

M Modélisation et Simulation de la Qualité de l'Air Aéroportuaire

 CERFACS

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

S

INERIS
maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Q

 CERFACS

A

Projet MOSIQAA
MOdélisation et **SI**mulation de la **Q**ualité de l'**A**ir
Aéroportuaire
Convention n°2016-07

LIVRABLE DU LOT 3

Etudes de sensibilité aux différentes sources d'émission et scénarios

| | Nom | Date | Visa |
|----------------------------|--------------------|------------|---|
| Approbation du responsable | Daniel CARIOLLE | 27/06/2019 | P/O Mélanie ROCHOUX  |

CERFACS

42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1, France

Tél : 33 (0) 561 19 31 31 – Fax : 33 (0) 561 19 30 30

secretar@cerfacs.fr – <https://www.cerfacs.fr>

Etudes de sensibilité avec le code Meso-NH et la méthode des frontières immergées

Adrien Marque, Mélanie Rochoux et Daniel Cariolle

Unité mixte de recherche CECI, CNRS/Cerfacs (Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique), Toulouse, France

Contact : Mélanie Rochoux (melanie.rochoux@cerfacs.fr)



PROJET MOSIQAA **Rapport d'activités du LOT 3** Juin 2019

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 4 |
| I. Cas d'étude et simulations MNH-IBM de référence..... | 6 |
| 1. Le cas d'étude CAEPport..... | 6 |
| 2. Le code de simulation atmosphérique MNH-IBM..... | 7 |
| 3. Les quantités d'intérêt..... | 7 |
| 4. Les différentes situations météorologiques étudiées..... | 9 |
| II. Études de sensibilité pour la situation météorologique stable..... | 11 |
| 1. Influence des APU..... | 11 |
| 2. Influence du flux de chaleur sensible..... | 15 |
| 3. Bilan sur la situation météorologique stable..... | 22 |
| III. Études de sensibilité pour la situation météorologique neutre..... | 23 |
| 1. Influence des APU..... | 23 |
| 2. Influence de la vitesse du vent en amont..... | 27 |
| 3. Bilan sur la situation météorologique neutre..... | 32 |
| IV. Simulation de référence et études de sensibilité pour la situation météorologique instable..... | 33 |
| 1. Influence des APU..... | 33 |
| 2. Influence de la vitesse du vent en amont..... | 39 |
| 3. Bilan de la situation météorologique instable..... | 45 |
| Conclusions..... | 46 |
| Références..... | 47 |

Introduction

Le présent rapport constitue le livrable du LOT 3 du projet de recherche sur la **MO**délisation et **SI**mulation de la **Q**ualité de l'**A**ir en milieu **A**éroportuaire (MOSIQAA) pour les activités du Cerfacs. Il fait suite au livrable du LOT 2 transmis fin janvier 2019 (Auguste et al. 2019a). L'objet du projet MOSIQAA est l'étude de la modélisation de la qualité de l'air dans le **cas d'un aéroport fictif, CAEPport**, défini par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) et ce, avec différents modèles de différents niveaux de fidélité (e.g. modèles gaussiens, approches de type mécanique des fluides numérique avec des simulations RANS/*Reynolds Averaged Navier-Stokes* ou LES/*Large Eddy Simulations*). Dans ce cadre, le rôle du Cerfacs est de mettre en œuvre des **simulations de type LES à très haute résolution** permettant de simuler explicitement la dynamique de l'écoulement au sein du CAEPport ainsi que la dispersion de polluants induite par des scénarii d'émissions aéroportuaires journaliers.

Dans le **livrable du LOT 2**, deux faits marquants peuvent être mis en avant. D'une part, une **méthode des frontières immergées** (IBM/*Immersed Boundary Method*) a été développée par le Cerfacs et intégrée dans la version 5.2 du **code atmosphérique Meso-NH** d'abréviation MNH développé conjointement par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM/Météo-France) et par le Laboratoire d'Aérodynamique (LA/Observatoire Midi-Pyrénées). Ces développements numériques permettent de représenter explicitement les infrastructures présentes dans CAEPport et ainsi de prendre en compte leur impact sur l'écoulement de l'air à l'échelle aéroportuaire. Le nouveau **code MNH-IBM** permet ainsi de réaliser des simulations LES à très haute résolution. Cette méthode IBM est ce qui distingue les simulations réalisées par le Cerfacs et celles réalisées par l'ONERA-Toulouse dans le projet MOSIQAA. A noter qu'en parallèle du projet MOSIQAA, le nouveau code MNH-IBM a été validé sur une expérience de terrain idéalisée (*MUST/Mock Urban Setting Test*) en condition neutre (Auguste et al. 2019b) et a été transféré au CNRM pour un phasage pérenne avec la version officielle de MNH. D'autre part, des **simulations numériques de référence** ont été réalisées à **très haute résolution (résolution spatiale de 5 mètres, résolution temporelle inférieure ou égale à 1 seconde)** avec le code MNH-IBM sur le cas aéroport CAEPport. Ces simulations de référence correspondent à la simulation d'une partie du cycle journalier pour trois situations météorologiques différenciées par leur condition de stabilité (neutre, stable, instable).

Dans ce **présent livrable**, le Cerfacs présente les résultats obtenus pour les **études de sensibilité du LOT 3** qui s'appuient sur les simulations numériques de référence réalisées dans le LOT 2. L'idée est de modifier certains paramétrages des simulations de référence pour analyser la sensibilité des concentrations de polluants (e.g. oxydes d'azote/ NO_x) simulées en différents points de l'aéroport. Ces études de sensibilité résumées dans le **Tableau 1**, portent notamment sur l'utilisation ou non des groupes auxiliaires de puissance (*APU/Auxiliary Power Unit*) à bord des avions ainsi que des variations dans les conditions météorologiques et de surface (e.g. force du vent imposée comme conditions aux limites du domaine de calcul, flux de chaleur sensible imposé à la surface).

Le présent livrable est organisé en cinq parties. Une première partie donne l'ensemble des informations nécessaires référencées dans la suite du rapport, notamment les données relatives à

l'aéroport CAEPport, les quantités d'intérêt obtenues en sortie de MNH-IBM avec la notion de sondes numériques et les situations météorologiques étudiées décrites en détail dans les livrables des LOTS 1 et 2. Une seconde partie décrit les résultats des études de sensibilité pour le cas stable. Elle est suivie des résultats des études de sensibilité pour le cas neutre (troisième partie) et pour le cas instable (quatrième partie). La dernière partie donne les conclusions et perspectives de ces études de sensibilité.

Tableau 1. Récapitulatif des simulations MNH-IBM réalisées par le Cerfacs dans les LOTS 2 et 3 du projet MOSIQAA.

| Simulations MNH-IBM / Cerfacs | Cas Stable | Cas Neutre | Cas Instable |
|--|--|---|--|
| Avec émissions des APU | Objectif atteint lors du lot 2 Environ 5000 h CPU | Objectif atteint lors du lot 2 Environ 35000 h CPU | Objectif réalisé pour le lot 3 Environ 140000 h CPU |
| Sans émissions des APU | Objectif réalisé pour le lot 3 | Objectif réalisé pour le lot 3 | Objectif réalisé pour le lot 3 |
| Vitesse du vent réduite d'un facteur 2 (conditions atmosphériques de grande échelle) | | Objectif réalisé pour le lot 3 | Objectif réalisé pour le lot 3 |
| Flux de chaleur sensible (conditions de surface) | Objectif réalisé pour le lot 3 | | |

I. Cas d'étude et simulations MNH-IBM de référence

1. Le cas d'étude CAEPport

Dans ce projet, le cas d'étude considéré est ciblé sur le cas de l'aéroport théorique et générique CAEPport défini par le Comité pour la Protection de l'Environnement en Aviation de l'OACI, voir Figure 1. L'aéroport est constitué d'une piste de décollage. Le terrain est plat. Les sources d'émission de CAEPport incluent les moteurs et les APU des avions, les équipements de service au sol, le dépôt de carburant, la centrale électrique ainsi que le trafic de desserte de l'aéroport. La description du trafic aéroportuaire est également fournie ; celui-ci correspond à un aéroport de taille moyenne avec une forte proportion de vols régionaux et un hub d'une compagnie nationale.

A noter que l'utilisation des APU des avions est considérée comme un des paramètres des études de sensibilité présentées dans ce livrable, ce qui modifie le cadastre des émissions en entrée des simulations de MNH-IBM.

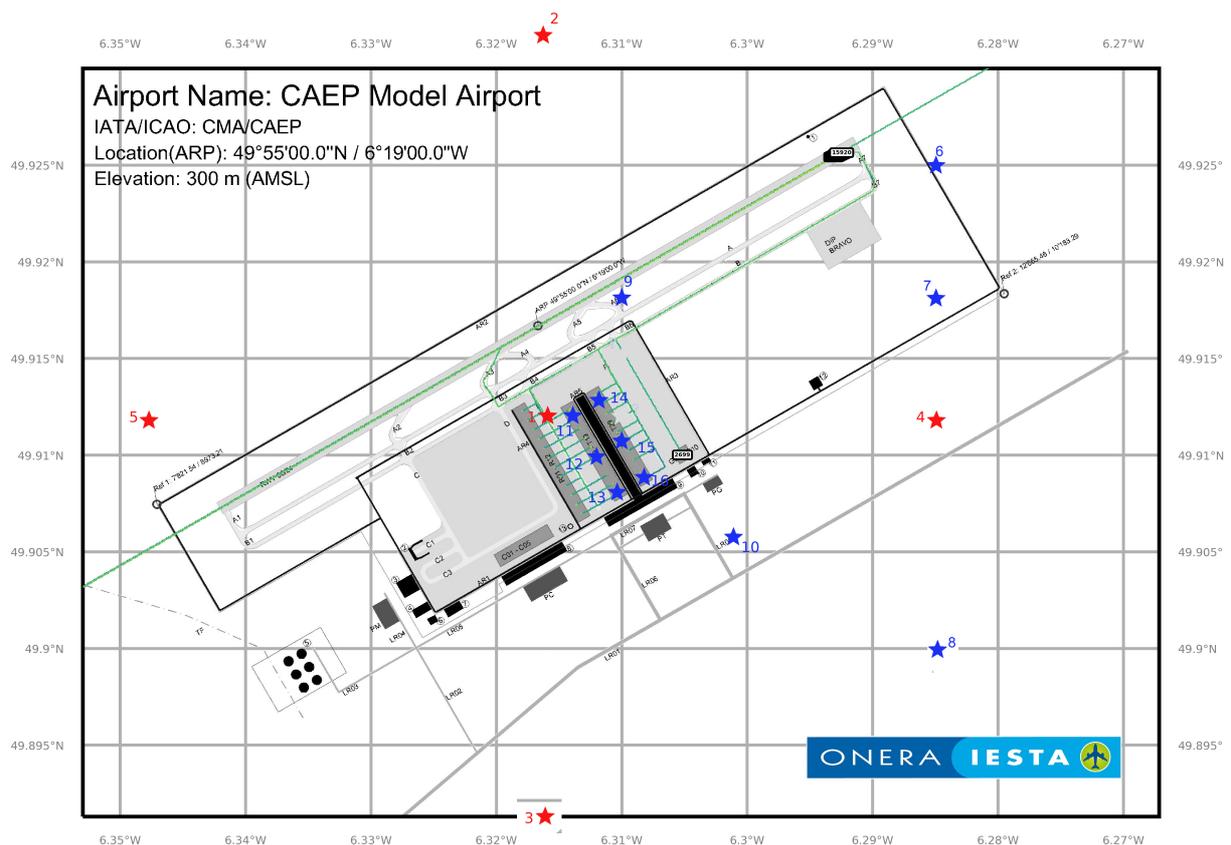


Figure 1. Plan de l'aéroport CAEPport et localisation des sondes numériques donnant l'évolution temporelle des grandeurs d'intérêt à une hauteur donnée ou des profils verticaux. Les symboles de couleur rouge (sondes 1 à 5) indiquent les sondes donnant une information générale de la situation. Les symboles de couleur bleue (sondes 6 à 16) indiquent les sondes positionnées aux abords de la piste de décollage et du terminal.

