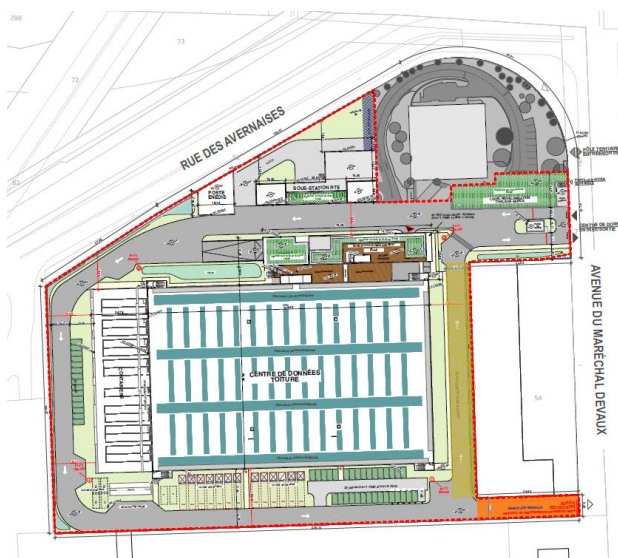


EODD

Futur data center situé à Paray-Vieille-Poste (91)



Etude d'impact sur la qualité de l'air des rejets atmosphériques des groupes électrogènes

Références : Rapport n°2026.011

Version : V2 – mars 2026

Références du projet :

Titre	Etude d'impact sur la qualité de l'air des rejets atmosphériques des groupes électrogènes – Futur data center à Paray-Vieille-Poste (91)
N° rapport	2026.011
N° projet	L-003480
Sous-traitant	-

Intervenants :

Rédacteur	Tamara FOURCOUAL - Cheffe de projet
Relecteur	Héloïse YVERNEAU - Responsable de pôle Etudes réglementaires
Référent	Héloïse YVERNEAU - Responsable de pôle Etudes réglementaires

Révisions du document

Version	Date	Modifications
1	03/03/2026	Version initiale
2	26/03/2026	Version modifiée suite aux remarques du client

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	5
2	CARACTERISATION DES EMISSIONS ATMOSPHERIQUES	6
2.1	Termes sources identifiés	6
2.2	Scénarios d'émissions retenus	7
3	MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE	8
3.1	Présentation du logiciel de dispersion et paramétrages.....	8
3.1.1	Présentation générale du logiciel	8
3.1.2	Paramétrages du modèle	9
3.2	Données d'entrée du modèle	10
3.2.1	Domaine d'étude	10
3.2.2	Topographie et occupation des sols.....	11
3.2.3	Obstacles	12
3.2.4	Emissions	13
3.2.5	Météorologie	14
3.3	Résultats : concentrations dans l'air modélisées	16
3.3.1	Valeurs de référence pour la qualité de l'air	16
3.3.2	Présentation des résultats.....	16
3.3.3	Scénario 1 : fonctionnement des groupes électrogènes pendant 1h	17
3.3.4	Scénario 2 : fonctionnement des groupes électrogènes pendant 24h	20
3.3.5	Scénario 3 : fonctionnement des groupes électrogènes pendant 1 semaine	24
4	INCERTITUDES	28
4.1	Incertitudes liées au modèle : validation du modèle MSS	28
4.2	Incertitudes liées aux données d'entrée.....	29
4.2.1	Incertitudes liées aux émissions	29
4.2.2	Incertitudes liées aux mesures météorologiques.....	29
4.2.3	Incertitudes liées aux paramètres du modèle.....	29
5	SYNTHESE.....	30
	ANNEXES	31
	Annexe 1 : Description du logiciel MSS	32
	Annexe 2 : Données météorologiques.....	43
	Annexe 3 : Cartes de dispersion	49

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAUX

Tableau 1 : Emissions atmosphériques considérées	7
Tableau 2 : Paramètres de calcul pour les espèces étudiées	10
Tableau 3 : Caractéristiques des rejets atmosphériques	13
Tableau 4 : Critères de référence pour la qualité de l'air	16
Tableau 5 : Concentrations modélisées pour le scénario 1 (moyennes horaires)	20
Tableau 6 : Concentrations modélisées pour le scénario 2 (moyennes journalières)	24
Tableau 7 : Concentrations modélisées pour le scénario 3 (moyennes hebdomadaires)	27

FIGURES

Figure 1 : Localisation du site	6
Figure 2 : Méthodologie mise en œuvre par le modèle de dispersion atmosphérique.....	9
Figure 3 : Localisation du domaine d'étude	10
Figure 4 : Topographie du domaine d'étude.....	11
Figure 5 : Bâtiments présents sur la zone d'étude.....	12
Figure 6 : Visualisation 3D du futur site et des obstacles à proximité	13
Figure 7 : Localisation des points de rejet.....	14
Figure 8 : Rose des vents sur la période 2021 à 2023	15
Figure 9 : Localisation des points cibles identifiés par EODD.....	17
Figure 10 : Carte de concentrations en moyenne horaire en NO ₂	18
Figure 11 : Evolution des concentrations en NO ₂ toutes les 10 minutes.....	19
Figure 12 : Concentrations moyennes horaires en NO ₂	19
Figure 13 : Carte de concentration en moyenne journalière en NO ₂	21
Figure 14 : localisation du point le plus exposé - scénario journalier	21
Figure 15 : Evolution des concentrations moyennes en NO ₂ sur une heure	22
Figure 16 : Concentrations moyennes journalières en NO ₂	23
Figure 17 : Carte de concentration en moyenne hebdomadaire en NO ₂	25
Figure 18 : localisation du point le plus exposé - scénario hebdomadaire	25
Figure 18 : Evolution des concentrations moyennes journalières en NO ₂	26
Figure 19 : Lignes de courant et concentration en SF ₆ à 4h10, 4h20 et 4h30.....	28

1 INTRODUCTION

Dans le cadre d'une Demande d'Autorisation Environnementale (DAE) pour un projet de data center situé sur la commune de Paray-Vieille-Poste (91) et afin d'anticiper d'éventuels retour de la part de l'Administration (sur la base de leur retour d'expérience sur des dossiers similaires), EODD a sollicité SUEZ Aria Technologies pour évaluer l'impact sur la qualité de l'air des rejets atmosphériques des groupes électrogènes de secours de ce projet (incluant des modélisations de la dispersion de leurs émissions). En particulier : *« L'ARS recommande de modéliser la dispersion des polluants en étudiant spécifiquement un fonctionnement continu pendant plusieurs jours des groupes électrogènes, et conjointement aux différents effluents recensés qui seront rejetés dans l'air par le projet en fonctionnement »*.

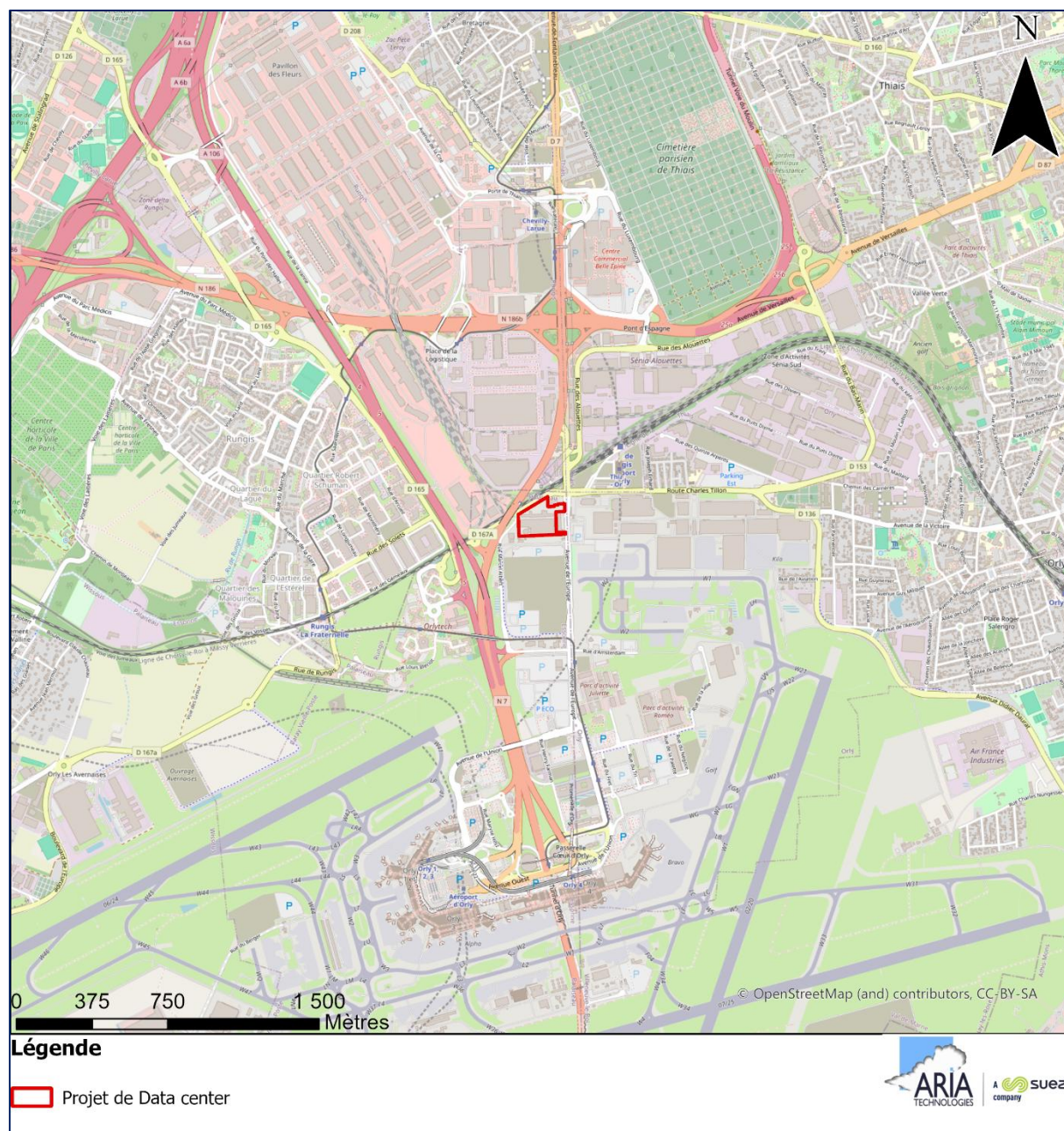
Ce rapport a été établi sur la base des informations transmises à SUEZ Aria Technologies, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives de la réglementation, en vigueur au moment de la réalisation du dossier. La responsabilité de SUEZ Aria Technologies ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été fournies sont incomplètes ou erronées. Sauf mention contraire, l'intégralité des cartographies de ce document sont la propriété de SUEZ Aria Technologies.

2 CARACTERISATION DES EMISSIONS ATMOSPHERIQUES

2.1 TERMES SOURCES IDENTIFIES

La localisation du site en projet, au niveau de la commune de Paray-Vieille-Poste (91), est illustrée sur la Figure 1. Le site est situé dans une zone industrielle et commerciale, au nord de l'aéroport d'Orly.

Figure 1 : Localisation du site



Les rejets atmosphériques considérés correspondent à ceux des 37 groupes électrogènes du futur site (utilisés en cas de secours principalement) au niveau de 37 cheminées. Conformément aux données transmises par EODD, dans le cadre de la présente étude, les groupes électrogènes peuvent être à l'origine d'émissions canalisées de : poussières (PM₁₀¹ et PM_{2,5}²), d'oxydes d'azote (NO_x), d'ammoniac (NH₃), de dioxyde de soufre (SO₂), d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), de formaldéhyde et de monoxyde de carbone (CO).

Les informations relatives aux rejets atmosphériques des groupes électrogènes ont été transmises par EODD et sont présentées dans le Tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Emissions atmosphériques considérées

Composés	Unités	Flux émis par chaque groupe électrogène	Flux total calculé pour les 37 groupes électrogènes
PM ₁₀	kg/h	0,36	13,22
PM _{2,5}		0,36	13,22
NO _x		3,44*	127,19*
NH ₃		0,28	10,18
SO ₂		0,83	30,52
HAP		0,0014	0,05
Formaldéhyde		0,21	7,63
CO		0,32	11,90

* Ce flux prend en compte les performances du système de traitement des NO_x

La part NO₂/NO_x des émissions n'est pas connue. Les émissions en NO_x ont donc été assimilées à 100 % au NO₂, substance réglementée au niveau de la qualité de l'air : c'est une approche majorante.

