00E-02	1.70E-02	1.11E-01	3.70E-02	1.50E-02	5.00E-02

Figure 10 : Recalage des termes sources d'activité horaires pour les radio-isotopes

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.

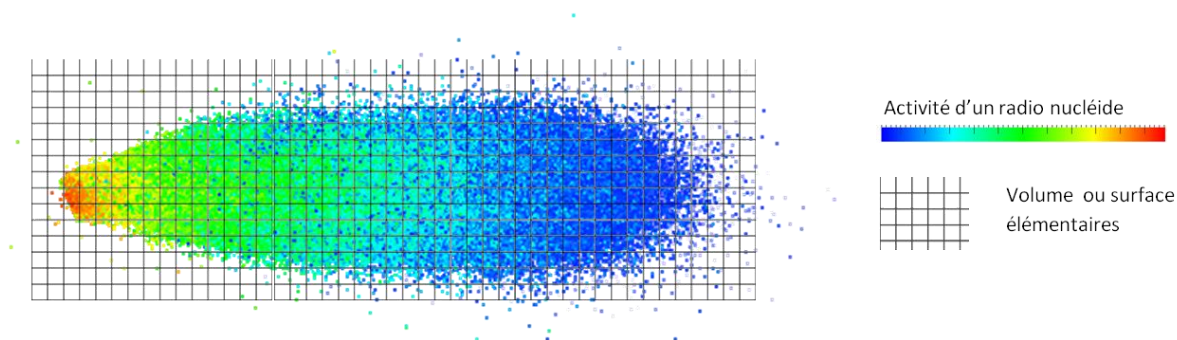


Figure 11 - Nuage de particules résultat d'une dispersion avec un modèle lagrangien

Dans un premier temps, nous évaluons la décroissance radioactive et la filiation de chaque radioélément en fonction du temps écoulé depuis l'émission dans l'atmosphère. Nous utilisons 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 réalisons 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 16 novembre 2023 (noté JO2023 par la suite). Pour cette étude nous réalisons les calculs de doses en utilisant uniquement les coefficients relatifs aux jeunes publics et aux publics adultes. On distingue d'une part la dose dite interne qui correspond à la dose inhalée et d'autre part la dose externe liée au rayonnement du panache et des dépôts de radio-éléments.

Elément	<=1 an	<=2 ans	<=7ans	<=12 ans	<=17ans	> 17 ans	Travailleur	Référence
C-11	1.50E-10	1.10E-10	4.90E-11	3.20E-11	2.10E-11	1.80E-11	1.80E-11	JO2023
N-13	0	0	0	0	0	0	0	-
F-18	2.60E-10	1.90E-10	9.10E-11	5.60E-11	3.40E-11	2.80E-11	7.80E-11	JO2023
Ar-41	0	0	0	0	0	0	0	-
Sc-44	1.60E-09	1.20E-09	5.60E-10	3.60E-10	2.30E-10	1.80E-10	1.50E-10	JO2023
Cu-64	5.50E-10	5.40E-10	2.70E-10	1.90E-10	1.40E-10	1.10E-10	6.70E-11	JO2023
Ga-68	4.60E-10	3.10E-10	1.40E-10	9.20E-11	5.90E-11	4.90E-11	5.50E-11	JO2023
Zr-89	3.70E-09	2.80E-09	1.50E-09	9.60E-10	6.50E-10	5.20E-10	3.70E-10	JO2023

Tableau 4 - Doses efficaces engagées par unité d'activité incorporée par inhalation d'aérosols en Sv.Bq-1

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

Classe d'âge	Débit respiratoire (m3/s)	Référence
<= 1 an	6.02486E-05	CIPR 66, 1993
<= 2 ans	6.02486E-05	CIPR 66, 1993
<= 7 ans	0.000101471	CIPR 66, 1993
<= 12 ans	0.000177575	CIPR 66, 1993
<= 17 ans	0.00023275	CIPR 66, 1993
> 17 ans	0.000256849	CIPR 66, 1993

Tableau 5 - Débit respiratoire (m3/s) par classe d'âge. Mention « CIPR » pour « Commission Internationale de protection radiologique, publication 66, 1993 »)

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 et de l'arrêté du 16 Novembre 2023.