2. Le code de simulation atmosphérique MNH-IBM

Dans le cadre de ce projet, différents codes (e.g. ADMS-airport, LASPORT, CEDRE, MesoNH avec et sans IBM) avec différents niveaux de fidélité (modèles gaussiens versus modèles de mécanique des fluides numérique – CFD/*Computational Fluid Dynamics*) sont utilisés et comparés pour simuler la qualité de l'air à l'échelle du CAEPport.

Le Cerfacs se positionne sur les modèles de type CFD. Il met en œuvre des simulations aux grandes échelles (LES/*Large Eddy Simulations*) à très haute résolution (résolution spatiale horizontale de 5 mètres, résolution temporelle inférieure ou égale à 1 seconde) en utilisant le code MNH-IBM. Les simulations de type LES avec MNH (Lafore et al. 1998 ; Lac et al. 2018) permettent de représenter explicitement les grandes structures turbulentes (avec le recours à un modèle de turbulence de sous-maille pour la modélisation des plus petites échelles turbulentes) et ainsi d'obtenir des champs instantanés turbulents de vent, température et espèces chimiques (Aumond et al. 2013 ; Bergot et al. 2015 ; Auguste et al. *in preparation*). MNH est couplé avec le modèle de surface SURFEX pour modéliser les interactions entre la surface et l'atmosphère (Masson et al. 2013). La méthode IBM validée précédemment (Mittal and Iaccarino 2005 ; Auguste et al. 2019b) permet de modifier la représentation de la surface dans SURFEX en prenant en compte explicitement l'impact des infrastructures aéroportuaires sur l'écoulement turbulent et la génération de turbulence dans le sillage de ces infrastructures. Un certain nombre de développements numériques spécifiques à chaque situation météorologique étudiée (neutre, stable, instable) a été nécessaire pour mettre en œuvre les simulations MNH-IBM, conférer le livrable du LOT 2 (Auguste et al. 2019a).

L'ensemble des travaux présentés par la suite ont été réalisés en utilisant MesoNH augmentée d'une approche IBM (version 5.2). A noter que les travaux sur les IBM ont été récemment phasés dans la nouvelle version (version 5.4) de Meso-NH en collaboration avec Robert Schoetter, Tim Nagel, Christine Lac et Valéry Masson du CNRM en parallèle du projet MOSIQAA, ce qui a pour but de pérenniser cet outil LES au-delà des projets en cours.

La simulation du cas CAEPport avec MNH-IBM a un coût de calcul considérable et requiert l'accès à un supercalculateur. Les résultats présentés dans ce livrable ont été obtenus sur les supercalculateurs internes du Cerfacs¹ (deux clusters Nemo/Kraken d'une capacité crête agrégée d'environ 600 Tflop/s, avec 6912 cœurs/288 noeuds pour l'un et 4356 cœurs/121 noeuds pour le second). A noter que le cas CAEPport a déjà été simulé avec MNH-IBM sur le supercalculateur (Beaufix) de Météo-France, un des associés du Cerfacs, ce qui illustre sa portabilité vers d'autres calculateurs.

3. Les quantités d'intérêt

Les résultats présentés dans ce livrable sont principalement des **grandeurs physiques simulées à 2 mètres au-dessus du sol**. C'est un indicateur typiquement employé dans les études

¹ <https://cerfacs.fr/les-calculateurs-du-cerfacs/>

de qualité de l'air pour se rapprocher de la notion d'exposition individuelle à un certain seuil de toxicité (Groupe de travail "GT 3D dispersion" 2015).

Un certain nombre de **sondes numériques** ont été positionnées dans le domaine de l'aéroport, voir Figure 1. Ces sondes fournissent une information instantanée en certains points du domaine de calcul (comme l'aurait fait un capteur de mesure expérimentale dans un contexte réel) et permettent d'extraire des séries temporelles de certaines grandeurs physiques sur le cycle journalier considéré. La Figure 1 donne la position des sondes numériques (localisation par système de coordonnées latitude/longitude commune à tous les partenaires). Au total, 16 sondes numériques sont considérées. Les sondes numérotées de 1 à 5 (de couleur rouge sur la Figure 1) donnent une vision générale de la situation (Terminal/Nord/Sud/Est/Ouest). Les sondes numérotées de 11 à 16 (de couleur bleue sur la Figure 1) donnent une information plus résolue aux abords de la piste de décollage (6 à 10) et du terminal (11 à 16). Le post-traitement donne également la valeur moyennée dans un rayon horizontal de 200 mètres autour du terminal ; nous ferons référence à cette valeur moyennée sous la dénomination "terminal" dans ce livrable. Dans la suite, nous nous intéresserons en particulier aux résultats obtenus à la sonde 4 (en aval de l'aéroport) et à la sonde "terminal" de par leur positionnement clé pour une problématique de qualité de l'air. Des résultats à la sonde 5 (en amont de l'aéroport) seront également présentés pour vérifier la cohérence des simulations MNH-IBM.

Les espèces chimiques ciblées sont les **oxydes d'azote**, d'abréviation NO_x , qui incluent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2). Les NO_x sont définis ici comme la somme massique des espèces NO et NO_2 . Dans la suite, les résultats graphiques incluent les évolutions temporelles des concentrations de NO_x au niveau des sondes et les coupes horizontales horaires à 2 mètres au-dessus du sol de ces concentrations (avec un focus sur la tranche horaire 15 h/16 h pour les cas stable et neutre, et sur les tranches horaires 9 h/10 h et 15 h/16 h pour le cas instable).

Les notions de **seuils** sont importantes en qualité de l'air. Ces seuils sont définis réglementairement comme suit pour le **dioxyde d'azote** (Tissot-Pichard 2004) :

Le **seuil d'effets réversibles** (fixé à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$) est lié à l'apparition d'effets sur l'homme en fonction de ses sensibilités (e.g. irritation des yeux, toux) qui dépend peu de la durée d'exposition.

Le **seuil d'information et de recommandation** (fixé à $2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$) correspond au seuil au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de groupes humains particulièrement sensibles et qui rend nécessaire l'émission d'informations immédiates et adéquates à destination de ces groupes et des recommandations pour réduire certaines émissions.

Le **seuil d'alerte** (fixé à $4 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$) correspond au seuil au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé de l'ensemble de la population ou de dégradation de l'environnement justifiant des mesures d'urgence.

Dans les simulations LES présentées dans ce livrable, les espèces NO et NO_2 sont traitées comme des traceurs passifs sans interaction chimique. Les seuils ci-dessus seront donc utilisés par comparaison avec la somme $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ de manière conservative et à titre indicatif.

4. Les différentes situations météorologiques étudiées

Trois situations météorologiques sont considérées dans le projet MOSIQAA pour analyser la sensibilité de la qualité de l'air à l'échelle de CAEPport à la situation météorologique du jour : un cas stable, un cas neutre et un cas instable.

a) Le cas stable

La situation météorologique stable correspond à un état atmosphérique présentant une forte stratification verticale et une turbulence réduite. Les forçages de grandes échelles (vent, température et humidité de l'air, concentrations de NO_x) fournis par l'INERIS sont stationnaires. La vitesse du vent à l'échelle de l'aéroport est faible, de l'ordre de 10^{-1} m s^{-1} .

Dans la simulation MNH-IBM de référence du cas stable, le flux de chaleur sensible en surface est faiblement négatif, il est fixé à -1 W m^{-2} en tout point du domaine de calcul au niveau du sol ; le flux de chaleur latente est nul. Ces situations stables se rencontrent généralement la nuit. En journée, une situation stable peut persister mais le flux de surface sera généralement positif. Aussi le flux de chaleur sensible en surface est considéré comme un des paramètres des études de sensibilité présentées dans ce livrable.

Le cadastre d'émissions peut également influencer la qualité de l'air. Le choix a été porté ici sur la prise en compte ou non des émissions des APU comme il est reconnu qu'ils impactent localement la qualité de l'air et le niveau sonore. Au sol, les APU fournissent par exemple, de l'air pour la mise en route des réacteurs et pour le système de climatisation, et de l'énergie électrique nécessaire à l'avion. Au décollage, les APU fournissent la climatisation lorsque des performances optimales des moteurs sont requises. Il est intéressant ici de quantifier la contribution des APU à la qualité de l'air, qui peut être problématique dans une situation météorologique stable.

Plusieurs études de sensibilité sont ainsi présentées dans ce livrable pour étayer l'analyse du cas stable (utilisation ou non des APU, variation du flux de chaleur sensible de surface – voir Tableau 1). A noter qu'une simulation du cas stable de référence a un coût de calcul de l'ordre de 5 000 heures (temps CPU/*Central Processing Unit*), le pas de temps est de 1 s. Mais ce coût de calcul augmente quand le flux de chaleur sensible est augmenté pour atteindre 20 000 heures CPU pour les cas de sensibilité considérés dans ce livrable.

b) Le cas neutre

La situation météorologique neutre correspond à un état atmosphérique présentant une forte advection horizontale en basse couche et une forte intensité turbulente. Les forçages de grandes échelles (vent, température et humidité de l'air, concentrations de NO_x) sont stationnaires. La vitesse du vent à l'échelle de l'aéroport est de l'ordre de 10^1 m s^{-1} . La turbulence d'origine dynamique domine. La hauteur de la couche limite va croître avec le cisaillement turbulent (induit par exemple par des gradients de pression horizontaux).