2.2 SCENARIOS D'EMISSIONS RETENUS

Compte tenu du contexte de l'étude, les trois scénarios retenus conjointement avec EODD sont les suivants :

- Scénario 1 : fonctionnement des groupes électrogènes en continu pendant 1h ;
- Scénario 2 : fonctionnement des groupes électrogènes en continu pendant 24h. Il s'agit d'un scénario très peu probable dans la mesure où il n'a vocation à se produire qu'en cas d'une panne généralisée sur l'ensemble des lignes d'une durée d'une journée ;
- Scénario 3 : fonctionnement des groupes électrogènes en continu pendant une semaine. Il s'agit d'un scénario très peu probable dans la mesure où il n'a vocation à se produire qu'en cas d'une panne généralisée sur l'ensemble des lignes d'une durée d'une semaine.

¹ Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 10 µm

² Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 2,5 µm

3 MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Les concentrations dans l'air des substances étudiées (NO_x, PM₁₀ et PM_{2,5}, NH₃, SO₂, HAP, formaldéhyde et CO) dans l'environnement du site, lorsque les groupes électrogènes fonctionneront sur les durées définies (une heure, une journée ou une semaine), ont été estimées par des modélisations de la dispersion atmosphérique. Les paragraphes suivants décrivent la méthodologie utilisée ainsi que les résultats obtenus.

3.1 PRESENTATION DU LOGICIEL DE DISPERSION ET PARAMETRAGES

3.1.1 Présentation générale du logiciel

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 du contexte urbain et de la présence de bâtiments autour du site, nous avons utilisé le logiciel **Air Advanced Map Expert** en mettant en œuvre le modèle 3D **PMSS³**. 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.

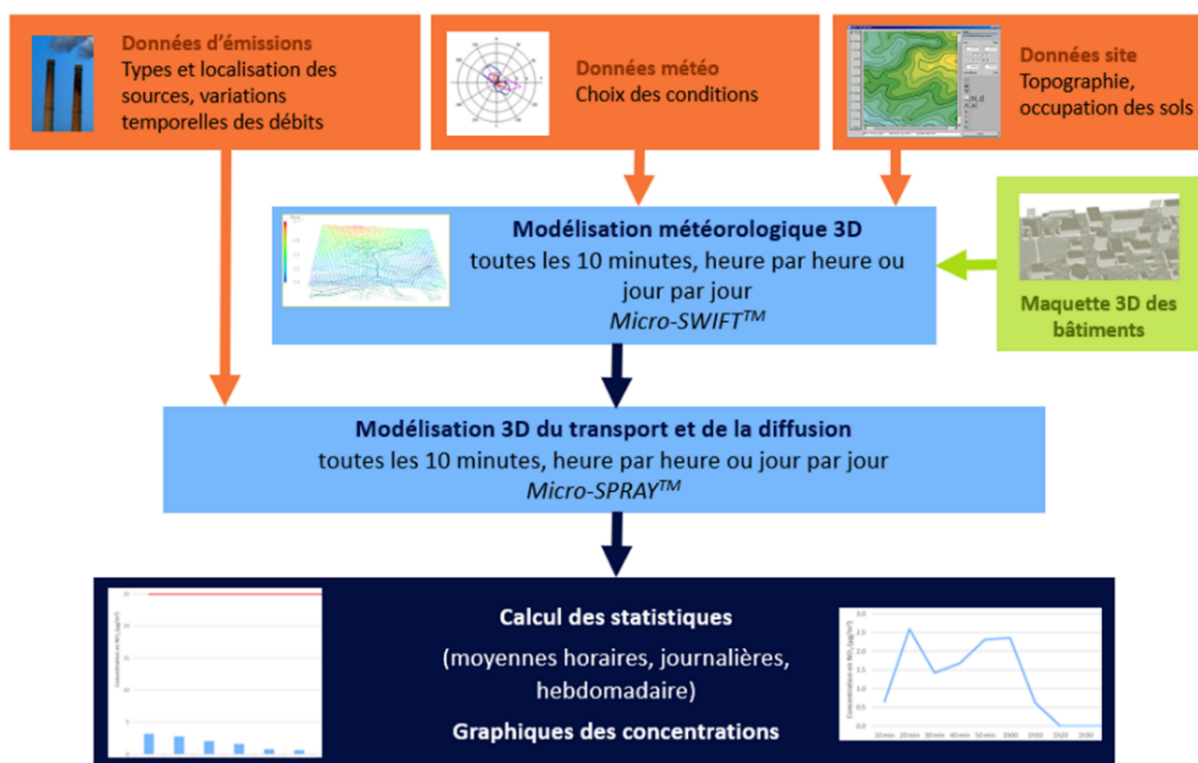
PMSS (description technique du logiciel en Annexe 1) repose sur la mise en œuvre de :

- **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").

La Figure 2 présente la méthodologie mise en œuvre pour déterminer les concentrations dans l'air.

³ Parallel Micro SWIFT-SPRAY

Figure 2 : Méthodologie mise en œuvre par le modèle de dispersion atmosphérique



3.1.2 Paramétrages du modèle

3.1.2.1 Grille de calcul

La grille de calcul a été définie avec une résolution de 15 mètres dans le plan horizontal et avec une hauteur qui dépend de la répartition des niveaux verticaux. Il a été défini 21 niveaux verticaux répartis entre 0 et 580 mètres d'altitude. La hauteur de maille la plus petite est de 5 mètres près du sol et la plus grande maille, au niveau du plafond du domaine, atteint 580 mètres.

3.1.2.2 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 en 3D sont :

- Pas de temps d'émissions des particules : 3 secondes ;
- Nombre de particules émises par pas de temps : 4 000 ;
- Durée de moyennage : 600 secondes pour le scénario 1 et 3 600 secondes pour les scénarios 2 et 3.

Le Tableau 2 résume les principales valeurs utilisées dans le cadre de cette étude pour les espèces considérées.

Tableau 2 : Paramètres de calcul pour les espèces étudiées

	Phase	Diamètre de particules (µm)	Vitesse de dépôt (m/s)	Masse volumique (kg/m³)	Coefficient de lessivage (s ⁻¹)
NO _x	Gaz	-	0	1	1.10 ⁻⁵
NH ₃	Gaz	-	0	1	1.10 ⁻⁵
PM10	Particules	10	1,3.10 ⁻²	3 000	4.10 ⁻⁴
PM2,5	Particules	2,5	6.10 ⁻³	3 000	8.10 ⁻⁵
SO ₂	Gaz	-	0	1	1.10 ⁻⁵
HAP	Particules	1,3	5.10 ⁻⁴	1	1.10 ⁻⁵
Formaldéhyde	Gaz	-	0	1	1.10 ⁻⁵
CO	Gaz	-	0	1	1.10 ⁻⁵

3.2 DONNEES D'ENTREE DU MODELE

3.2.1 Domaine d'étude

Le domaine d'étude retenu correspond à un carré de 10 km de côté centré sur le site, il est représenté par un carré noir sur la Figure 3.

Figure 3 : Localisation du domaine d'étude

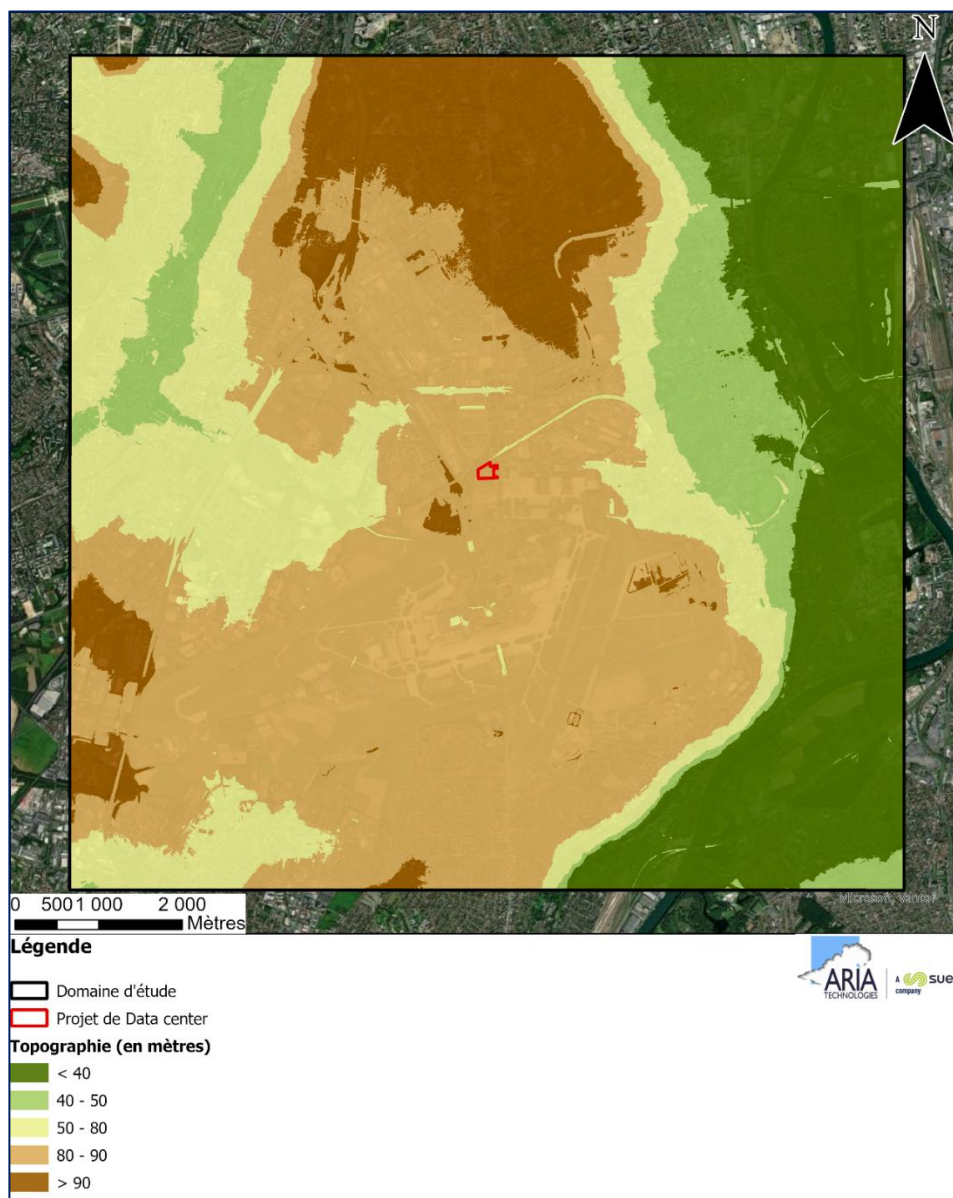


3.2.2 Topographie et occupation des sols

La topographie est issue d'un Modèle Numérique de Terrain au pas de 5 mètres qui provient de la RGE ALTI® fournie par l'Institut National Géographique (IGN). La Figure 4 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 31 et 182 mètres.

L'occupation des sols prise en compte dans les simulations provient des données du portail GlobCover de l'ESA⁴ (Agence Spatiale Européenne).

Figure 4 : Topographie du domaine d'étude



⁴ GlobCover est une initiative de l'ESA qui a débuté en 2005 avec pour objectif de fournir des composites globaux et des cartes d'occupation des sols en utilisant comme données d'entrée les observations du capteur MERIS 300m à bord de la mission satellite ENVISAT : https://due.esrin.esa.int/page_globcover.php

3.2.3 Obstacles

Compte tenu du contexte urbain, justifiant l'utilisation d'un modèle 3D, les obstacles présents dans chaque domaine d'étude et pouvant influencer sur les écoulements d'air ont été modélisés (en prenant en compte leur volume et leur hauteur). Les informations concernant les obstacles (bâti existant) sont issues de la BD TOPO® fournie par l'IGN (dont les données les plus récentes datent de décembre 2025).

Les bâtiments du projet de data center ont également été ajoutés sur la base des données fournies par EODD (plans de masse et vues axonométriques notamment).

La Figure 5 présente les obstacles sur le domaine d'étude et la Figure 6 présente une vue 3D du futur site ainsi que des bâtiments à proximité.