Elément	Coefficient de dose efficace	Référence
C-11	4.89E-14	Federal guidance 12
N-13	4.90E-14	Federal guidance 12
F-18	4.90E-14	Federal guidance 12
Ar-41	6.13E-14	JO2023
Sc-44	1.05E-13	Federal guidance 12
Cu-64	9.10E-15	Federal guidance 12
Ga-68	4.58E-14	Federal guidance 12
Zr-89	5.68E-14	Federal guidance 12

Tableau 6 - Coefficients de dose externe induits par l'activité volumique



Elément	Coefficient de dose efficace pour le dépôt	Référence
C-11	1.01E-15	Federal guidance 12
N-13	1.01E-15	Federal guidance 12
F-18	1.01E-15	Federal guidance 12
Ar-41	1.20E-15	Federal guidance 12
Sc-44	2.07E-15	Federal guidance 12
Cu-64	1.87E-16	Federal guidance 12
Ga-68	9.41E-16	Federal guidance 12
Zr-89	1.13E-15	Federal guidance 12

Tableau 7 - Coefficients de dose externe induits par le dépôt



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 nous permet de calculer la dose à laquelle les personnes peuvent être exposées suivant les différentes classes d'âge explicitées précédemment.

3.1 Cartes des doses moyennes annuelles pour le fonctionnement normal

A titre d'illustration est présentée sur la figure suivante la dose moyenne annuelle pour la classe d'âge > 17 ans pour le scénario de fonctionnement normal. La distribution spatiale est similaire pour les différentes classes d'âge.

Résultat de dose annuelle pour le public adulte

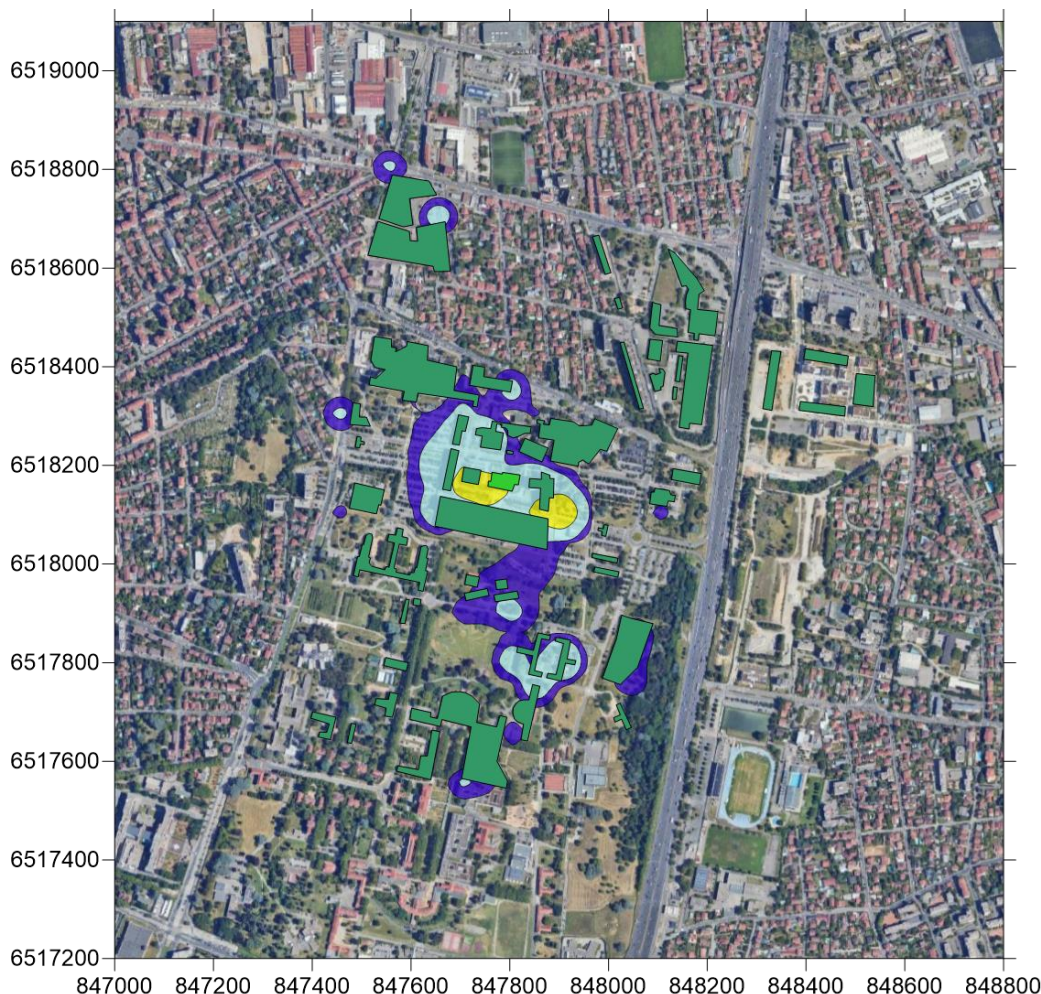
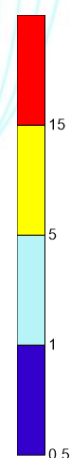