Dans la simulation MNH-IBM de référence du cas neutre, la vitesse du vent aux limites du domaine de simulation MNH-IBM est décrite par un profil logarithmique typique d'un cas idéalisé, elle est de 10 m s^{-1} à 10 mètres au-dessus du sol. Cette vitesse peut avoir un impact sur la qualité de l'air à l'échelle de l'aéroport, aussi c'est un des paramètres considérés dans les études de sensibilité.

Plusieurs études de sensibilité sont présentées dans ce livrable pour étayer l'analyse du cas neutre (utilisation ou non des APU comme dans les cas stable et instable, variation de la vitesse du vent en amont comme dans le cas instable – voir Tableau 1). A noter qu'une simulation du cas neutre a un coût de calcul de l'ordre de 35 000 heures, le pas de temps est de 0.3 s.

c) Le cas instable

La situation météorologique instable correspond à un état atmosphérique présentant une convection verticale influencée par le cycle diurne. Les forçages de grandes échelles (vent, température et humidité de l'air, concentrations de NO_x) sont instationnaires pour prendre en compte le cycle diurne. Le schéma 1-D de transferts radiatifs du modèle de surface SURFEX (lié au schéma urbain TEB/*Town Energy Budget*, Masson et al. 2013) est activé pour modéliser les flux de chaleur sensibles en surface. La vitesse du vent à l'échelle de l'aéroport est comprise entre 1 et 5 m s^{-1} .

Dans la simulation MNH-IBM de référence du cas instable, la vitesse du vent imposée comme conditions aux limites du domaine de simulation MNH-IBM est décrite par un profil logarithmique. Cette vitesse est de 4 m s^{-1} à 10 mètres au-dessus du sol. Comme dans le cas neutre, cette vitesse en amont de l'aéroport est un des paramètres des études de sensibilité.

Plusieurs études de sensibilité sont présentées dans ce livrable pour étayer l'analyse du cas instable (utilisation ou non des APU comme dans les cas stable et instable, variation de la vitesse du vent en amont comme dans le cas neutre – voir Tableau 1). A noter qu'une simulation du cas instable a un coût de calcul beaucoup plus grand que les simulations du cas stable et neutre. Ce coût est de l'ordre de 140 00 heures, le pas de temps est de 0.3 s.

II. Études de sensibilité pour la situation météorologique stable

1. Influence des APU

Les résultats obtenus par le Cerfacs pour le LOT 2 se caractérisent par l'utilisation des APU dans le cadastre des émissions. Pour évaluer l'impact de ces émissions liées aux APU, une simulation LES sans cette source a été effectuée dans le cadre du LOT 3. A noter que ce scénario sans émissions d'APU doit également être étudié par les autres modèles contribuant au projet MOSIQAA. La base d'émissions sans APU a été fournie par l'ONERA-Toulouse et est utilisée pour générer le fichier d'émissions qui est une entrée du code MNH-IBM.

Séries temporelles

Les Figures 2 et 3 montrent l'évolution journalière de la concentration de NO_x , respectivement au niveau de la sonde 4 (située en aval de l'aéroport) et de la sonde Terminal. Elles comparent la simulation MNH-IBM de référence avec les émissions des APU (courbe noire) et la simulation MNH-IBM sans les émissions des APU (courbe bleue). A noter que pour aider à la lecture des graphiques, les concentrations ont été multipliées par un facteur 10^9 : par exemple, une valeur de 100 sur l'axe des ordonnées de la Figure 2 correspond à $100 \times 10^9 \text{ kg m}^{-3}$, soit le seuil d'effets réversibles ($10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$) ; autre exemple, une valeur de 400 sur l'axe des ordonnées correspond au seuil d'alerte ($4 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$).

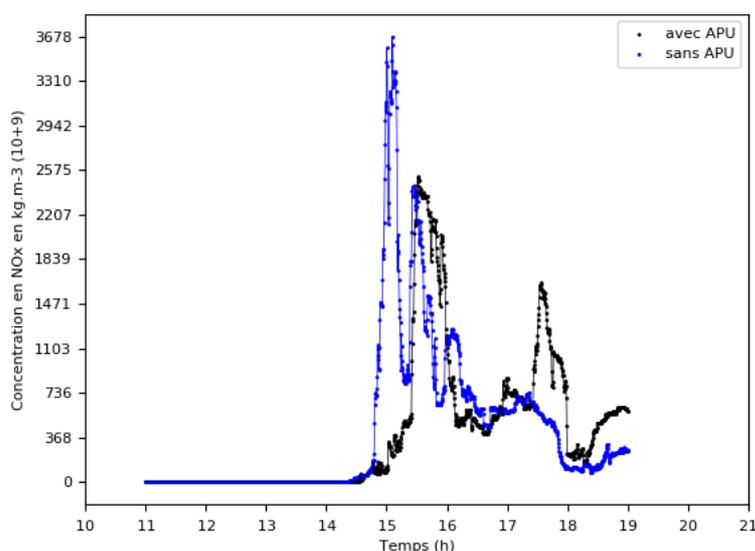


Figure 2. Cas stable avec ou sans APU – Évolution temporelle de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) au niveau de la sonde 4 (aval). La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence MNH-IBM (avec APU). La courbe bleue indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité MNH-IBM (sans APU).

Au niveau de la sonde 4 (voir Figure 2), les résultats montrent que l'évolution de la concentration de NO_x est globalement similaire avec ou sans APU, avec des valeurs particulièrement élevées à partir de 15 h. Cette concentration est légèrement supérieure en présence d'APU (excepté vers

15 h). Dans les deux cas, avec et sans APU, elle est majoritairement supérieure au seuil d'alerte ($4 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$) à partir de 15 h.

Aux abords du terminal (voir Figure 3), la concentration de NO_x est beaucoup plus importante en présence d'APU au cours de la journée : elle dépasse déjà le seuil de $5 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$ en l'absence d'APU, mais en présence d'APU, elle est majoritairement supérieure à $2 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$ et atteint même des valeurs de $4 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$ à trois moments de la journée (un premier pic entre 11 h et 12 h est atteint, puis deux autres pics surviennent entre 13 h et 14 h et entre 16 h et 17 h).

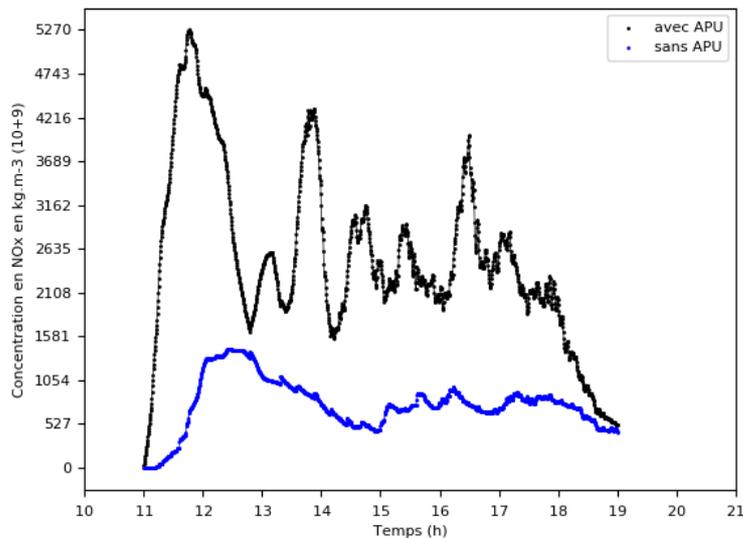


Figure 3. Cas stable avec ou sans APU – Même légende que la Figure 2 mais pour la sonde terminal.

Les Figures 2 et 3 mettent ainsi en évidence une concentration de NO_x élevée en présence ou en l'absence d'APU. Elle dépasse le seuil d'alerte et par conséquent, le seuil d'information et de recommandation et le seuil d'effets réversibles. La présence d'APU aggrave la situation en augmentant la concentration de NO_x par un facteur 3 environ à proximité du terminal.

Coupes horizontales horaires

Les Figures 4 et 5 montrent avec et sans APU, les concentrations simulées de NO_x moyennées sur la tranche horaire 15 h/16 h. Elles montrent la variabilité spatiale de la concentration NO_x entre 1×10^{-8} et $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$, ce qui permet notamment d'identifier la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'effets réversibles (zone de couleur rouge). La zone de couleur bleue correspond à une zone de moyenne horaire proche de celle du fond atmosphérique des grandes échelles. En présence d'APU, le seuil d'effets réversibles est dépassé au niveau de la piste de décollage, dans la zone du terminal et la partie Nord-Est de l'aéroport (voir Figure 4). En l'absence d'APU, cette zone où le seuil dépasse le seuil d'effets réversibles est moins étendue (voir Figure 5).

Les Figures 6 et 7 sont l'équivalent des Figures 4 et 5 mais avec un autre post-traitement des concentrations de NO_x . L'idée maintenant est de montrer la variabilité spatiale de concentration entre 2×10^{-7} et $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$, ce qui permet d'identifier la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'information et de recommandation (zone qui n'est pas de couleur bleu foncé) ainsi que la zone où elle dépasse le seuil d'alerte (zone de couleurs verte et rouge). Les résultats montrent que la concentration de NO_x dépasse le seuil d'information et de recommandation et le seuil d'alerte

avec ou sans APU, à proximité de la piste de décollage, du terminal et dans la zone Nord-Est de l'aéroport. La zone où ces deux seuils sont franchis est plus étendue en présence d'APU.