Figure 5 : Bâtiments présents sur la zone d'étude

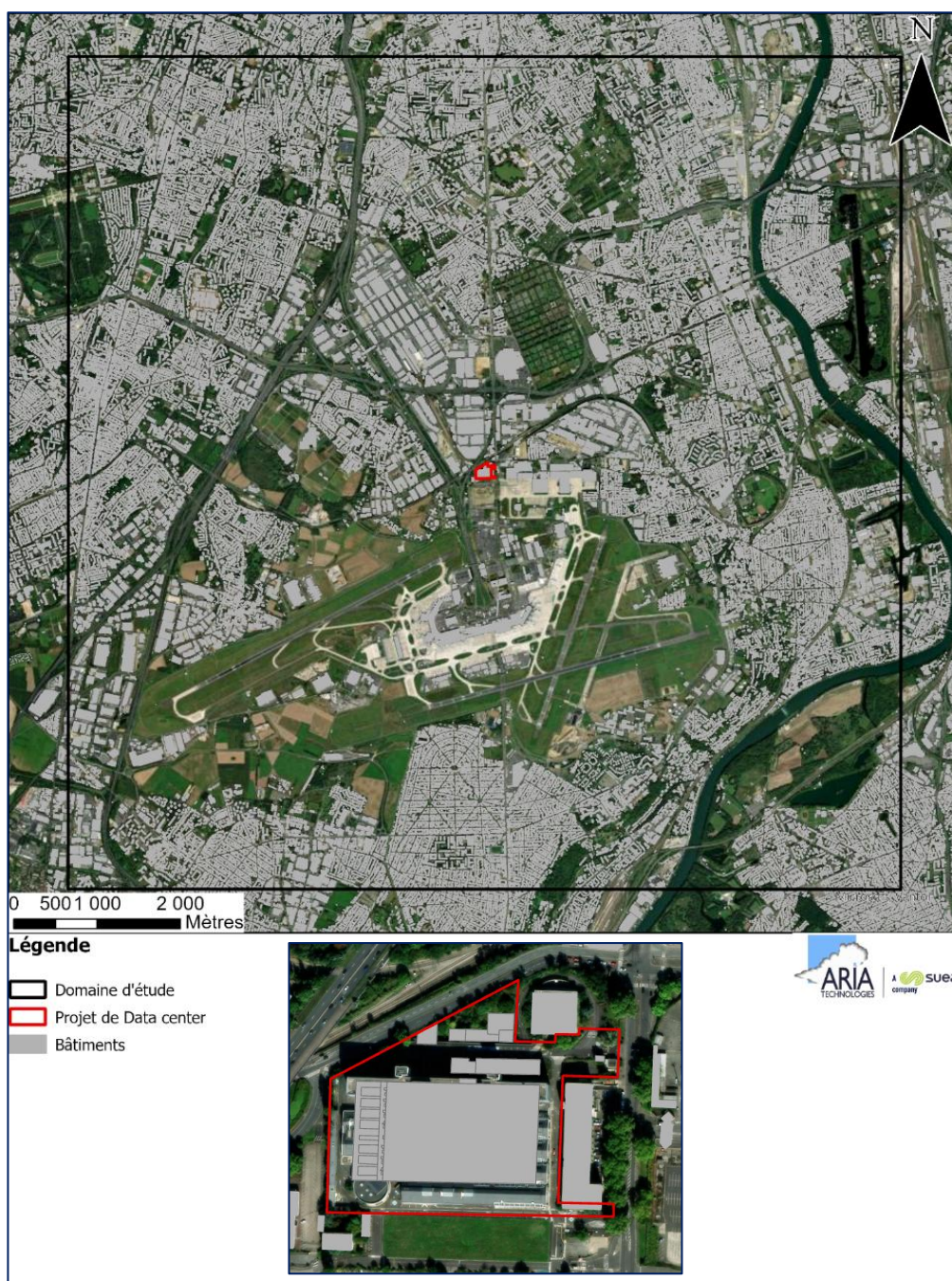


Figure 6 : Visualisation 3D du futur site et des obstacles à proximité



3.2.4 Emissions

Les émissions prises en compte correspondent aux émissions des 37 groupes électrogènes dont les exutoires correspondent à 37 cheminées. Les émissions prises en compte correspondent aux termes sources présentés dans le Tableau 1, paragraphe 2.1. Dans la présente étude, dans une approche majorante, les NO_x sont assimilés à 100 % à du NO₂, la substance réglementée.

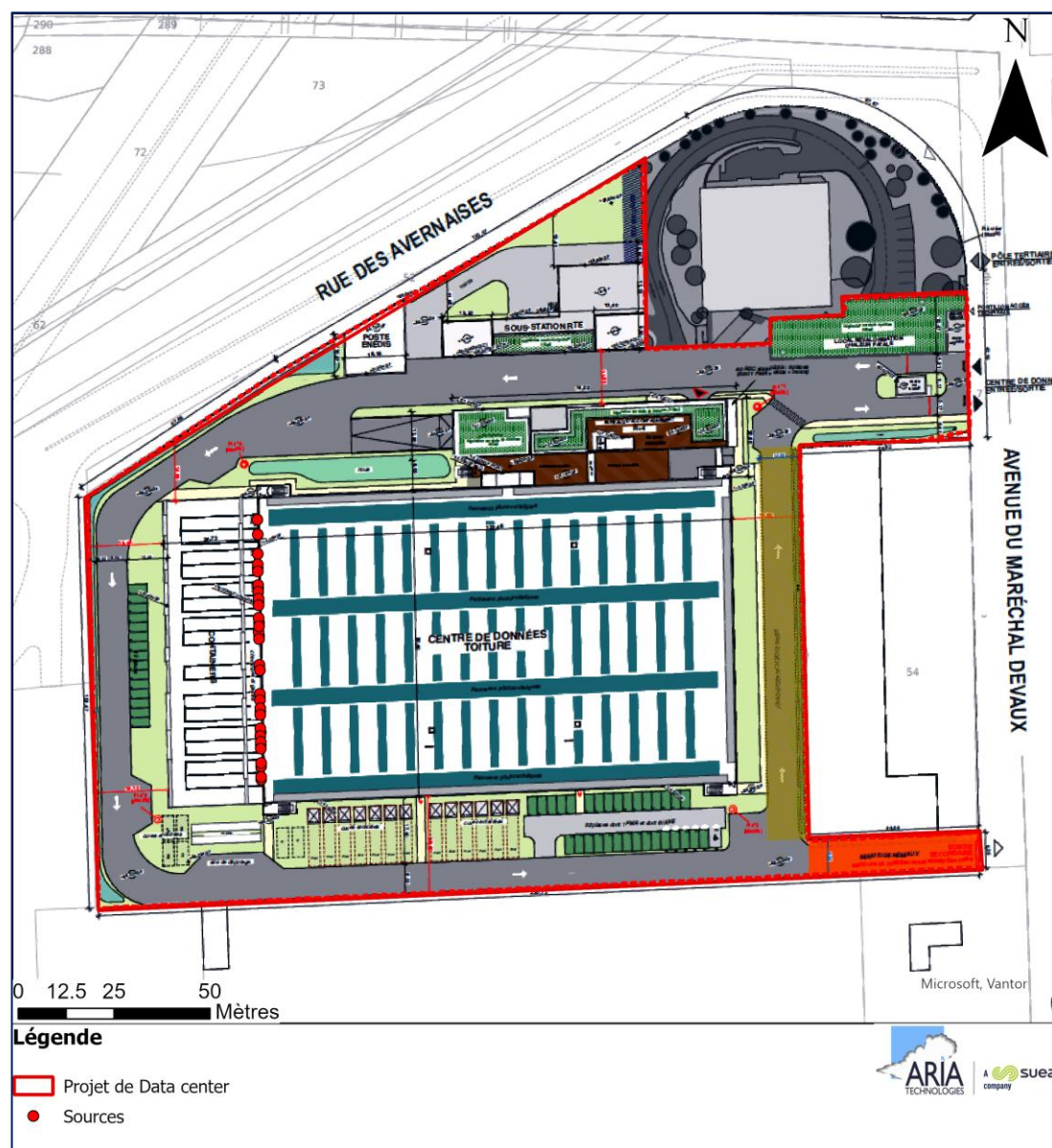
Pour chacun des 3 scénarios, il a été pris en compte des émissions sur la période considérée (soit 1h pour le scénario 1, 24 h pour le scénario 2 et une semaine pour le scénario 3) puis des émissions nulles ensuite (afin de voir la décroissance des concentrations dans l'environnement à la suite de l'arrêt du fonctionnement des groupes électrogènes).

Les caractéristiques des cheminées (fournies par EODD) sont détaillées dans le Tableau 3. Elles sont localisées sur la Figure 7.

Tableau 3 : Caractéristiques des rejets atmosphériques

Caractéristiques	Unités	Cheminée
Hauteur par rapport au sol	m	32,7
Diamètre au niveau de l'éjection	m	0,65
Température des rejets	°C	500
Vitesse d'éjection (au débouché)	m/s	25,25

Figure 7 : Localisation des points de rejet



3.2.5 Météorologie

Les paramètres les plus importants pour la modélisation de la dispersion atmosphérique sont : la direction du vent, la vitesse du vent, la température extérieure, la pluviométrie et la stabilité de l'atmosphère.

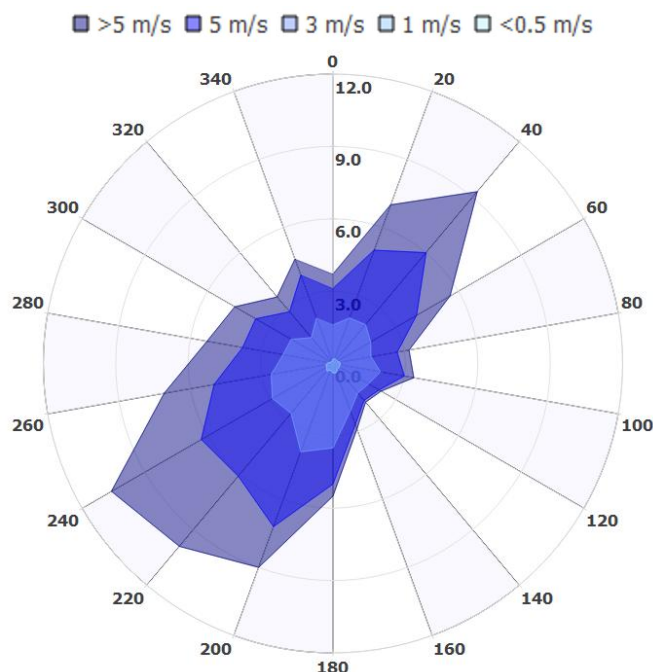
Ces paramètres sont variables dans le temps et dans l'espace. Ils résultent de la superposition de phénomènes atmosphériques à grande échelle (régime cyclonique ou anticyclonique) et de phénomènes locaux (influence de la rugosité, de l'occupation des sols et de la topographie).

3.2.5.1 Données météorologiques utilisées

Les données météorologiques utilisées sont des mesures horaires (1 mesure toutes les heures) sur la période du 01/01/2021 au 31/12/2023, fournies par EODD. Elles proviennent de la station d'Orly, située à environ 3,2 km au sud du projet et représentative des conditions météorologiques locales.

La Figure 8 présente la rose des vents générale établie à partir des données fournies.

Figure 8 : Rose des vents sur la période 2021 à 2023



La rose des vents montre deux directions privilégiées avec des vents de secteur sud-ouest et nord-est principalement.

3.2.5.2 Conditions météorologiques retenues

Les conditions météorologiques utilisées dans la modélisation pour les différents scénarios sont les suivantes :

- **Scénario 1** (fonctionnement des groupes électrogènes en continu pendant 1h) : une condition moyenne établie sur l'analyse de l'ensemble des données météorologiques utilisées a été retenue. Cette condition est considérée constante au cours de la simulation (1h de fonctionnement) ;
- **Scénario 2** (fonctionnement des groupes électrogènes en continu pendant 24h) : les données météorologiques de la journée considérée comme étant la plus pénalisante ont été utilisées. En première approche, il s'agit de la journée entraînant les concentrations moyennes journalières les plus importantes sur la base des résultats des modélisations réalisées par SUEZ Aria Technologies (modélisations gaussiennes). A noter que les conditions météorologiques varient donc toutes les heures au cours de la simulation ;
- **Scénario 3** (fonctionnement des groupes électrogènes en continu pendant une semaine) : les données de la semaine incluant la journée la plus pénalisante (cf. scénario 2) ont été utilisées. A noter que les conditions météorologiques varient toutes les heures au cours de la simulation sur une durée de 7 jours.