CERMEP
Lyon (69)

Calcul à 1,5 m au-dessus du sol
Météo : Année 2023

- Bâtis modélisés
- Bâti source

μSv



Aout 2024

Figure 12 - Cartographie de la contribution du CERMEP à la dose moyenne annuelle en utilisant les coefficients publics adultes (âge > 17 ans) pour le scénario de fonctionnement annuel



Les valeurs calculées à 1.5 mètres du sol sont inférieures au seuil réglementaire de 1 mSv par an. La dose maximum relevée pour la classe d'âge adulte est de 14,5 µSv et se situe proche de l'angle sud du bâtiment A3.

3.2 Valeurs calculées aux sites spécifiques en moyenne annuelle pour le fonctionnement normal

Les bâtiments les plus impactés sont le bâtiment DSII localisé à l'ouest du CERMEP et le parvis de l'hôpital mère-enfant situé en face au sud. Les valeurs de dose de ces deux bâtiments sont données dans le tableau suivant, pour toutes les classes d'âge. On notera que la dose varie peu entre les différentes classes d'âge, cela vient du fait que le principal contributeur est le 11C pour lequel la dose interne (variable selon les classes d'âges) est très faible devant la dose externe.

Identifiant	Nom	Age <= 1 an	Age <= 2 ans	Age <= 7 ans	Age <= 12 ans	Age <= 17 ans	Age > 17 ans
1	Parvis de l'hôpital Femme-mère-enfant	5.08E+00	5.03E+00	5.05E+00	5.11E+00	5.13E+00	5.14E+00
2	L'hôtel Ibis	6.92E-01	6.85E-01	6.95E-01	7.17E-01	7.29E-01	7.35E-01
3	Immeuble rue de la Perle	1.45E-02	1.43E-02	1.45E-02	1.50E-02	1.52E-02	1.53E-02
4	Le lycée technique automobile Béjuit	7.30E-03	7.23E-03	7.28E-03	7.38E-03	7.43E-03	7.46E-03
5	L'école maternelle les Genets	1.11E-02	1.10E-02	1.10E-02	1.12E-02	1.12E-02	1.13E-02
6	Le centre biologique et pathologique est.	3.38E+00	3.35E+00	3.38E+00	3.43E+00	3.45E+00	3.47E+00
7	Restaurant	7.59E-02	7.53E-02	7.57E-02	7.68E-02	7.74E-02	7.76E-02
8	Bâtiment DSII	6.22E+00	6.16E+00	6.21E+00	6.32E+00	6.38E+00	6.41E+00
9	Centre de médecine nucléaire	2.24E+00	2.22E+00	2.24E+00	2.29E+00	2.32E+00	2.33E+00
10	Hôpital cardiologie Louis Pradel	8.93E-02	8.86E-02	8.89E-02	9.00E-02	9.04E-02	9.06E-02
11	Hôpital neurologique	2.00E-02	2.00E-02	2.00E-02	2.00E-02	2.00E-02	2.00E-02
12	Extension hôpital neurologique	1.30E+00	1.29E+00	1.30E+00	1.32E+00	1.33E+00	1.33E+00

Tableau 8 - Dose par classe d'âge aux sites spécifiques pour le scénario de fonctionnement annuel (en µSv pour 1 an)

3.3 Carte des doses en scénario incidentel

Les résultats suivants décrivent la dose maximale qui serait observée en cas de rejet accidentel et ponctuel d'une forte quantité de radio-isotopes. Nous avons donc regardé pour chaque condition météorologique rencontrée sur les horaires d'ouverture du CERMEP quel serait le pire cas en termes d'exposition. Les résultats suivants présentent cette dose maximale pour une durée d'une heure.