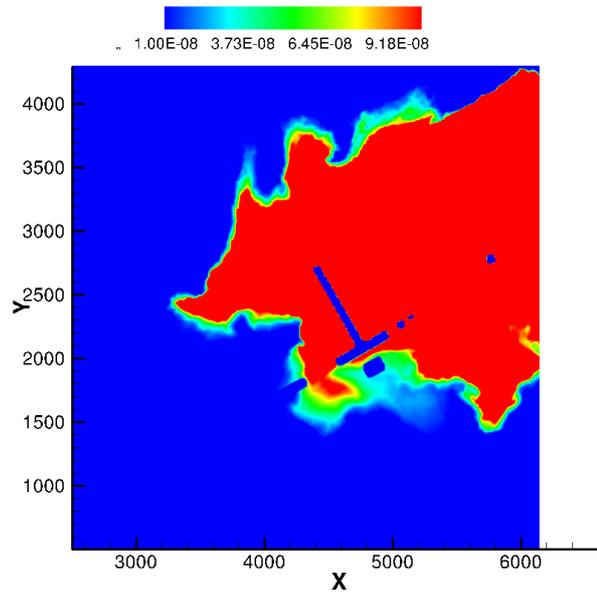


Figure 4. Cas stable de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

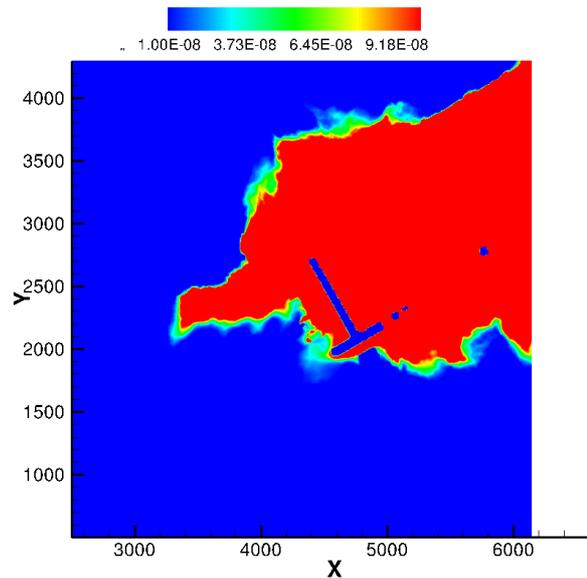


Figure 5. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 4 mais sans APU.

Profils verticaux horaires

Les Figures 8 et 9 montrent les profils verticaux des moyennes horaires (entre 15 h et 16 h) de concentration de NO_x pour trois sondes, la sonde 5 (en amont de l'aéroport), la sonde 1 (dans le terminal) et la sonde 4 (en aval de l'aéroport), avec émissions des APU (Figure 8) ou sans émissions des APU (Figure 9). Dans les deux cas, les résultats montrent que les concentrations liées aux grandes échelles atmosphériques (sonde 5 en rouge) sont négligeables au regard des concentrations simulées au niveau du terminal (sonde 1 en noir) et en aval de l'aéroport (sonde 4 en bleu). Ce qui

signifie que les effets remarquables aux sondes 1 et 4 sont directement liés aux émissions aéroportuaires.

Les profils verticaux montrent une dispersion verticale de 50 mètres (respectivement 75 mètres) au terminal (respectivement en aval), avec ou sans APU. Les émissions diffusent donc verticalement dans une hauteur de couche limite faible (typique des situations météorologiques stables). De plus, les résultats montrent que la concentration de NO_x en surface change de manière significative au niveau de la sonde 1 (terminal) si les APU sont utilisés. La concentration de NO_x est relativement semblable au niveau de la sonde 4 avec ou sans APU.

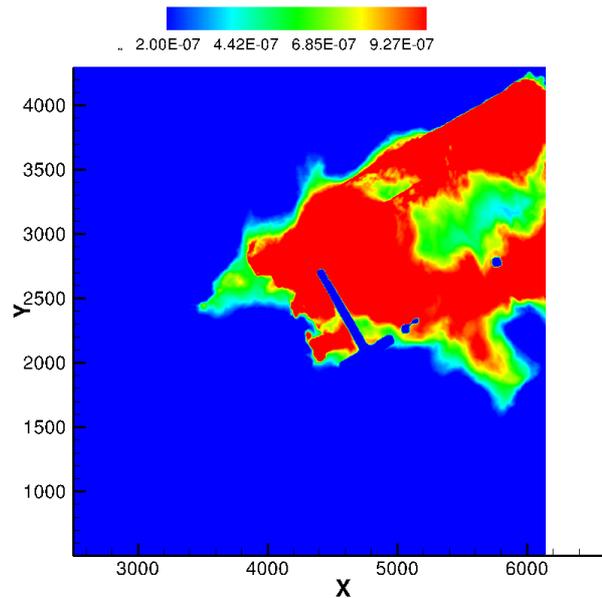


Figure 6. Cas stable de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

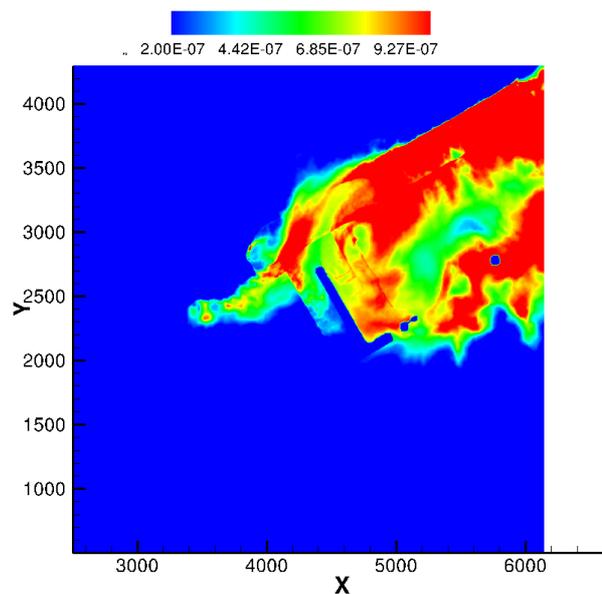


Figure 7. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 6 mais sans APU.

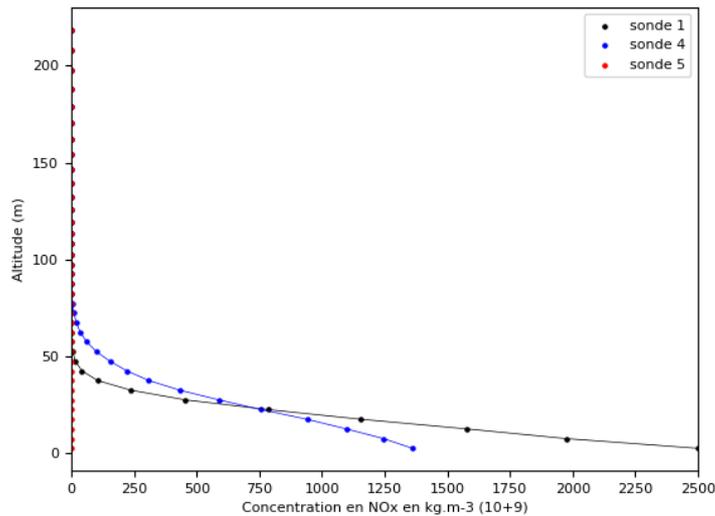


Figure 8. Cas stable de référence (avec APU) – Profil vertical de la moyenne (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) pour différentes sondes numériques : la sonde 5 en aval de l'aéroport (en rouge), la sonde 1 au niveau du terminal (en noir) et la sonde 4 en aval de l'aéroport (en bleu).

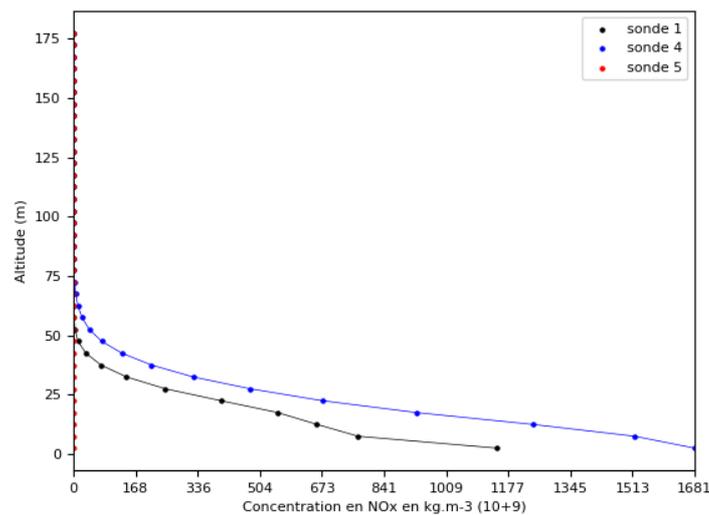


Figure 9. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 8 mais sans APU.

2. Influence du flux de chaleur sensible

En analysant les résultats obtenus pour le cas stable et en les comparant avec ceux obtenus avec MNH (sans IBM) par l'ONERA-Toulouse, des variations importantes de la hauteur de couche limite apparaissent en fonction du flux de chaleur sensible à la surface. Par exemple, en analysant l'évolution de la température potentielle lors d'une journée, celles-ci paraissent faibles par rapport à la situation observée. Pour rappel, dans ce cas, à l'état initial, la surface présente une température potentielle de 269,8 K et va augmenter de quelques degrés toute la journée, jusqu'à atteindre une température potentielle maximale de 271,15K. Il s'agit donc d'une situation hivernale très stable.

De plus, la différence de concentration de NO_x entre les cas du Cerfacs et de l'ONERA-Toulouse semblait beaucoup trop importante. Dans la simulation de référence, le Cerfacs a imposé un flux de chaleur sensible de -1 W m^{-2} en tout point du domaine au niveau du sol, alors que les simulations de l'ONERA-Toulouse montrent des valeurs proches de 100 W m^{-2} . Afin d'étudier la sensibilité des résultats à ce flux de chaleur sensible, le Cerfacs a ainsi effectué deux simulations MNH-IBM en augmentant le flux de chaleur sensible, une première avec un flux de 25 W m^{-2} , une seconde avec un flux de 50 W m^{-2} . Le flux de chaleur sensible est uniforme dans le domaine de calcul MNH-IBM. Ces simulations de sensibilité ont été effectuées en prenant en compte les émissions liées aux APU. Autrement dit, seul le flux de chaleur sensible de surface est modifié par rapport à la simulation de référence MNH-IBM réalisée dans le LOT 2.

Séries temporelles

Les Figures 10 et 11 comparent l'évolution de la concentration de NO_x dans ce cas stable, pour les trois valeurs de flux de chaleur sensible : -1 W m^{-2} (courbes noires), 25 W m^{-2} (courbes bleues) et 50 W m^{-2} (courbes rouges). La Figure 10 fait cette comparaison à la sonde 4, la Figure 11 fait cette comparaison à la sonde 11.

Au niveau de la sonde 4, la concentration de NO_x est beaucoup plus élevée quand le flux de chaleur sensible vaut -1 W m^{-2} à partir de 15 h. La concentration dépasse largement le seuil d'effets réversibles ($1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$) ainsi que le seuil d'information et de recommandation ($2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$). En revanche, le seuil d'information et de recommandation n'est pas dépassé pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} et 50 W m^{-2} .

Aux abords du terminal, la concentration de NO_x est également beaucoup plus importante quand le flux de chaleur sensible vaut -1 W m^{-2} . Elle dépasse largement les différents seuils de qualité de l'air, les pics de concentration pouvant atteindre des valeurs supérieures à $3 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. Pour les deux autres cas (i.e. pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} et 50 W m^{-2}), seuls les pics de concentration peuvent dépasser le seuil d'information et de recommandation.