Les données météorologiques utilisées sont présentées en Annexe 2.

3.3 RESULTATS : CONCENTRATIONS DANS L'AIR MODELISEES

3.3.1 Valeurs de référence pour la qualité de l'air

Dans le cadre de cette étude, les concentrations dans l'air modélisées sont exprimées en moyenne horaire, journalière ou hebdomadaire selon les différents scénarios étudiés. Les concentrations modélisées seront comparées aux valeurs réglementaires françaises de qualité de l'air⁵ (quand elles existent) et/ou aux valeurs de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui a mis à jour en septembre 2021 ses valeurs guides comme lignes directrices pour la qualité de l'air.

Le Tableau 4 rappelle les valeurs de référence disponibles sur une base horaire ou sur une base journalière. A noter qu'il n'existe aucune valeur de référence pour l'ammoniac (NH₃), le formaldéhyde et les HAP⁶. Il n'existe aucune valeur établie sur une base hebdomadaire pour les substances prises en compte dans cette étude.

Tableau 4 : Critères de référence pour la qualité de l'air

Substance	Valeurs en moyenne horaire		Valeurs en moyenne journalière	
	Valeur limite française	Valeur guide OMS	Valeur limite française	Valeur guide OMS
NO ₂	200 µg/m ³ ⁽¹⁾	200 µg/m ³	-	25 µg/m ³
PM ₁₀	-	-	50 µg/m ³ ⁽²⁾	45 µg/m ³
PM _{2.5}	-	-	-	15 µg/m ³
SO ₂	350 µg/m ³ ⁽³⁾	-	125 µg/m ³ ⁽⁴⁾	40 µg/m ³
CO	-	35 000 µg/m ³	10 000 µg/m ³ ⁽⁵⁾	4 000 µg/m ³

⁽¹⁾ Valeur à ne pas dépasser plus de 18 heures par an

⁽²⁾ Valeur à ne pas dépasser plus de 35 jours par an

⁽³⁾ Valeur à ne pas dépasser plus de 24 heures par an

⁽⁴⁾ Valeur à ne pas dépasser plus de 3 jours par an

⁽⁵⁾ Maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures

Les VG de l'OMS en moyenne journalière correspondent à des valeurs à ne pas dépasser plus de 3 à 4 jours par an.

3.3.2 Présentation des résultats

Les résultats sont exprimés en concentration en moyenne horaire (scénario 1), journalière (scénario 2) ou hebdomadaire (scénario 3). L'unité retenue pour exprimer les concentrations de polluant dans l'air est le µg/m³.

Les résultats sont présentés sous forme de cartes, de tableaux et/ou de graphiques, notamment au niveau :

- de points d'intérêt se trouvant dans l'axe du panache (parmi les points cibles correspondant à des habitations et/ou des ERP⁷ identifiés par EODD et présentés sur la Figure 9) ;

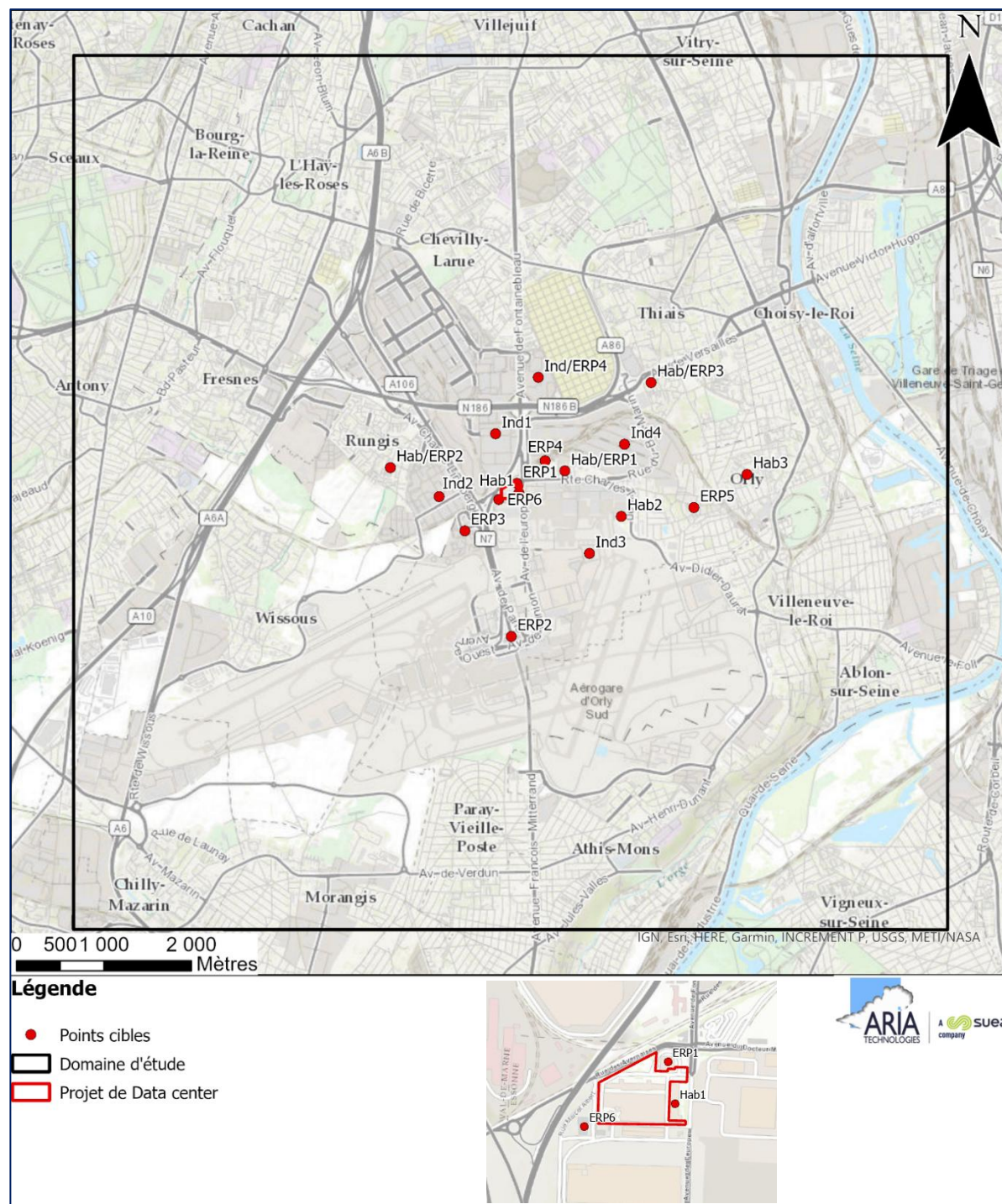
⁵ Valeurs réglementaires françaises du Code de l'environnement (Livre II : Milieux Physiques, Titre II : Air et Atmosphère, relatif à la surveillance de la qualité de l'air et de ses effets sur la santé et sur l'environnement, aux objectifs de qualité de l'air, aux seuils d'alerte et aux valeurs limites).

⁶ Pour les HAP, seule une valeur cible en moyenne annuelle pour le benzo(a)pyrène existe, égale à 1 ng/m³

⁷ Etablissement Recevant du Public

- du point géographique le plus exposé en moyenne sur la durée des rejets (lorsque pertinent).

Figure 9 : Localisation des points cibles identifiés par EODD

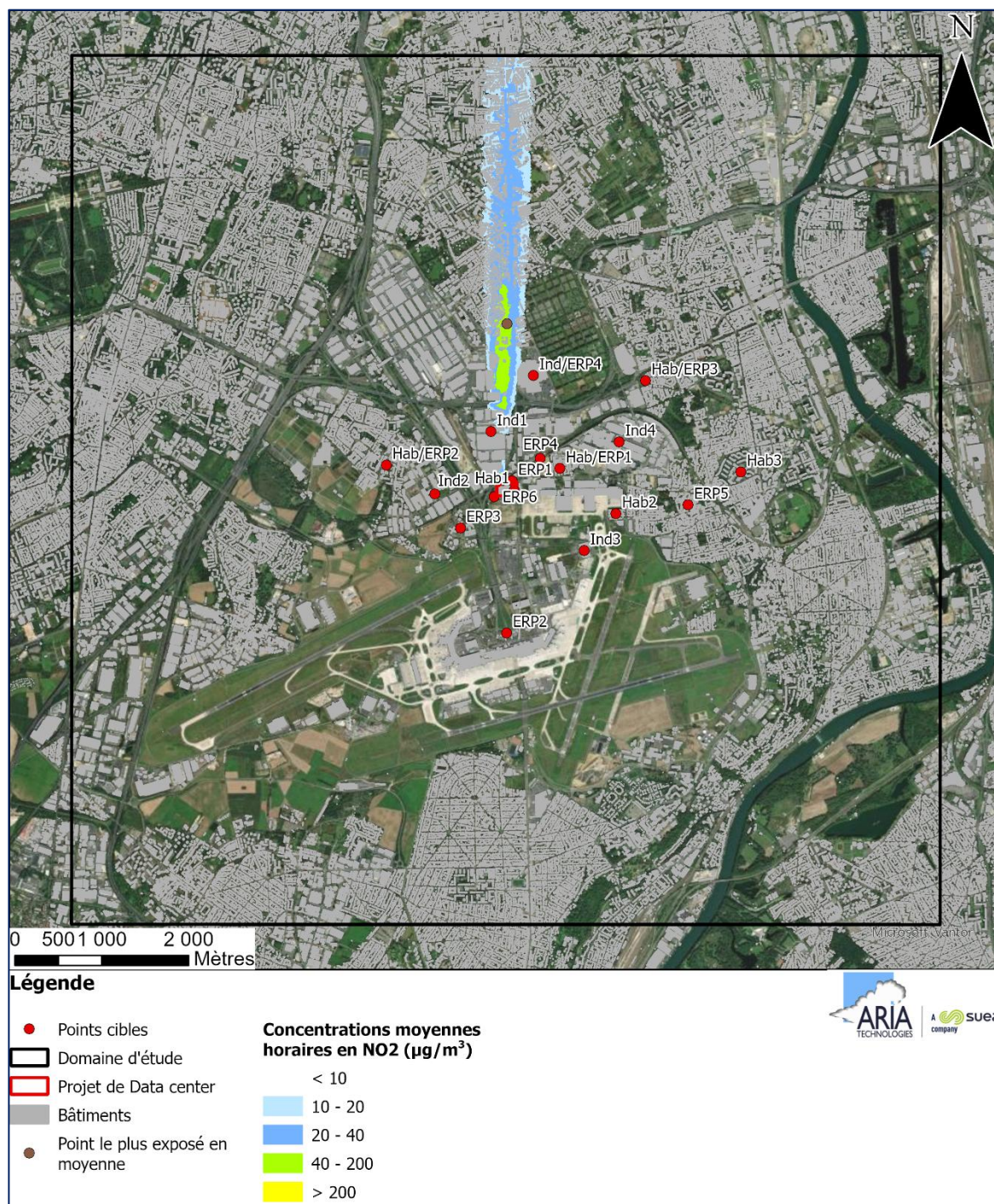


3.3.3 Scénario 1 : fonctionnement des groupes électrogènes pendant 1h

Les concentrations des polluants étudiés (NO_x assimilés au NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, SO_2 , CO , NH_3 , formaldéhyde et HAP) dans l'environnement, induites par les rejets du projet du data center ont été calculées en cas de fonctionnement des groupes électrogènes pendant 1h. Les simulations ont été réalisées avec une condition météorologique moyenne (cf. paragraphe 3.2.5.2), avec des vents en provenance du sud.

La Figure 10 présente la carte de concentrations en moyenne horaire calculées au niveau du sol sur le domaine d'étude pour le NO₂. Les cartes de dispersion pour les autres composés sont présentées en Annexe 3. 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 NO₂ comprises entre 10 et 20 µg/m³.