Résultat de dose incidentelle pour le public adulte

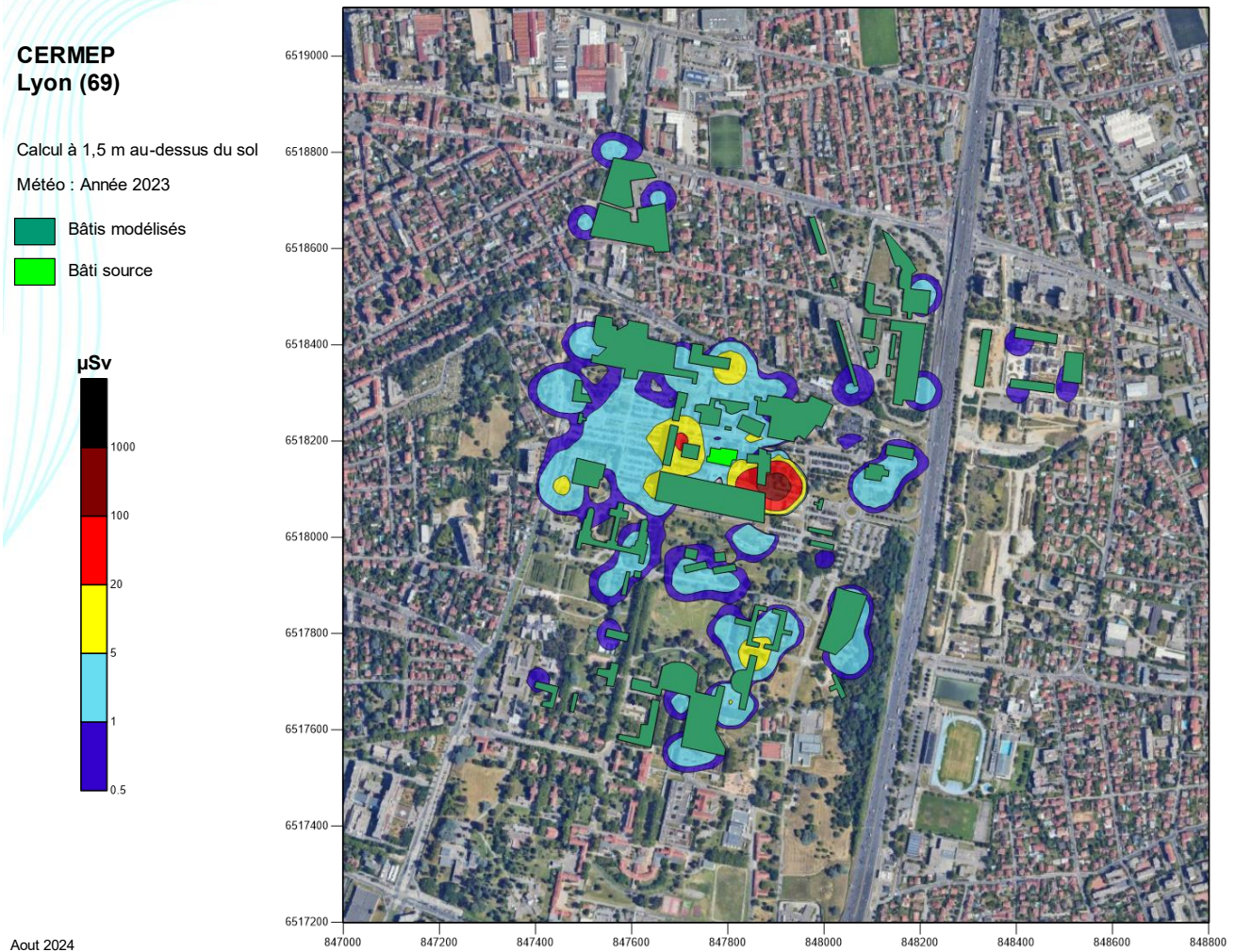


Figure 13 - Cartographie de la contribution du CERMEP à la dose moyenne annuelle en utilisant les coefficients publics adultes (âge > 17 ans) pour le scénario incidentel

Les valeurs calculées à 1.5 mètres du sol sont inférieures au seuil réglementaire de 1 mSv par an. La dose maximum relevée pour la classe d'âge adulte est de 205 µSv et se situe de nouveau proche de l'angle sud du bâtiment A3.