A noter que la concentration de NO_x est légèrement plus élevée pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} que pour un flux de chaleur sensible égal à 50 W m^{-2} aux sondes 4 et terminal.

Coupes horizontales horaires

Les Figures 12, 13 et 14 montrent les coupes horizontales de concentration de NO_x moyennée pour les trois valeurs de flux de chaleur sensible, -1 , 25 et 50 W m^{-2} , respectivement. La représentation graphique suit la même logique que pour l'étude de sensibilité aux émissions des APU précédente. Ces figures montrent la variabilité spatiale de la concentration NO_x entre 1×10^{-8} et $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$, ce qui permet notamment d'identifier la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'effets réversibles (zone de couleur rouge).

Les résultats obtenus pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} et 50 W m^{-2} sont globalement similaires. La concentration de NO_x dépasse le seuil d'effets réversibles en moyenne horaire au niveau de la piste de décollage et aux abords du terminal. Dans ces zones, la concentration de NO_x reste légèrement plus élevée pour le cas à 25 W m^{-2} que pour celui à 50 W m^{-2} .

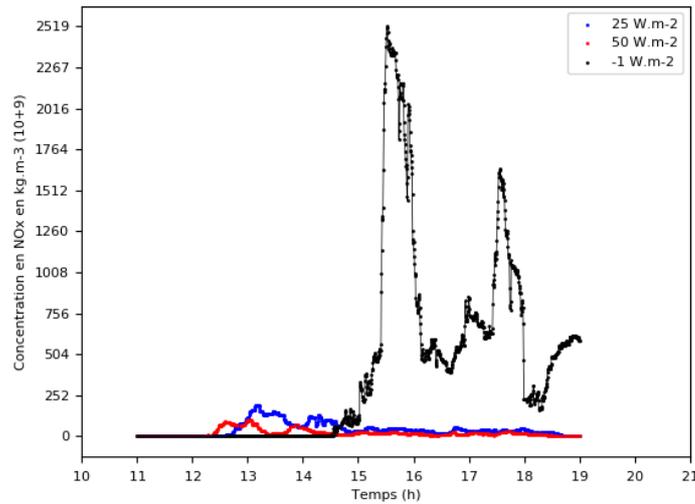


Figure 10. Cas stable pour différents flux de chaleur sensible – Évolution temporelle de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) au niveau de la sonde 4. La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence MNH-IBM (flux de chaleur sensible égal à -1 W m^{-2}). La courbe bleue indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité MNH-IBM pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} . La courbe rouge est l'équivalent pour un flux de chaleur sensible égal à 50 W m^{-2} .

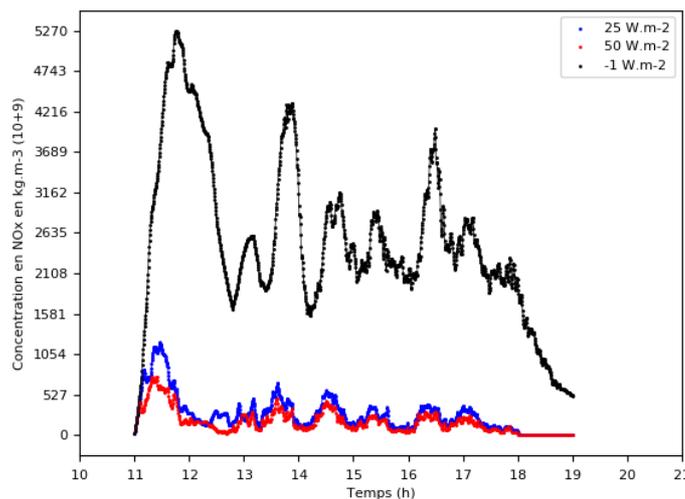


Figure 11. Cas stable pour différents flux de chaleur sensible – Même légende que la Figure 10 mais au niveau de la sonde terminal.

Les Figures 15, 16 et 17 sont l'équivalent des Figures 12, 13 et 14 mais avec un autre post-traitement des concentrations de NO_x . Celles-ci montrent la variabilité spatiale de concentration entre 2×10^{-7} et $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$, ce qui permet d'identifier la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'information et de recommandation (zone qui n'est pas de couleur bleu foncé) ainsi que la zone où elle dépasse le seuil d'alerte (zone de couleurs verte et rouge). Quelle que soit la valeur du flux de chaleur sensible, la concentration de NO_x est plus élevée au niveau de la piste de décollage, dans la zone proche du terminal ainsi que dans la zone Nord-Est. Toutefois, la concentration de NO_x est beaucoup plus importante quand le flux de chaleur sensible est négatif, pouvant atteindre une valeur de $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$, dépassant ainsi les différents seuils de qualité de l'air. Quand le flux de chaleur sensible est positif, ces seuils sont atteints mais dans une zone plus réduite aux abords de la piste de décollage et du terminal.

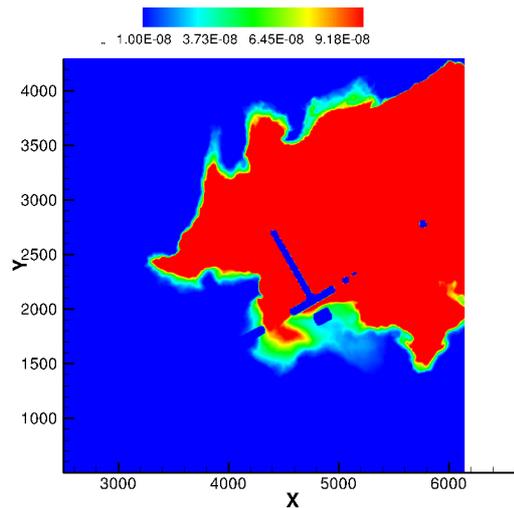


Figure 12. Cas stable de référence (pour un flux de chaleur sensible égal à -1 W m^2) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^3) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^3$. La composante X correspond à la composante Oest/Est (m) ; la composante Y à la composante Sud/Nord (m).

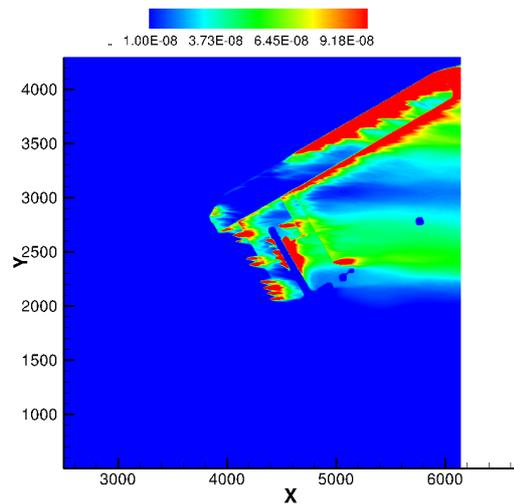


Figure 13. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 12 mais pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^2 .

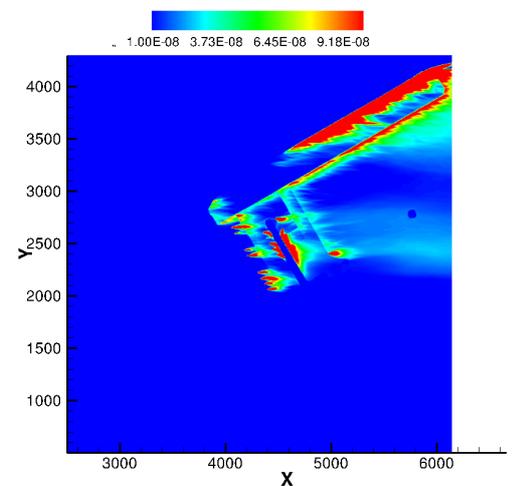


Figure 14. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 12 mais pour un flux de chaleur sensible égal à 50 W m^2 .

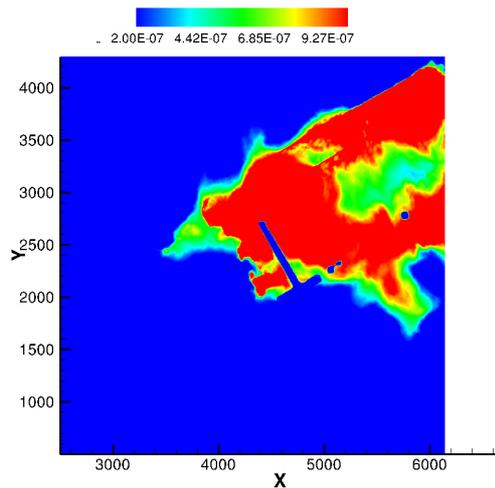


Figure 15. Cas stable de référence (pour un flux de chaleur sensible égal à -1 W m^2) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y à la composante Sud/Nord (m).

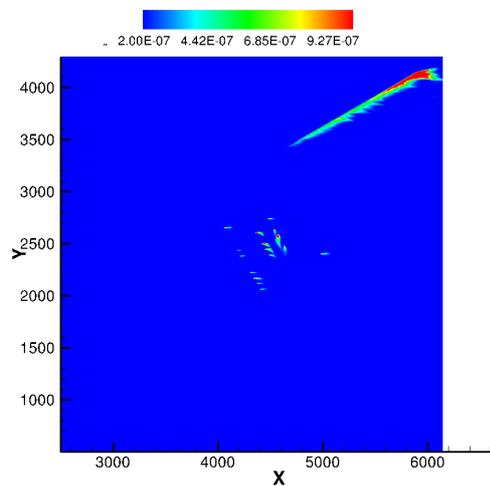


Figure 16. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 15 mais pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^2 .

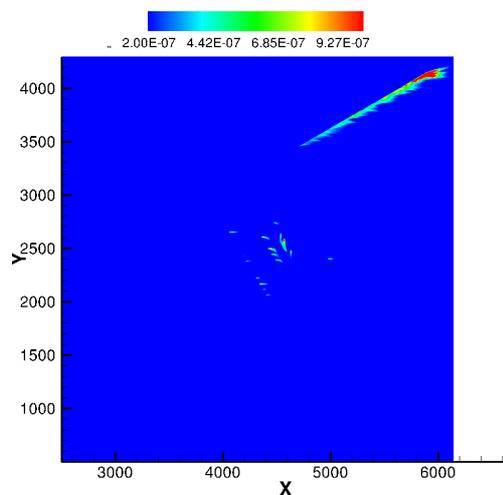


Figure 17. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 15 mais pour un flux de chaleur sensible égal à 50 W m^2 .