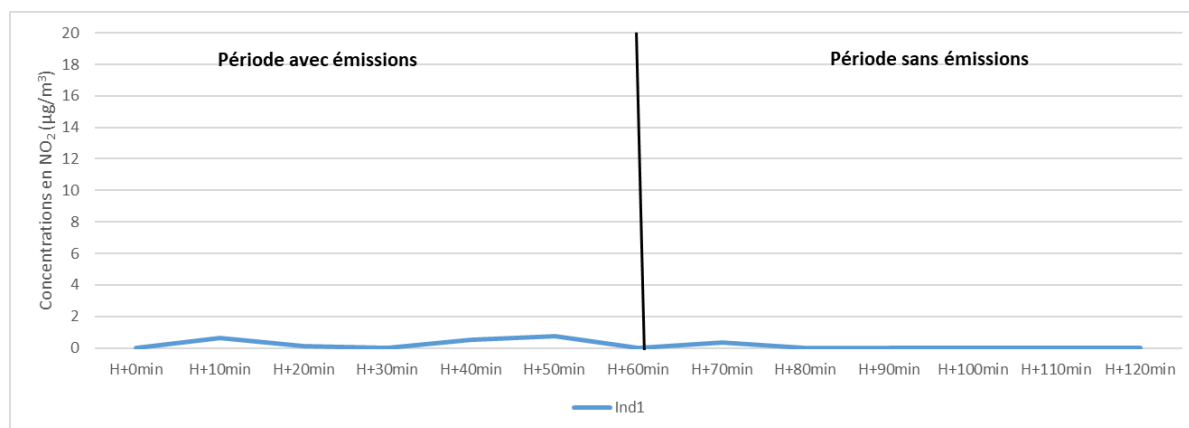
Figure 10 : Carte de concentrations en moyenne horaire en NO₂



Cette figure montre que, dans les conditions météorologiques prises en compte pour ce scénario, le panache est dirigé vers le nord. Le point cible situé dans la direction du panache est principalement « Ind1 ».

La Figure 11 présente l'évolution des concentrations moyennes pour le NO₂ toutes les 10 minutes au niveau du point d'intérêt sélectionné.

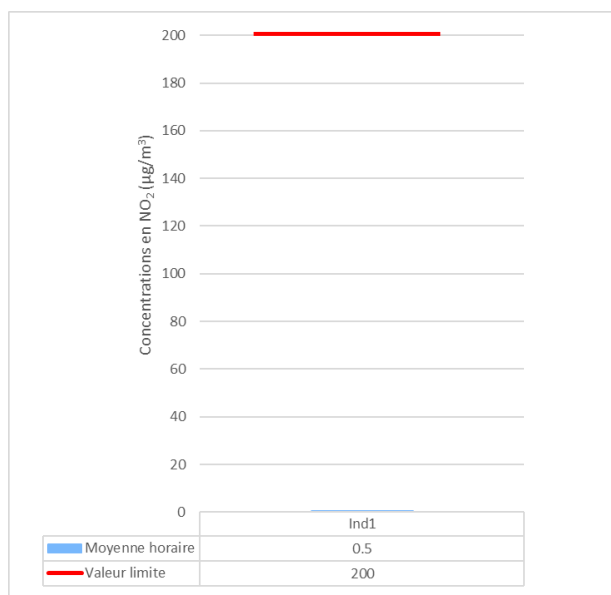
Figure 11 : Evolution des concentrations en NO₂ toutes les 10 minutes



Les concentrations en NO₂ retrouvées au niveau du point d'intérêt « Ind1 » sont globalement faibles lors de la période avec émissions avec un maximum de 0,7 µg/m³ atteint au bout de 50 minutes au niveau du point d'intérêt « Ind1 ». Elles retrouvent leur niveau initial 20 minutes après la fin de la période d'émissions du fait de l'écoulement du panache vers le nord. Pour les autres composés étudiés, l'allure de l'évolution des concentrations est globalement identique.

La Figure 12 présente les concentrations moyennes en NO₂ sur la période d'émissions (1h) au niveau des points d'intérêt sélectionnés.

Figure 12 : Concentrations moyennes horaires en NO₂



Pour le NO₂, la valeur limite en moyenne horaire (200 µg/m³), qui est équivalente à la valeur guide de l'OMS, est largement respectée au niveau du point d'intérêt définis par EODD le plus exposé (« Ind1 »).

La valeur limite est respectée au niveau du point le plus exposé en moyenne sur la durée des rejets (pour lequel la concentration moyenne sur la période d'émissions est égale à 77,3 µg/m³).

Le Tableau 5 présente les concentrations moyennes horaires sur la période d'émissions (soit 1 h) pour l'ensemble des composés considérés (au niveau du point cible sélectionné et du point géographique le plus exposé du domaine d'étude) ainsi que les valeurs de référence correspondantes.

Tableau 5 : Concentrations modélisées pour le scénario 1 (moyennes horaires)

Substance	Concentrations moyennes horaires modélisées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Critères de référence en moyenne horaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Ind1	Point le plus exposé	Valeur limite française	Valeur guide OMS
NO₂	0,5	77,3	200	200
PM₁₀	0,06	7,7	-	-
PM_{2.5}	0,07	6,7	-	-
SO₂	0,1	16,5	350	-
NH₃	0,04	6,2	-	-
CO	0,05	7,2	-	35 000
Formaldéhyde	0,03	4,6	-	-
HAP	0,0001	0,027	-	-

Pour les composés qui en disposent (soit le NO₂, le SO₂ et le CO), les concentrations modélisées lors d'un fonctionnement pendant 1 h des groupes électrogènes du futur site, dans les conditions météorologiques considérées, sont inférieures aux critères de référence retenus au niveau des points cibles identifiés par EODD se situant sous le panache.

3.3.4 Scénario 2 : fonctionnement des groupes électrogènes pendant 24h

Les concentrations des polluants étudiés (NOx assimilés au NO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, CO, NH₃, formaldéhyde et HAP) dans l'environnement induites par les rejets du projet du data center ont été calculées en cas de fonctionnement des groupes électrogènes pendant 24 h. Les simulations ont été réalisées avec des conditions météorologiques de la journée considérée comme étant la plus pénalisante (cf. paragraphe 3.2.5.2).

La Figure 13 présente la carte de concentrations en moyenne journalière calculées au niveau du sol sur le domaine d'étude pour le NO₂. Un zoom au niveau du point le plus exposé du domaine d'étude est présenté sur la Figure 14. Les cartes de dispersion pour les autres composés sont présentées en Annexe 3.

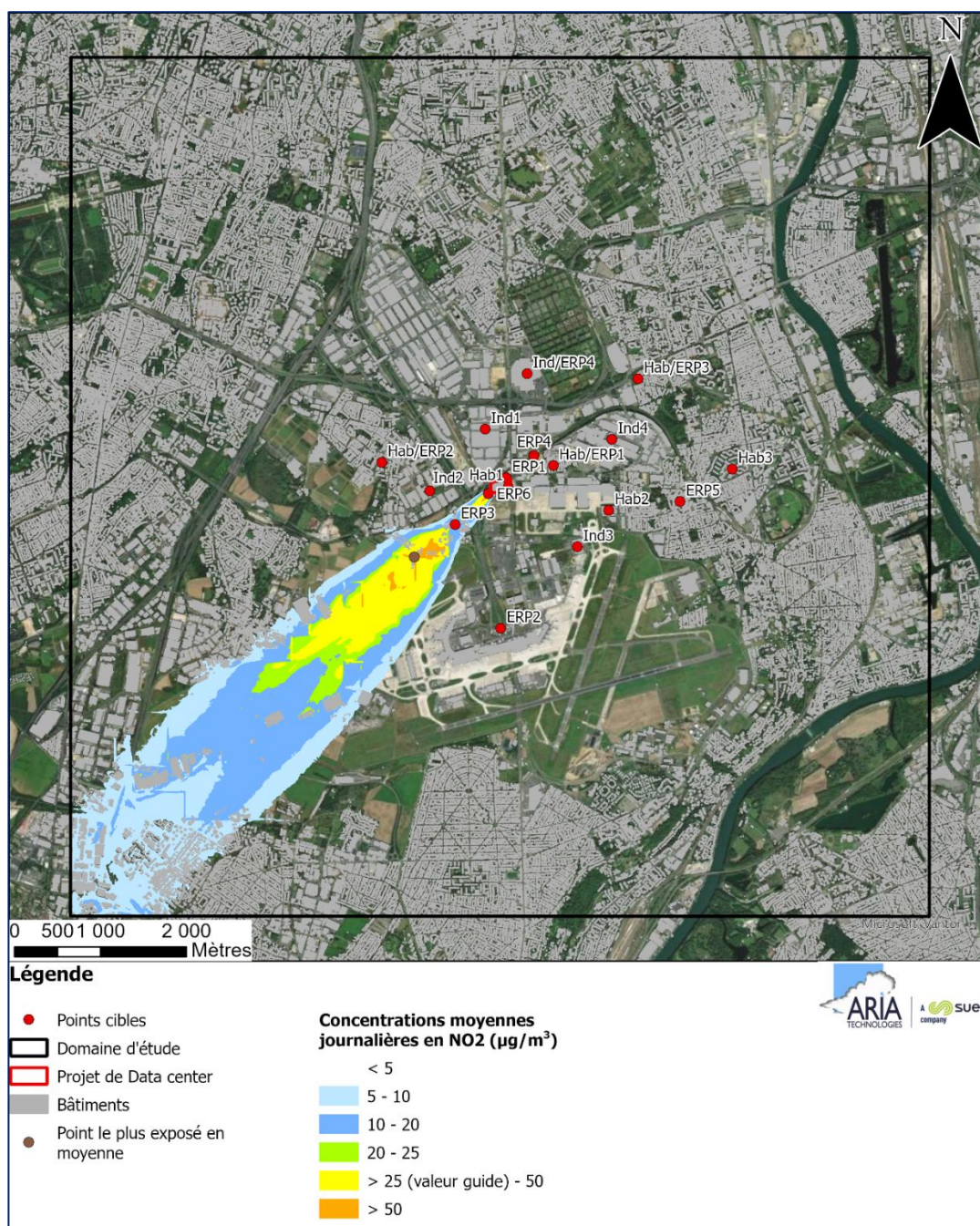
Figure 13 : Carte de concentration en moyenne journalière en NO_2 

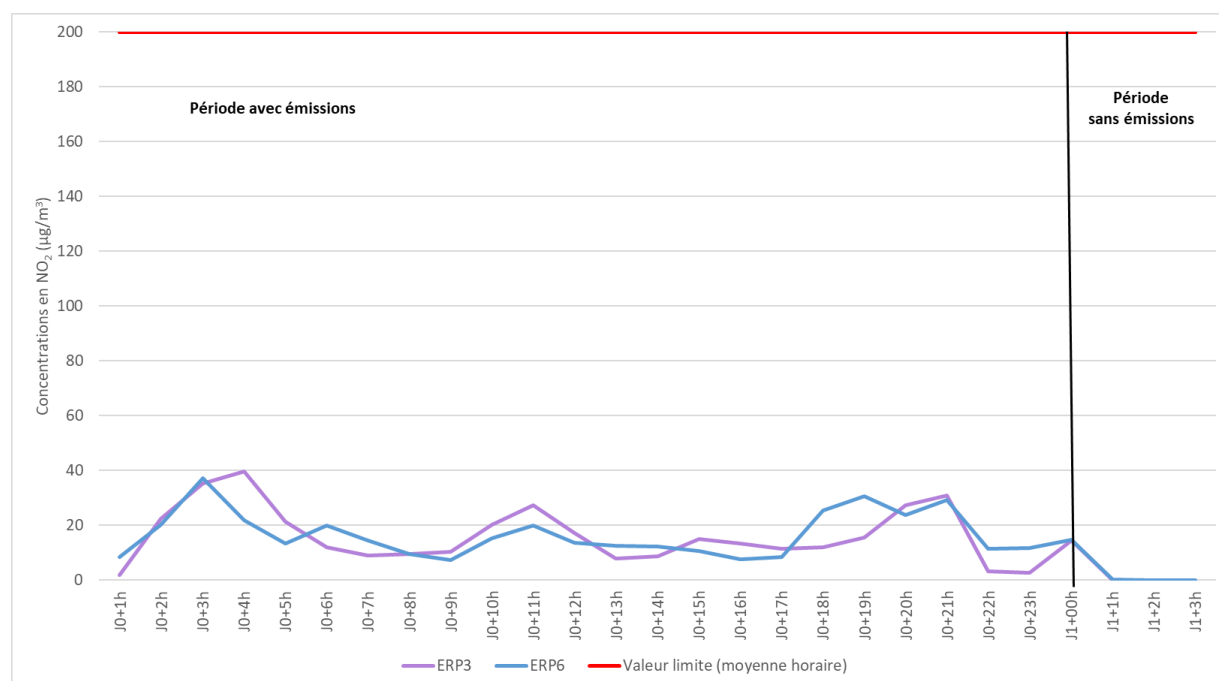
Figure 14 : localisation du point le plus exposé - scénario journalier



Ces figures montrent que, dans les conditions météorologiques prises en compte pour ce scénario, le panache est dirigé vers le sud-ouest du site. Les principaux points cibles situés dans la direction du panache sont « ERP6 » et « ERP3 ». Des dépassements de la valeur guide de l'OMS du NO₂ (25 µg/m³) sont observés dans l'axe d'écoulement du panache. Le point le plus exposé est situé au niveau d'une zone non habitée, dans un champ, à environ 1,2 km des limites du site et à proximité d'une zone de bureaux dans laquelle les travailleurs ne seront pas présents en permanence. La durée d'exposition peut être estimée⁸ à environ 2 000 h/an au niveau du lieu de travail, le reste du temps (6 760 h/an) étant passé au domicile, soit une fréquence d'exposition de 23 % au niveau du lieu d'exposition.