Par rapport au scénario annuel on constate bien sûr une dose bien plus forte (le ratio entre les deux maximums observés, accidentel et annuel, est proche de 14), cela est cohérent avec le fait que l'activité à la source est bien plus importante sur le scénario accidentel (ramené à une activité horaire, le cas accidentel présente des activités à la source 10 à 200 fois plus importantes que le cas annuel selon les radio-isotopes). On observe aussi une répartition spatiale différente, ce qui est là aussi cohérent puisque la cartographie du scénario annuel présente les résultats des doses agrégées pour différentes conditions météorologiques au cours de l'année, tandis que la cartographie du cas accidentel présente la dose maximale observée pour différentes conditions météo (on parle alors de percentile 100 horaire).

3.4 Valeurs calculées aux sites spécifiques en scénario incidentel

Sur les valeurs calculées à 1.5 mètres du sol, on observe une dose maximale de 205µSv. Celle-ci se situe toujours proche de l'angle sud du bâtiment A3.

Les valeurs de dose pour tous les bâtiments sont données dans le tableau suivant pour chaque classe d'âge.

Identifiant	Nom	Age <= 1 an	Age <= 2 ans	Age <= 7 ans	Age <= 12 ans	Age <= 17 ans	Age > 17 ans
1	Parvis de l'hôpital Femme-mère-enfant	3.08E+00	3.06E+00	3.05E+00	3.06E+00	3.05E+00	3.05E+00
2	L'hôtel Ibis	5.24E+00	5.19E+00	5.19E+00	5.23E+00	5.22E+00	5.23E+00
3	Immeuble rue de la Perle	2.23E-01	2.21E-01	2.21E-01	2.23E-01	2.23E-01	2.23E-01
4	Le lycée technique automobile Béjuvit	5.76E-02	5.68E-02	5.68E-02	5.70E-02	5.68E-02	5.68E-02
5	L'école maternelle les Genets	1.17E-01	1.16E-01	1.16E-01	1.16E-01	1.16E-01	1.16E-01
6	Le centre biologique et pathologique est.	1.16E+01	1.15E+01	1.15E+01	1.15E+01	1.15E+01	1.15E+01
7	Restaurant	2.75E-01	2.71E-01	2.71E-01	2.73E-01	2.72E-01	2.72E-01
8	Bâtiment DSII	6.66E+00	6.58E+00	6.58E+00	6.61E+00	6.59E+00	6.59E+00
9	Centre de médecine nucléaire	3.35E+00	3.31E+00	3.31E+00	3.33E+00	3.32E+00	3.32E+00
10	Hôpital cardiologie Louis Pradel	2.73E-01	2.71E-01	2.71E-01	2.72E-01	2.71E-01	2.71E-01
11	Hôpital neurologique	1.43E-01	1.43E-01	1.43E-01	1.43E-01	1.43E-01	1.43E-01
12	Extension hôpital neurologique	1.12E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00	1.11E+00

Tableau 9 - Dose aux sites spécifiques pour le scénario accidentel (en µSv)

3.5 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.

3.5.1 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 pratiques⁵.

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 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.

3.5.2 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 code_saturne, 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 complétées 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 estimé par le CERMEP.

Tableau 10 - Qualité des données d'entrée du modèle.

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

⁵ COST Action 732 : Best practice Guideline for the CFD simulation of flow in urban environment



4 PRINCIPALES CONCLUSIONS

L'objectif de la présente étude était de modéliser le rejet radiologique du CERMEP , dans son fonctionnement normal et dans un cas dit incidentel, suite à la prise en compte de nouveaux rejets de radio-isotopes par rapport à la précédente étude (pour rappel : 11C, 18F, 89Zr, 68Ga, 64Cu, 44Sc et des principaux produits d'activation 13N et 14Ar). L'objectif est de déterminer si cette nouvelle configuration engendre des dépassements de la valeur règlementaire française de 1 mSv/an d'exposition.