Profils verticaux horaires

Les Figures 18, 19 et 20 montrent les profils verticaux de la moyennes horaire (entre 15 h et 16 h) de concentration de NO_x pour différentes sondes. Les résultats montrent que les valeurs de concentration du fond atmosphérique (sonde 5 en amont) sont négligeables au regard de celles simulées au terminal (sonde 1) et en aval (sonde 4) quelle que soit la valeur des flux de chaleur sensible. De plus, la concentration de NO_x est beaucoup plus importante à la sonde 1 qu'aux sondes 4 et 5. Au niveau de la sonde 4, la concentration de NO_x est plus élevée quand le flux de chaleur sensible vaut -1 W m^{-2} . La concentration de NO_x reste plus élevée (d'un facteur 2 environ) pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} que pour un flux de chaleur sensible égal à 50 W m^{-2} .

Autrement dit,

$$\text{NOx}_{-1 \text{ W.m}^{-2}} \gg \text{NOx}_{25 \text{ W.m}^{-2}} \approx 2 \times \text{NOx}_{50 \text{ W.m}^{-2}} > \text{NOx}_{50 \text{ W.m}^{-2}}$$

La dispersion sur la verticale diffère selon la situation étudiée. Elle est d'environ 50 mètres au niveau de la sonde 1 et de 75 mètres au niveau de la sonde 4 dans le cas où le flux de chaleur sensible vaut -1 W m^{-2} (cas MNH-IBM de référence). Elle devient beaucoup plus grande quand le flux de chaleur sensible est positif, ce qui explique qu'en surface la concentration de NO_x est beaucoup moins élevée dans les cas où le flux de chaleur sensible vaut 25 et 50 W m^{-2} que dans le cas de référence. En effet, la dispersion sur la verticale atteint 100 mètres au niveau de la sonde 1 et 175 mètres au niveau de la sonde 4 pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} . Elle atteint 125 mètres au niveau de la sonde 1 et 220 mètres au niveau de la sonde 4 pour un flux de chaleur sensible égal à 50 W m^{-2} . Le comportement et l'évolution de la dispersion verticale (la dispersion sur la verticale augmente avec le flux de chaleur sensible) sont cohérents.

En augmentant la valeur du flux de chaleur sensible au sol en tout point, les résultats obtenus par le Cerfacs apparaissent cohérents avec ceux obtenus par l'ONERA-Toulouse. L'augmentation du flux se traduit par une baisse significative de la concentration moyenne horaire de NO_x en surface. La concentration de NO_x est supérieure au seuil d'effets réversibles quand le flux de chaleur sensible imposé en tout point est positif (25 et 50 W m^{-2}). En revanche, elle dépasse tous les seuils quand le flux de chaleur sensible est négatif (-1 W m^{-2}).

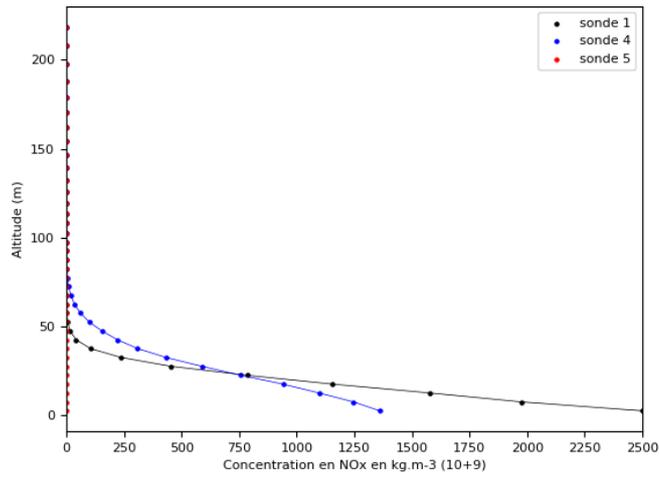


Figure 18. Cas stable de référence (pour un flux de chaleur sensible égal à -1 W m^{-2}) – Profil vertical de la moyenne (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) pour différentes sondes numériques : la sonde 5 en aval de l'aéroport (en rouge), la sonde 1 au niveau du terminal (en noir) et la sonde 4 en aval de l'aéroport (en bleu).

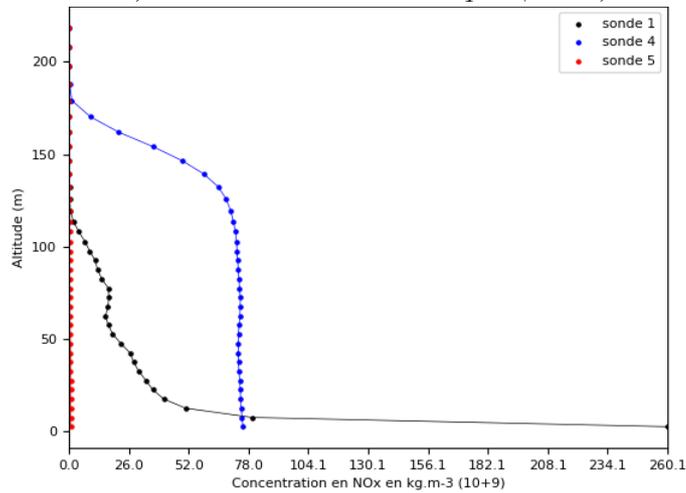


Figure 19. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 18 mais pour un flux de chaleur sensible égal à 25 W m^{-2} .

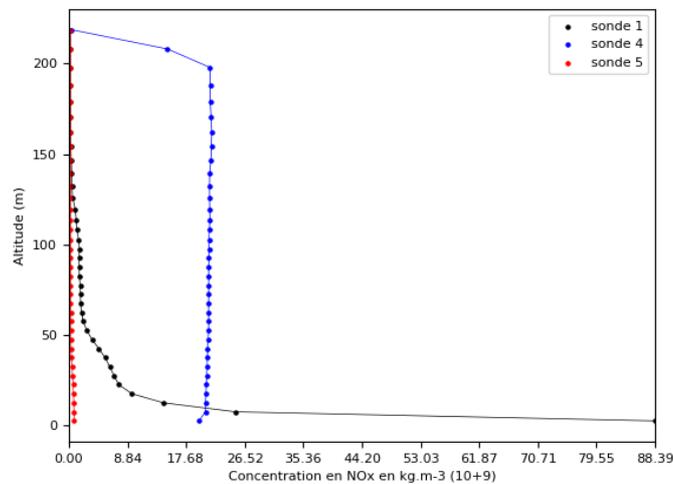


Figure 19. Cas stable de sensibilité – Même légende que la Figure 18 mais pour un flux de chaleur sensible égal à 50 W m^{-2} .

3. Bilan sur la situation météorologique stable

Sur la base des simulations numériques MNH-IBM effectuées pour ce cas stable, nous pouvons conclure qu'une situation météorologique stable est problématique du point de vue de la qualité de l'air avec des niveaux de concentration de NO_x élevés au niveau du terminal, de la piste de décollage et en aval de l'aéroport (direction Nord-Est ici).

En modifiant certains paramètres physiques des simulations, nous pouvons dégager les tendances suivantes.

- La présence d'APU induit une augmentation importante de la concentration de NO_x proche du terminal (les concentrations NO_x sont multipliées par un facteur 3 par rapport au cas simulé sans APU). La zone impactée par un certain seuil de concentration de NO_x est plus étendue.
- Dans le cas où le flux de chaleur sensible à la surface est faible, la couche limite verticale se développe peu et les émissions sont très peu dispersées sur la verticale (100 à 200 mètres au plus). Avec ou sans APU, la concentration de NO_x proche de la surface est alors problématique car elle dépasse le seuil d'effets réversibles ainsi que le seuil d'information et de recommandation.

La qualité de la modélisation des cas de forte stabilité dépendra donc de la capacité des modèles à bien prendre en compte les flux de chaleur à la surface de manière à bien suivre l'évolution de la hauteur de la couche limite sur la journée.

III. Études de sensibilité pour la situation météorologique neutre

1. Influence des APU

Comme pour le cas stable, nous avons étudié l'influence des émissions des APU dans le cas neutre pour analyser la sensibilité des résultats numériques au scénario d'émissions.

Séries temporelles

La Figure 21 montre l'évolution journalière de la concentration de NO_x , avec et sans APU, à la sonde 4 en aval de l'aéroport. La Figure 22 montre la différence entre les séries temporelles avec ou sans APU. Quelle que soit le scénario d'émissions (avec ou sans APU), la concentration de NO_x est majoritairement inférieure au seuil d'effets réversibles ($1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$). Ce seuil est toutefois franchi à plusieurs reprises et de manière sporadique. Ces pics de valeurs sont à relier au décollage et à l'atterrissage des avions. Globalement, les différences de concentration de NO_x entre les cas avec et sans APU restent faibles (de l'ordre de $2 \times 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$ en moyenne).

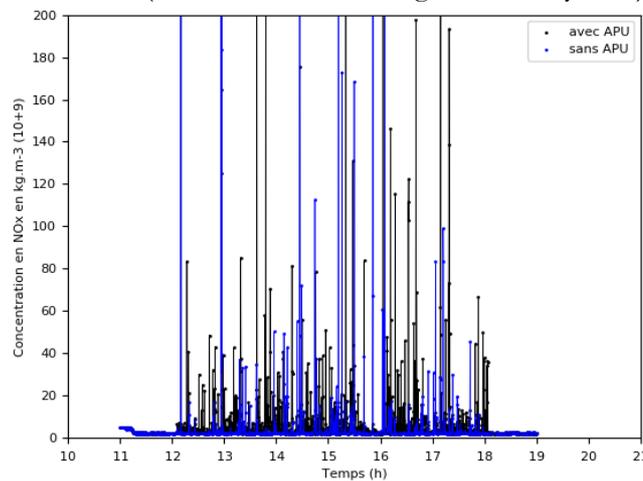


Figure 21. Cas neutre avec ou sans APU – Évolution temporelle de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) au niveau de la sonde 4. La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence MNH-IBM (avec APU). La courbe bleue indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité MNH-IBM (sans APU).

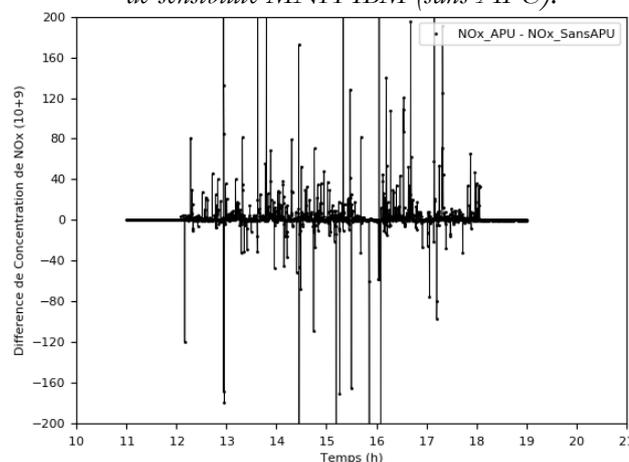


Figure 22. Cas neutre – Différence entre les concentrations de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) au niveau de la sonde 4 entre le cas avec APU et le cas sans APU.