La Figure 15 présente l'évolution des concentrations moyennes en NO₂ toutes les heures au niveau des principaux points d'intérêt sélectionnés au cours de la période étudiée et dans les conditions météorologiques considérées.

Figure 15 : Evolution des concentrations moyennes en NO₂ sur une heure



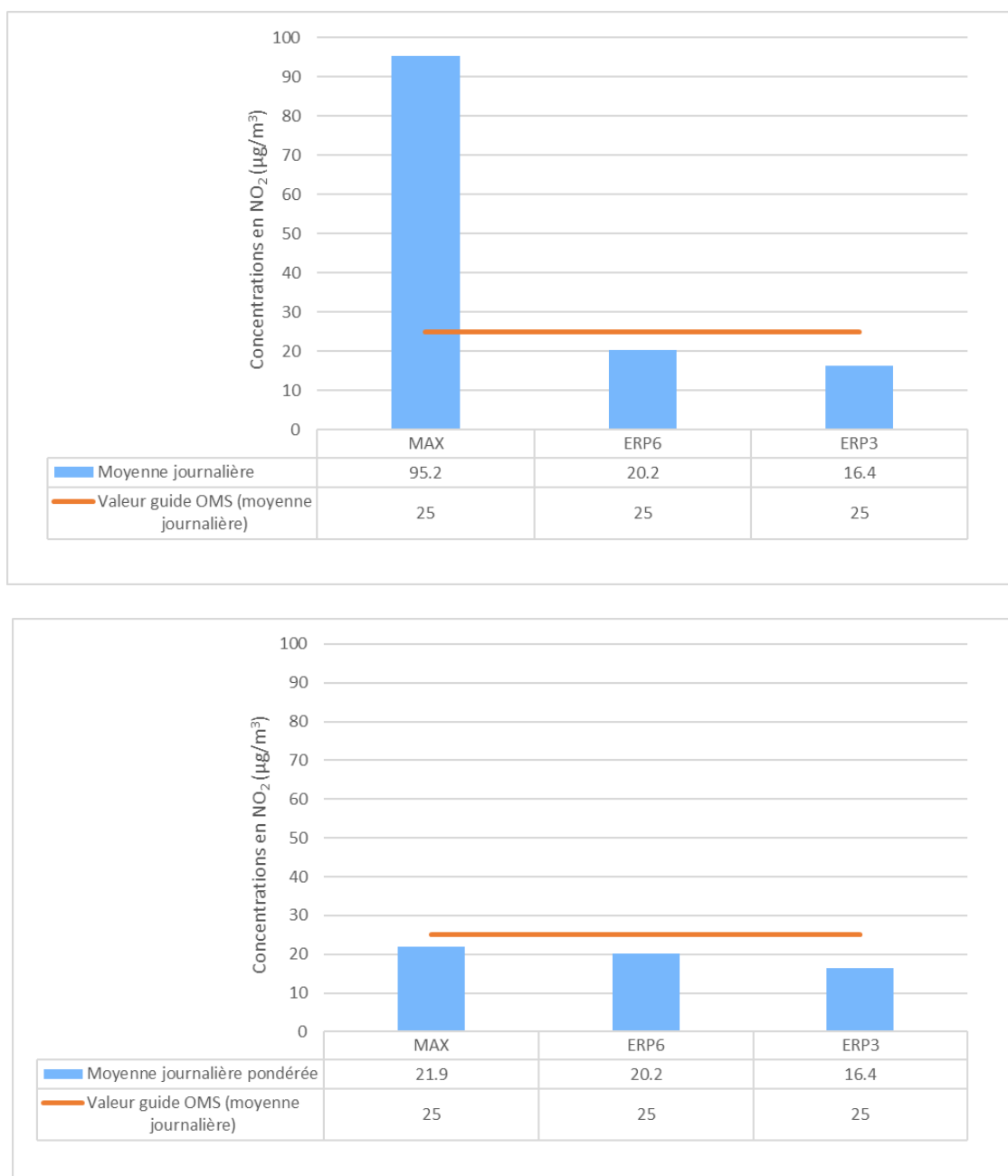
Les concentrations en NO₂ retrouvées au niveau des points d'intérêt pendant la période d'émissions varient au cours de la journée en raison de la direction des vents qui évolue. Parmi ces points d'intérêt, la concentration moyenne horaire maximale, de 39,6 µg/m³, est obtenue 4h après le début des émissions au niveau du point d'intérêt « ERP3 ». Les concentrations retrouvent leur niveau initial moins de 1h après la fin de la période d'émissions.

Les concentrations modélisées pour le NO₂ toutes les heures peuvent être comparées à la valeur limite de 200 µg/m³, exprimée en moyenne horaire. Comme le montre ce graphique, l'ensemble des valeurs modélisées en NO₂ au niveau des différents points d'intérêt sont inférieures à cette valeur. Pour le SO₂, la concentration moyenne horaire maximale de 9,3 µg/m³ est inférieure à la valeur de référence (350 µg/m³). Pour le CO, la concentration moyenne horaire maximale de 3,7 µg/m³ est inférieure à la valeur de référence (35 000 µg/m³).

⁸ Selon une approche majorante en considérant une durée du travail de 8 h/jour et 220 jours/an (exposition de 5 jours sur 7, pendant 44 semaines incluant jours fériés et RTT).

La Figure 16 présente les concentrations moyennes en NO₂ sur la période d'émissions (24h) au niveau des points d'intérêt sélectionnés durant la journée (figure du haut : concentrations modélisées et du bas : concentrations pondérées par la fréquence d'exposition).

Figure 16 : Concentrations moyennes journalières en NO₂



L'analyse de ce graphique montre que, pour le NO₂, la valeur guide de l'OMS en moyenne journalière (25 µg/m³) est respectée au niveau de l'ensemble des points d'intérêt définis par EODD les plus exposés au cours de la période étudiée et dans les conditions météorologiques considérées, notamment au niveau de la zone de bureaux à proximité du point le plus exposé en considérant une concentration prenant en compte le temps passé par les occupants de ce lieu.

Le Tableau 6 présente les concentrations moyennes journalières sur la période d'émissions (soit 24h) pour tous les composés considérés (au niveau des deux points cibles sélectionnés et du point géographique le plus exposé du domaine d'étude) ainsi que les valeurs de référence correspondantes.

Tableau 6 : Concentrations modélisées pour le scénario 2 (moyennes journalières)

Substance	Concentrations moyennes journalières modélisées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Critères de référence en moyenne journalière ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	ERP6	ERP3	Point le plus exposé	Valeur limite française	Valeur guide OMS
NO₂	20,2	16,4	95,2 / 21,9*	-	25
PM₁₀	2,3	1,8	9,5	50	45
PM_{2,5}	2,1	1,7	9,1	-	15
SO₂	4,8	3,9	20,8	125	40
NH₃	1,6	1,3	7,6	-	-
CO	1,9	1,5	8,9	10 000	4 000
Formaldéhyde	1,2	1,0	5,7	-	-
HAP	0,008	0,006	0,04	-	-

* Concentration pondérée par la fréquence d'exposition (23%)

Les concentrations modélisées en NO₂, NH₃, SO₂, PM₁₀ et PM_{2,5}, lors d'un fonctionnement pendant 24h des groupes électrogènes du futur site, dans les conditions météorologiques considérées, sont inférieures aux critères de référence retenus au niveau des points cibles identifiés par EODD se situant sous le panache. Des dépassements de la valeur guide de l'OMS du NO₂ peuvent être observés dans l'axe d'écoulement du panache. En revanche, les concentrations réelles d'exposition en NO₂ (21,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) prenant en compte le temps passé par les occupants potentiels proche du point max correspondant à des zones de bureaux (soit une exposition professionnelle estimée à 23 % du temps) sont conformes à la valeur guide de l'OMS (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A noter que la valeur de l'OMS ne constitue pas une valeur réglementaire française mais un indicateur sanitaire.

A noter que les NOx sont assimilés à 100 % à du NO₂, correspondant à une hypothèse majorante.

3.3.5 Scénario 3 : fonctionnement des groupes électrogènes pendant 1 semaine

Les concentrations des polluants étudiés (NOx assimilés au NO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, CO, NH₃, formaldéhyde et HAP) dans l'environnement induites par les rejets du projet du data center ont été calculées en cas de fonctionnement des groupes électrogènes pendant 1 semaine. Les simulations ont été réalisées avec des conditions météorologiques incluant la journée considérée comme étant la plus pénalisante (cf. paragraphe 3.2.5.2).

La Figure 17 présente la carte de concentrations en moyenne hebdomadaire calculées au niveau du sol sur le domaine d'étude pour le NO₂. Un zoom au niveau du point le plus exposé du domaine d'étude est présenté sur la Figure 18. Les cartes de dispersion pour les autres composés sont présentées en Annexe 3.

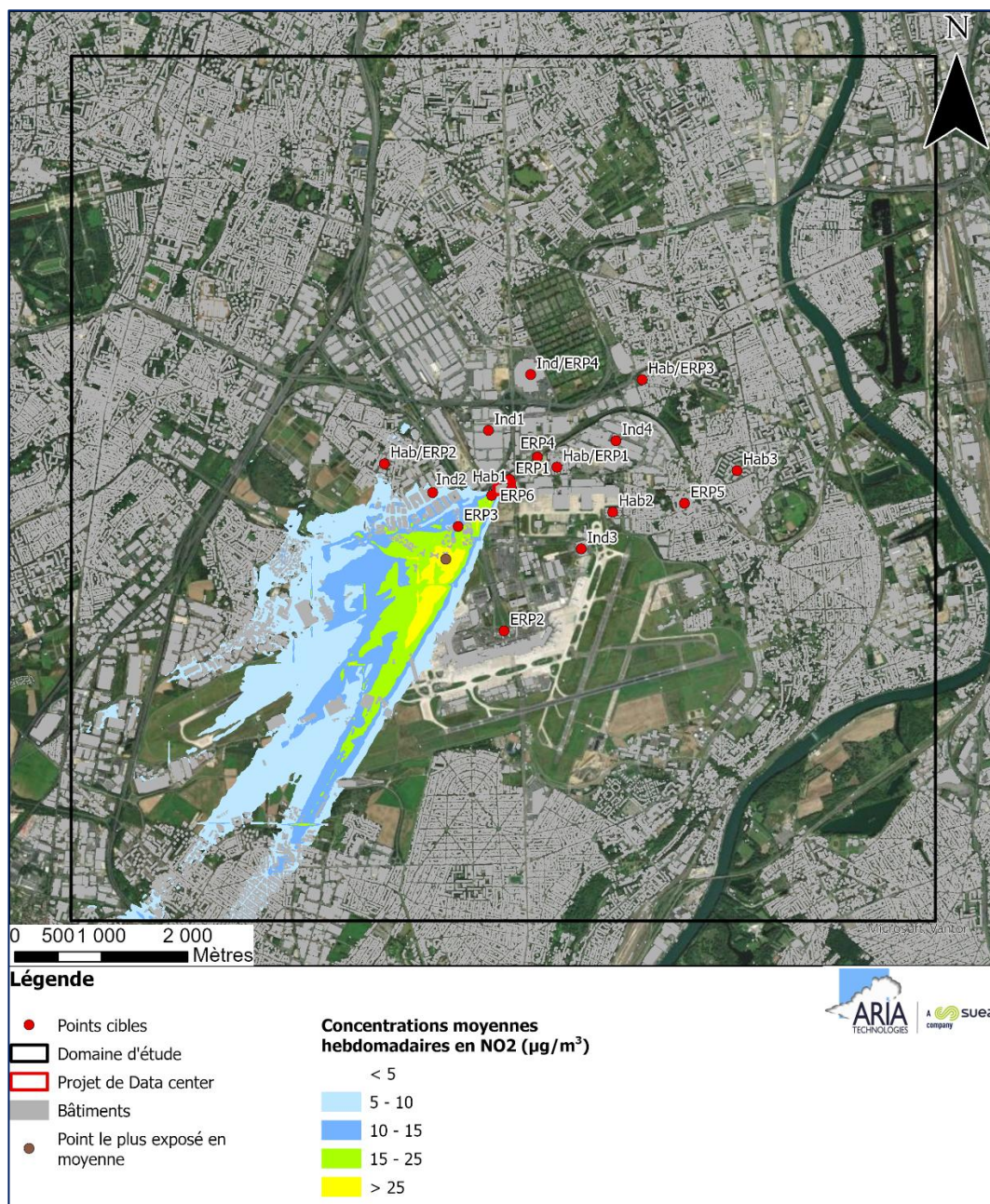
Figure 17 : Carte de concentration en moyenne hebdomadaire en NO₂