Une modélisation du site et de ses rejets a été réalisée, 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 la valeur règlementaire.

Les calculs réalisés montrent que ni les doses moyennes annuelles, ni les doses dans le cas d'un scénario incidentel ne dépassent la valeur règlementaire.

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



TABLE DES ANNEXES

ANNEXE A	Caractéristiques du modèle Code_Saturne	29
A.1	Présentation	29
A.2	Caractéristiques	29



ANNEXE A Caractéristiques du modèle Code_Saturne

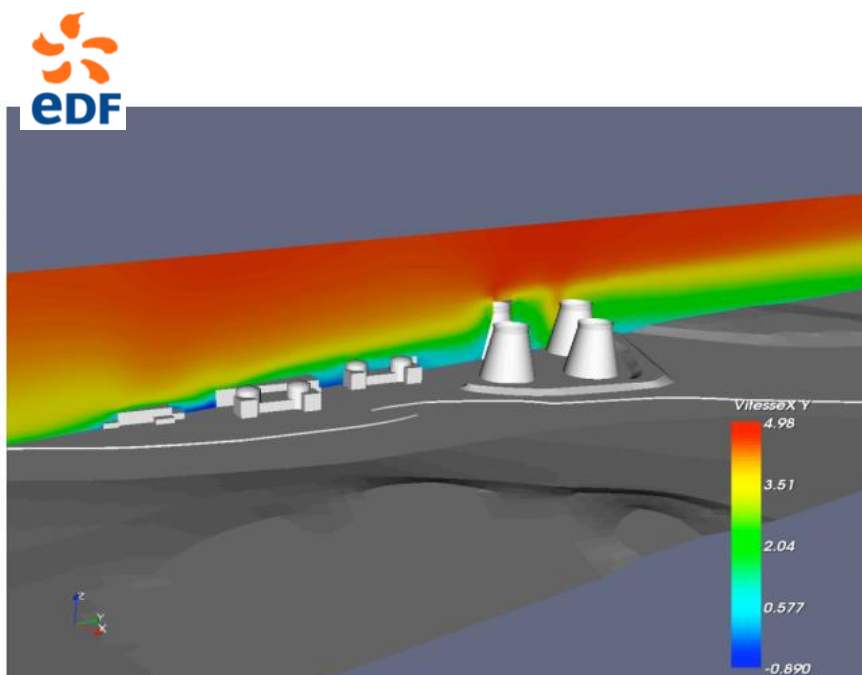
Code_Saturne est le logiciel généraliste de Mécanique des Fluides Numérique (CFD) développé par EDF.



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.

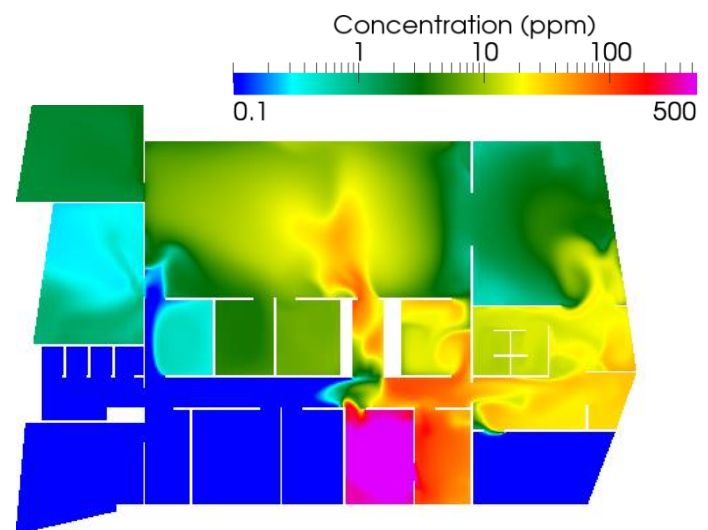
A.2 Caractéristiques



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.



13 rue verte
bâtiment V24
63118 Cébazat
www.numtech.fr