La Figure 23 est l'équivalent de la Figure 21 pour la sonde terminal. La concentration de NO_x est majoritairement inférieure au seuil d'effets réversibles quelle que soit la situation (avec ou sans APU). Comme pour la sonde 4, ce seuil est franchi à plusieurs reprises et de manière sporadique. Cependant, contrairement à la sonde 4, il y a un décalage des niveaux de concentration au cours de la journée entre le cas avec APU et le cas sans APU. La concentration de NO_x est plus élevée en présence d'APU (avec une différence de l'ordre de $4 \times 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$ en moyenne sur la période 13 h/17 h).

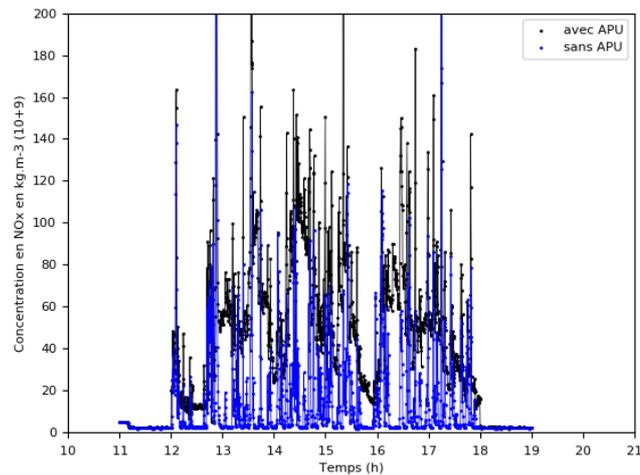


Figure 23. Cas neutre avec ou sans APU – Même légende que la Figure 21 mais au niveau de la sonde terminal.

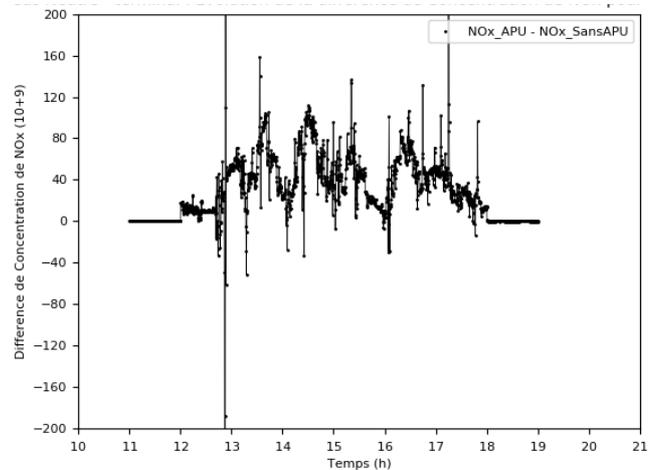


Figure 24. Cas neutre avec ou sans APU – Même légende que la Figure 22 mais au niveau de la sonde terminal.

Coupes horizontales horaires

Les Figures 25 et 26 montrent les concentrations simulées de NO_x moyennées pour la tranche horaire 15 h/16 h, avec et sans APU. Elles montrent la variabilité spatiale de la concentration NO_x entre 1×10^{-8} et $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$, la zone de couleur rouge correspondant à la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'effets réversibles ($1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$). Avec ou sans APU, la concentration de NO_x est importante en aval de la piste de décollage. Le seuil d'effets réversibles est également atteint aux abords du terminal en présence d'APU.

Les Figures 27 et 28 sont l'équivalent des Figures 25 et 26 pour un post-traitement différent des concentrations. Elles montrent la variabilité spatiale de la concentration de NO_x entre 2×10^{-7} et $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$ afin d'identifier la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'information et de recommandation et éventuellement le seuil d'alerte. Les résultats montrent que seule une zone de faible étendue à proximité de la piste de décollage est concernée. En-dehors de cette zone, la concentration de NO_x est inférieure à $2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$.

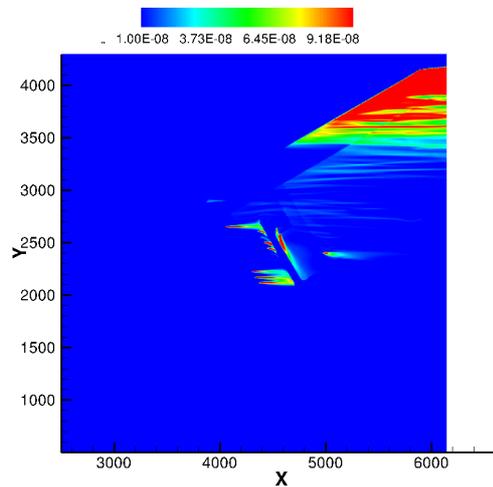


Figure 25. Cas neutre de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

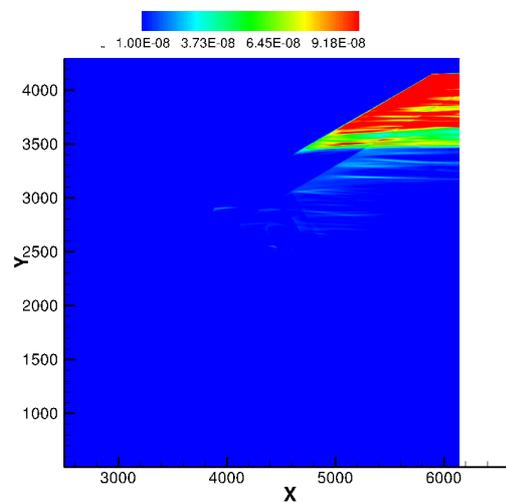


Figure 26. Cas neutre de sensibilité – Même légende que la Figure 25 mais sans APU.

Profils verticaux horaires

Les Figures 29, 30 et 31 montrent les profils verticaux de la concentration de NO_x au niveau de plusieurs sondes : les sondes 1 (terminal), 4 (aval) et 5 (amont), respectivement. Contrairement au cas stable, chaque figure compare les résultats obtenus avec APU (courbe noire) et sans APU (courbe bleue). Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative sur la concentration avec ou sans APU aux sondes 1 et 5 ; la concentration de NO_x y est faible. Quant à la sonde 4, la dispersion sur la verticale est de l'ordre de 160 mètres. La concentration de NO_x dans la couche limite est plus élevée en présence d'APU ; cette différence reste néanmoins faible (de l'ordre de $5 \times 10^{-9} \text{ kg m}^{-3}$).

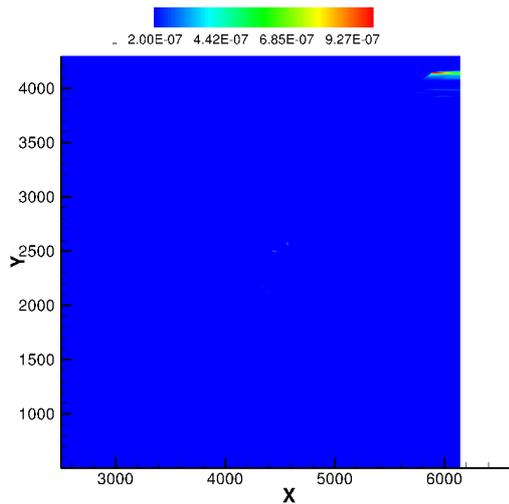


Figure 27. Cas neutre de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

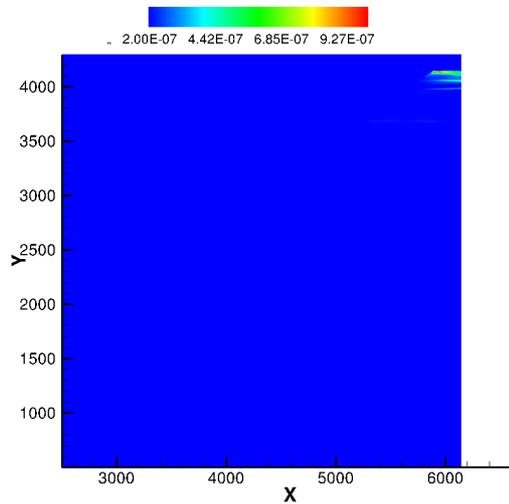


Figure 28. Cas neutre de sensibilité – Même légende que la Figure 27 mais sans APU.

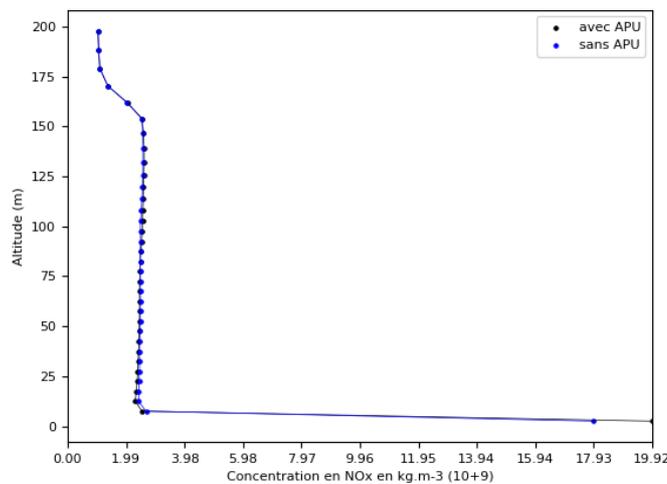


Figure 29. Cas neutre avec ou sans APU – Profil vertical de la moyenne (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) pour la sonde 1 (à proximité du terminal). La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence MNH-IBM (avec APU). La courbe bleue indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité MNH-IBM (sans APU).

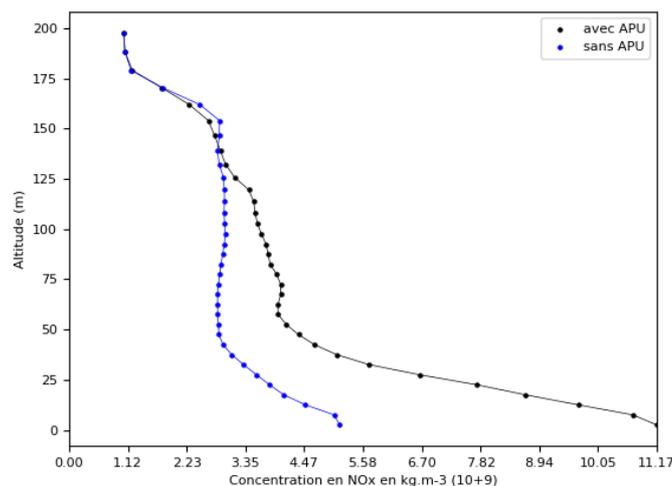


Figure 30. Cas neutre avec ou sans APU – Même légende que la Figure 29 mais au niveau de la sonde 4 (en aval du terminal).