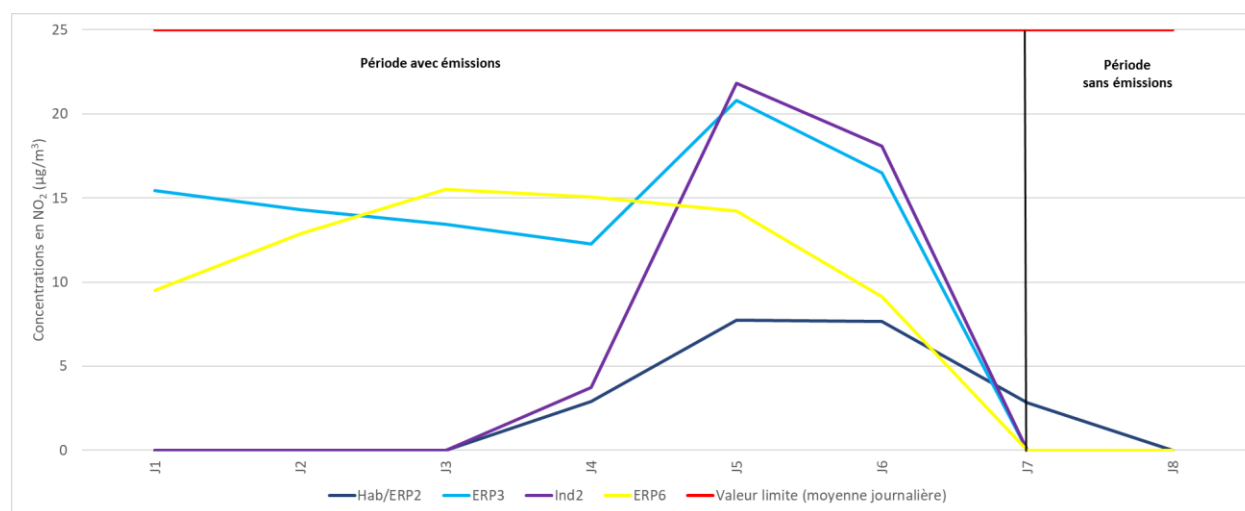
Figure 18 : localisation du point le plus exposé - scénario hebdomadaire



Ces figures montrent que, dans les conditions météorologiques prises en compte pour ce scénario, le panache est dirigé vers le sud-ouest du site. Les principaux points cibles exposés sont : « ERP3 », « ERP6 », « Ind2 » et « Hab/ERP2 ». Le point le plus exposé est situé au niveau d'une zone non habitée, dans un champ, à environ 30 mètres d'une zone de bureaux.

La Figure 19 présente l'évolution des concentrations moyennes journalières en NO₂ au niveau des principaux points d'intérêt sélectionnés au cours de la période étudiée et dans les conditions météorologiques considérées.

Figure 19 : Evolution des concentrations moyennes journalières en NO₂



Les concentrations en NO₂ retrouvées au niveau des points d'intérêt pendant la période d'émissions varient au cours de la semaine en raison de la direction des vents qui évolue. Parmi ces points d'intérêt, la concentration moyenne journalière maximale, de 21,8 µg/m³, est obtenue le 5^{ème} jour au niveau du point d'intérêt « Ind2 ». Les concentrations retrouvent leur niveau initial dans la journée suivant la fin de la période d'émissions.

Les concentrations modélisées pour le NO₂ tous les jours peuvent être comparées à la valeur limite de 25 µg/m³, exprimée en moyenne journalière. Les valeurs modélisées en NO₂ au niveau des points d'intérêt sont inférieures à cette valeur. Pour les autres composés, les concentrations moyennes journalières (pour chaque échéance) sont également inférieures aux valeurs de référence. En particulier :

- Pour le SO₂, une concentration maximale de 4,8 µg/m³ au niveau du point cible « Ind2 » (pour une valeur guide de l'OMS de 40 µg/m³ et une valeur limite de 125 µg/m³) ;
- Pour les PM_{2,5}, une concentration maximale de 2,1 µg/m³ au niveau du point cible « Ind2 » (pour une valeur guide de l'OMS de 15 µg/m³) ;
- Pour les PM₁₀, une concentration maximale de 2,2 µg/m³ au niveau du point cible « Ind2 » (pour une valeur guide de l'OMS de 45 µg/m³ et une valeur limite de 50 µg/m³) ;
- Pour le CO, une concentration maximale de 2 µg/m³ au niveau du point cible « Ind2 » (pour une valeur guide de l'OMS de 4 000 µg/m³ et une valeur limite de 10 000 µg/m³).

Le Tableau 7 présente les concentrations moyennes hebdomadaires sur la période d'émissions pour les composés considérés (au niveau des 4 points cibles les plus exposés et du point géographique le plus exposé du domaine d'étude). Pour rappel, il n'existe aucune valeur réglementaire française ni aucune valeur guide de l'OMS en moyenne hebdomadaire.

Tableau 7 : Concentrations modélisées pour le scénario 3 (moyennes hebdomadaires)

Substance	Concentrations moyennes hebdomadaires modélisées ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					Critères de référence en moyenne hebdomadaire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	ERP3	ERP6	Ind2	Hab/ERP2	Point le plus exposé	Valeur limite française	Valeur guide OMS
NO₂	12,4	9,8	5,5	2,6	65,5	-	-
PM₁₀	1,4	1,1	0,6	0,3	6,6	-	-
PM_{2.5}	1,3	1,0	0,5	0,3	6,2	-	-
SO₂	2,8	2,3	1,2	0,6	14,2	-	-
NH₃	1,0	0,8	0,4	0,2	5,2	-	-
CO	1,2	0,9	0,5	0,2	6,1	-	-
Formaldéhyde	0,7	0,6	0,3	0,2	3,9	-	-
HAP	0,005	0,004	0,002	0,001	0,03	-	-

4 INCERTITUDES

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 :

$$\boxed{\text{Incertitudes totales}} = \boxed{\text{Incertitudes dues au modèle}} + \boxed{\text{Incertitudes due aux données}} + \boxed{\text{Variabilité}}$$

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 :

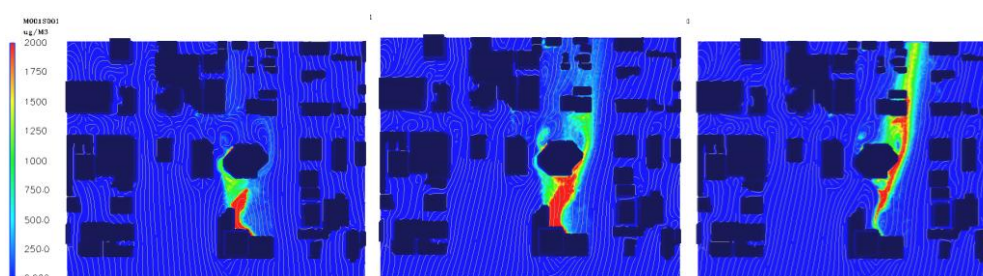
- La variabilité des résultats due aux fluctuations naturelles de la concentration dans l'atmosphère (turbulence aléatoire). Ce type d'incertitude sera présent dans n'importe quel modèle prenant en compte des phénomènes météorologiques ;
- Les erreurs sur les données d'entrées : émissions, données sur 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.

4.1 INCERTITUDES LIEES AU MODELE : VALIDATION DU MODELE MSS

Concernant MSS, des validations ont été réalisées à l'aide de campagnes de mesures effectuées en soufflerie et en milieu urbain réel. Certains de ces cas de validation sont présentés ci-dessous :

- le projet EMU est une simulation de l'émission de scalaires passifs en atmosphère neutre, réalisée au laboratoire EnFlo de l'Université anglaise de Surrey. Il est constitué de plusieurs expériences (formes et nombre de bâtiments divers, données météorologiques et d'émission distinctes) ;
- URBAN 2000 fut une campagne de mesures menée par des chercheurs américains à Salt Lake City en Octobre 2000. Le Département de l'Energie (US-DOE), le DOD, la DTRA, et des laboratoires gouvernementaux anglais et américains se sont réunis afin de mener à bien ce gigantesque projet. L'ensemble des données et des résultats est accessible sur <http://urban.llnl.gov/> ;
- la campagne MUST a également été financée par la DTRA. Elle constitue une expérience intermédiaire entre la soufflerie et un terrain urbain réel puisque les bâtiments ont été simulés par des containers.

Figure 20 : Lignes de courant et concentration en SF6 à 4h10, 4h20 et 4h30



MSS a obtenu de bonnes performances dans le cadre de plusieurs campagnes de mesures in situ, ce qui est un gage de qualité.

4.2 INCERTITUDES LIEES AUX DONNEES D'ENTREE

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

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

4.2.1 Incertitudes liées aux émissions

La concentration calculée par le modèle à une échéance donnée est directement proportionnelle aux flux émis par l'installation. Les émissions par groupe électrogène pour les composés étudiés ont été fournies par EODD.

4.2.2 Incertitudes liées aux mesures météorologiques

Les données météorologiques ont été fournies par EODD. Concernant la nébulosité, les données de nébulosité sont exprimées en « octas ». Elles sont issues d'une observation « manuelle » d'un opérateur et complétée par des simulations numériques. En l'absence de données (36 % des cas pour le scénario 3), le modèle compense ces données invalides en basculant sur une méthode simplifiée dite « vent/jour/nuit » où la classe de stabilité est répartie entre les classes légèrement instable à stable en fonction de la vitesse du vent et du jour ou de la nuit.

L'incertitude la plus grande 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 ». Cette incertitude est compensée dans le modèle par l'ajout à chaque échéance météorologique d'une direction additionnelle aléatoire comprise entre -5° et +5° afin de mieux simuler les directions réelles.

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

Concernant le scénario 2 (et le 3), les données météorologiques de la journée considérée comme étant la plus pénalisante ont été utilisées. En première approche, il s'agit de la journée entraînant les concentrations moyennes journalières les plus importantes sur la base des résultats des premières modélisations réalisées par EODD (modélisations gaussiennes en 2D).

4.2.3 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 de l'utilisateur des paramètres du modèle, (options de calculs, génération du maillage, etc.) peut être grande. Les paramètres d'émission (caractéristiques physiques des cheminées) ont été fournis par EODD et sont jugés représentatifs de la situation envisagée.

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

5 SYNTHÈSE

Afin d'évaluer l'impact sur la qualité de l'air de l'utilisation des groupes électrogènes de secours du projet de data center à Paray-Vieille-Poste (91), EODD a mandaté SUEZ Aria Technologies pour réaliser une étude, incluant des modélisations de la dispersion de leurs émissions atmosphériques.

Compte tenu du contexte urbain, les concentrations dans l'air en NO_x (assimilés en totalité à du NO₂, hypothèse majorante), SO₂, NH₃, CO, formaldéhyde, PM₁₀ et PM_{2,5} imputables aux rejets canalisés des groupes électrogènes du projet de data center ont été effectuées à l'aide du logiciel AirAdvanced Map Expert®, modèle 3D permettant de prendre notamment en compte les bâtiments comme obstacles à la dispersion.

Trois scénarios ont été pris en compte dans cette étude : un fonctionnement pendant 1h, pendant 24h et pendant une semaine. Les deux derniers scénarios sont très peu probables dans la mesure où ils n'ont vocation à se produire qu'en cas d'une panne généralisée sur l'ensemble des lignes électriques d'une durée d'une journée/d'une semaine.

Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Scénario 1 : Les simulations ont été réalisées avec une condition météorologique moyenne (sur la base des données transmises par EODD sur 3 ans consécutifs). Pour les substances disposant de valeurs de référence (NO₂, SO₂ et CO), les concentrations modélisées, exprimées en moyenne horaire, sont inférieures aux critères de référence retenus au niveau des points cibles identifiés par EODD se situant sous le panache et du point le plus exposé du domaine d'étude.
- Scénario 2 : Les simulations ont été réalisées en prenant en compte les données météorologiques de la journée considérée comme étant la plus pénalisante. Pour l'ensemble des substances étudiées, les concentrations modélisées, exprimées en moyenne journalière, sont inférieures aux critères de référence au niveau des points cibles identifiés par EODD se situant sous le panache. La valeur guide de l'OMS est respectée au niveau de la zone d'impact maximal (à proximité de bureaux) en considérant une concentration d'exposition prenant en compte le temps passé par les occupants de ce lieu (soit une fréquence de 23 %).
- Scénario 3 : Les simulations ont été réalisées avec les données de la semaine incluant la journée considérée comme étant la plus pénalisante. Il n'existe pas de valeur réglementaire française et ni de valeur guide de l'OMS en moyenne hebdomadaire. Pour l'ensemble des composés, les concentrations moyennes journalières (pour chaque échéance) au niveau des points d'intérêt sont inférieures aux valeurs de référence.

En retenant des hypothèses majorantes et dans les conditions météorologiques considérées, l'incidence des émissions atmosphériques des groupes électrogènes du futur data center sur la qualité de l'air peut être considérée comme faible pour les composés étudiés pour les différents scénarios étudiés (fonctionnement en continu sur 1h, 24h et une semaine).

ANNEXES

Annexe 1 : 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 éparses, 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 :

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

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

$$T_{L_{u'_x}}, T_{L_{u'_y}}, T_{L_{u'_z}}$$

dans le cas des schémas de Thomson 1984 ou bien :

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

$$T_{L_{u'_x}}, T_{L_{u'_y}}, T_{L_{u'_z}}$$

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 coordonnée 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_o , 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. Reidel 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.

Annexe 2 : Données météorologiques

Scénario 1 :

Condition météorologique	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (degrés)	Température (°C)	Pluie (mm)	Classe de Pasquill
Moyenne	3,7	181	13	0,07	4

Scénario 2 : journée J4Scénario 3 : entre J1 et J7

Jour	Heure	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (degrés)	Température (°C)	Nébulosité (octas)	Précipitation (mm)
J1	00:00	0,7	40	7,1	8	0
J1	01:00	0	0	7,3	8	0
J1	02:00	0	0	6,9	8	0
J1	03:00	1,3	360	6,8	8	0
J1	04:00	0,7	20	7,4	8	0
J1	05:00	0,8	30	7,5	8	0
J1	06:00	1,4	360	7,7	8	0
J1	07:00	1,3	80	8	8	0
J1	08:00	1,4	70	8	8	0
J1	09:00	2,6	30	8,5	8	0
J1	10:00	3,3	50	9,1	8	0
J1	11:00	3,3	50	9,7	8	0
J1	12:00	3,3	60	10,3	8	0
J1	13:00	3,5	40	10,4	8	0
J1	14:00	3,8	60	10,5	8	0
J1	15:00	4,7	60	10,4	8	0
J1	16:00	3,7	60	10	7	0
J1	17:00	4	50	9,7	7	0
J1	18:00	3,5	50	8,6	2	0
J1	19:00	3	40	7,8	0	0
J1	20:00	3,3	40	7,4	0	0
J1	21:00	3,2	30	6,5	0	0
J1	22:00	3,2	30	6,5	0	0
J1	23:00	2,9	30	6	0	0
J2	00:00	2,7	30	6,2	0	0
J2	01:00	2,9	30	5,6	0	0
J2	02:00	3,6	20	5,7	0	0
J2	03:00	3,7	20	5,5	0	0,2
J2	04:00	3,5	30	5,2	0	0
J2	05:00	3,6	30	5,9	3	0
J2	06:00	4,1	40	6,9	7	0
J2	07:00	4,7	50	7	7	0

Jour	Heure	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (degrés)	Température (°C)	Nébulosité (octas)	Précipitation (mm)
J2	08:00	4,9	50	7,4	7	0
J2	09:00	4,5	60	7,9	8	0
J2	10:00	3,7	70	8,1	8	0
J2	11:00	5,1	70	8,4	8	0
J2	12:00	5,1	70	8,5	8	0
J2	13:00	5,7	60	8,8	7	0
J2	14:00	4,8	50	9,3	7	0
J2	15:00	4,8	60	9	2	0
J2	16:00	5,5	40	8	1	0
J2	17:00	3,6	40	7,5	0	0
J2	18:00	3,7	40	6,8	0	0
J2	19:00	4,2	40	6,2	0	0
J2	20:00	3,7	40	6,2	0	0
J2	21:00	3,8	40	5,8	0	0
J2	22:00	2,8	30	5,3	0	0
J2	23:00	3,5	30	4,9	0	0
J3	00:00	3,8	20	4,6	0	0
J3	01:00	3,3	30	4	0	0
J3	02:00	3,7	40	3,9	0	0
J3	03:00	3,6	20	3,5	0	0
J3	04:00	4,4	30	3,3	0	0
J3	05:00	4,4	50	3,4	7	0
J3	06:00	3,5	50	4	7	0
J3	07:00	2,8	40	3,2	2	0
J3	08:00	3,7	30	3,4	1	0
J3	09:00	4	30	4,3	0	0
J3	10:00	4,5	40	5,5	0	0
J3	11:00	4,8	30	6,8	0	0
J3	12:00	4,7	40	8,2	0	0
J3	13:00	4,4	30	9	0	0
J3	14:00	5,5	30	9,4	0	0
J3	15:00	4,7	30	8,9	0	0
J3	16:00	4,5	30	7,6	0	0
J3	17:00	4,5	30	6,9	0	0
J3	18:00	3,8	30	6,5	0	0
J3	19:00	3,9	30	5,7	0	0
J3	20:00	5	30	5,2	7	0
J3	21:00	4,7	30	5,4	7	0
J3	22:00	4	30	5,6	7	0
J3	23:00	4,7	40	5,6	7	0
J4	00:00	4	30	5,4	7	0

Jour	Heure	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (degrés)	Température (°C)	Nébulosité (octas)	Précipitation (mm)
J4	01:00	3,8	40	5,2	8	0
J4	02:00	5,5	50	5,1	8	0
J4	03:00	5,5	50	4,9	8	0
J4	04:00	3,5	50	4,8	8	0
J4	05:00	4,8	50	4,6	8	0
J4	06:00	4,6	60	4,5	8	0
J4	07:00	4,1	50	4,4	8	0
J4	08:00	3,8	60	4,4	8	0
J4	09:00	3,8	40	4,4	8	0
J4	10:00	4,8	50	4,4	8	0
J4	11:00	4,3	50	4,3	8	0
J4	12:00	4	40	4,2	8	0
J4	13:00	4,1	40	4,2	8	0
J4	14:00	4,1	40	4,8	8	0
J4	15:00	3,8	50	5,1	8	0
J4	16:00	3,4	50	5,1	8	0
J4	17:00	4,1	40	5	8	0
J4	18:00	5,9	40	4,6	8	0
J4	19:00	4,5	40	4,5	8	0
J4	20:00	5,6	50	4,7	8	0
J4	21:00	4,3	40	4,7	8	0
J4	22:00	4,6	30	4,8	8	0
J4	23:00	4,3	40	4,9	8	0
J5	00:00	4,5	60	5	8	0
J5	01:00	4,7	60	5,1	8	0
J5	02:00	4,8	50	5,1	8	0
J5	03:00	4,4	60	5,3	8	0
J5	04:00	4,3	60	5,3	8	0
J5	05:00	5,4	50	5,2	8	0
J5	06:00	5,3	70	5	8	0
J5	07:00	4,4	80	4,8	8	0
J5	08:00	4,9	60	4,7	8	0
J5	09:00	5,7	80	4,8	8	0
J5	10:00	4,4	80	4,9	8	0
J5	11:00	5,3	70	5	8	0
J5	12:00	4,6	100	4,9	8	0
J5	13:00	3,7	100	5,1	8	0
J5	14:00	3,5	90	5,2	7	0
J5	15:00	3,6	80	4,9	5	0
J5	16:00	4,6	50	5,2	7	0
J5	17:00	4	60	5,4	7	0

Jour	Heure	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (degrés)	Température (°C)	Nébulosité (octas)	Précipitation (mm)
J5	18:00	3,9	70	5,4	8	0
J5	19:00	3,5	70	5,4	8	0
J5	20:00	3,8	80	5,2	8	0
J5	21:00	2,8	60	5	8	0
J5	22:00	3,6	60	4,8	8	0
J5	23:00	2,4	40	2,9	1	0
J6	00:00	2,3	30	3	0	0
J6	01:00	2,2	50	2,1	0	0
J6	02:00	0,7	360	1	0	0
J6	03:00	1,7	30	0,7	0	0
J6	04:00	1	50	0,5	0	0
J6	05:00	2,4	60	0,5	0	0
J6	06:00	3	70	0,3	0	0
J6	07:00	3,1	60	-0,6	0	0
J6	08:00	3,2	60	-0,7	0	0
J6	09:00	3	70	0,5	0	0
J6	10:00	3,3	70	1,7	0	0,2
J6	11:00	3	70	2,2	1	0
J6	12:00	3,1	60	3	0	0
J6	13:00	2,3	90	3,4	1	0
J6	14:00	2,4	90	3,7	1	0
J6	15:00	3,3	100	3,5	1	0
J6	16:00	2,1	60	2,3	2	0
J6	17:00	3,2	60	1,4	2	0
J6	18:00	1,9	90	1,1	2	0
J6	19:00	1,5	70	-0,1	1	0
J6	20:00	2	80	-0,5	2	0
J6	21:00	2,3	80	-0,9	2	0
J6	22:00	2,7	110	-1,5	6	0
J6	23:00	2,1	150	-1,9	7	0
J7	00:00	2	110	-1,7	7	0
J7	01:00	2,7	130	-1,5	7	0
J7	02:00	3	110	-1,4	7	0
J7	03:00	3,5	130	-1,2	7	0
J7	04:00	3,7	140	-1,3	7	0
J7	05:00	2,4	150	-1,7	7	0
J7	06:00	3,3	150	-1,7	8	0
J7	07:00	3,8	100	-1,9	8	0
J7	08:00	3,6	130	-1,6	8	0
J7	09:00	4,2	100	-1,4	8	0
J7	10:00	3,1	120	-1	8	0

Jour	Heure	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (degrés)	Température (°C)	Nébulosité (octas)	Précipitation (mm)
J7	11:00	3,2	130	-0,9	8	0
J7	12:00	2,6	150	-0,7	8	0
J7	13:00	2,6	180	-0,5	8	0
J7	14:00	2,4	140	-0,4	8	0
J7	15:00	3,3	120	-0,3	8	0
J7	16:00	3,3	130	-0,5	8	0
J7	17:00	3,5	140	-0,6	8	0
J7	18:00	3,4	190	-0,8	8	0
J7	19:00	3	170	-0,9	8	0
J7	20:00	1,9	130	-1,3	8	0
J7	21:00	2,1	170	-1,2	8	0
J7	22:00	2,8	180	-1,8	8	0
J7	23:00	3	170	-1,9	8	0

Annexe 3 : Cartes de dispersion