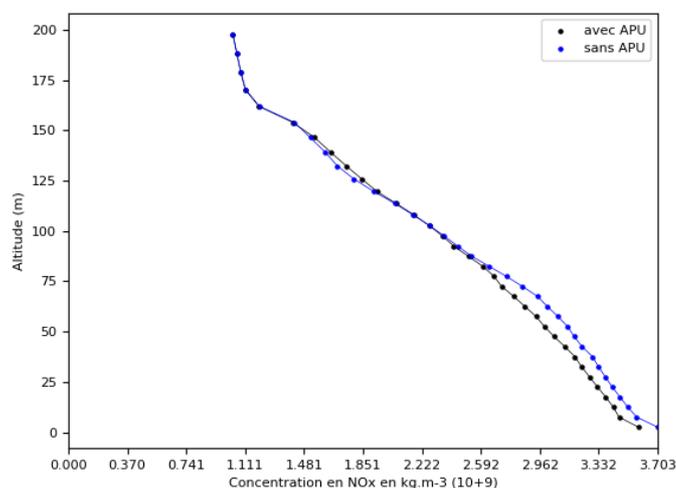


Figure 31. Cas neutre avec ou sans APU – Même légende que la Figure 29 mais au niveau de la sonde 5 (en amont du terminal).

2. Influence de la vitesse du vent en amont

Dans le LOT 2, le Cerfacs et ses partenaires INERIS/ONERA ont simulé le cas neutre de référence avec APU et une vitesse de vent de 10 m s^{-1} (valeur à 10 mètres au-dessus du sol). Cette vitesse de vent étant assez élevée, nous avons choisi de réaliser une nouvelle simulation MNH-IBM en réduisant la vitesse du vent de moitié sur tout le profil vertical. Dans la simulation de sensibilité présentée ici, la vitesse du vent est ainsi de 5 m s^{-1} à 10 mètres au-dessus du sol.

Séries temporelles

Les Figures 32 et 33 montrent l'évolution journalière de la concentration de NO_x au niveau de la sonde 4 (en aval de l'aéroport) et de la sonde terminal.

Au niveau de la sonde 4, le niveau moyen de la concentration de NO_x est faible au cours de la journée pour les deux vitesses de vent considérées ($< 3 \times 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$). Il ne dépasse pas le seuil

d'effets réversibles ($1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$) en dehors des pics de valeurs probablement dues au décollage et à l'atterrissage des avions, déjà observés dans l'étude de sensibilité aux émissions des APU. Les différences observées entre les deux cas sont principalement liées à ces pics de valeurs.

Au niveau de la sonde terminal, le niveau moyen de la concentration de NO_x ($< 6 \times 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$) est supérieur à celui simulé au niveau de la sonde 4, mais il n'y a pas de différence significative pour les deux vitesses de vent considérées comme pour la sonde 4.

Nous pouvons ainsi en déduire que la vitesse de vent en amont n'a pas d'influence sur la qualité de l'air au niveau du terminal et en aval de l'aéroport dans la gamme de valeurs considérées [5 m s^{-1} ; 10 m s^{-1}].

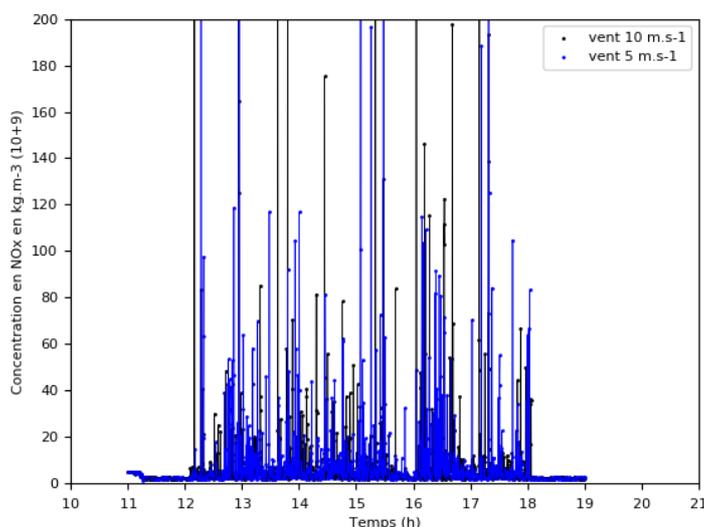


Figure 32. Cas neutre avec une variation de la vitesse de vent en amont – Évolution temporelle de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) au niveau de la sonde 4. La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence MNH-IBM (avec une vitesse de 10 m s^{-1} à 10 m). La courbe bleue indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité MNH-IBM (avec une vitesse de 5 m s^{-1} à 10 m).

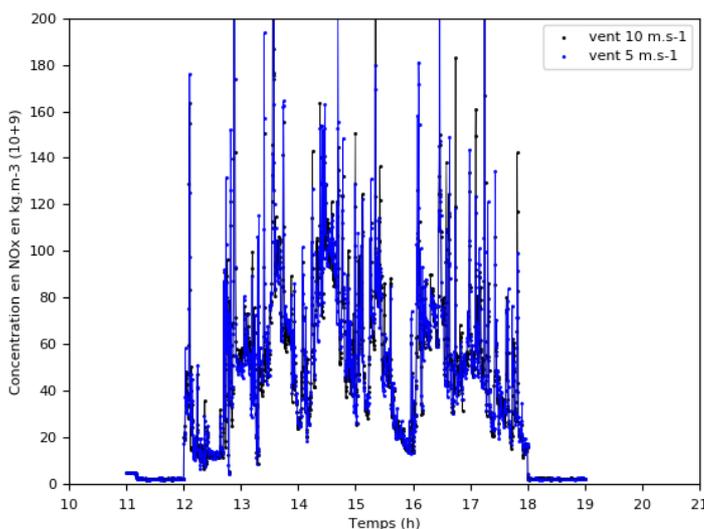


Figure 33. Cas neutre avec une variation de la vitesse de vent en amont – Même légende que la Figure 32 mais au niveau de la sonde terminal.

Coupes horizontales horaires

Les Figures 34 et 35 montrent les concentrations simulées de NO_x moyennées pour la tranche horaire 15 h/16 h, pour deux vitesses de vent en amont : 10 m s^{-1} et 5 m s^{-1} à 10 mètres au-dessus du sol, respectivement. Elles montrent la variabilité spatiale de la concentration NO_x entre 1×10^{-8} et $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$, la zone de couleur rouge étant ainsi la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'effets réversibles ($1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$). Les résultats sont cohérents avec les séries temporelles analysées précédemment. Il n'y a pas de différence significative sur la variabilité spatiale de la concentration de NO_x entre les deux cas considérés. Dans les deux cas, le seuil d'effets réversibles est atteint au niveau de la piste de décollage et à proximité du terminal.

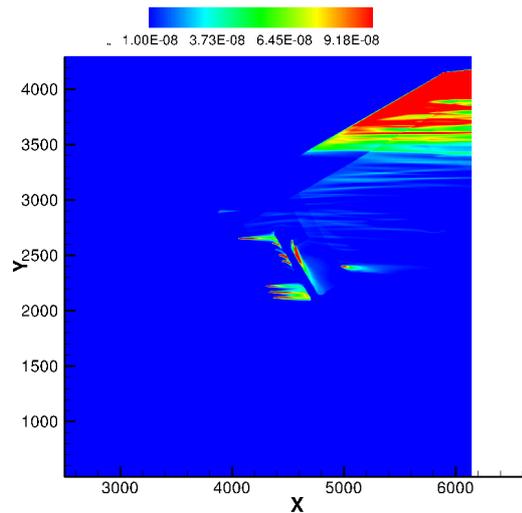


Figure 34. Cas neutre de référence (avec une vitesse du vent en amont de 10 m s^{-1} à 10 m) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

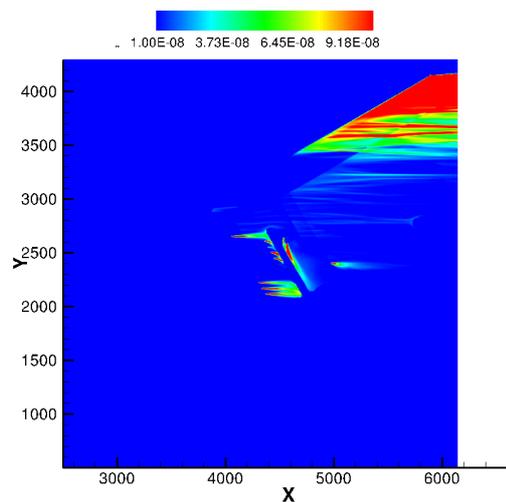


Figure 35. Cas neutre de sensibilité – Même légende que la Figure 34 mais avec une vitesse du vent en amont de 5 m s^{-1} à 10 m .

Les Figures 36 et 37 montrent l'équivalent des Figures 34 et 35 pour une concentration de NO_x seuillée entre 2×10^{-7} et $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. Les deux coupes horizontales sont similaires. Le seuil

d'information et de recommandation et le seuil d'alerte ne sont pas atteints, à l'exception d'une zone localisée en aval de la piste de décollage.

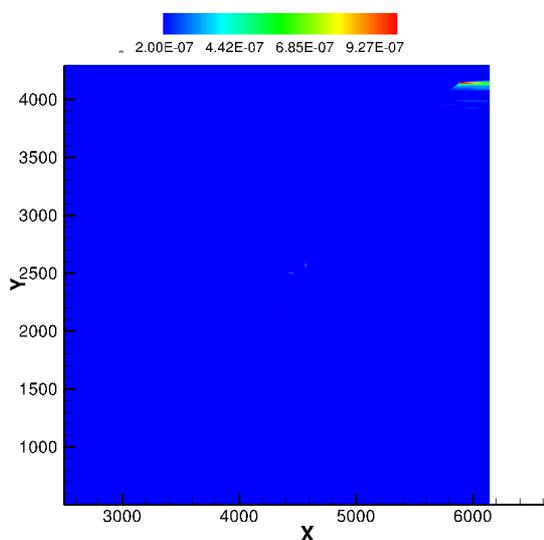


Figure 36. Cas neutre de référence (avec une vitesse du vent en amont de 10 m s^{-1} à 10 m) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

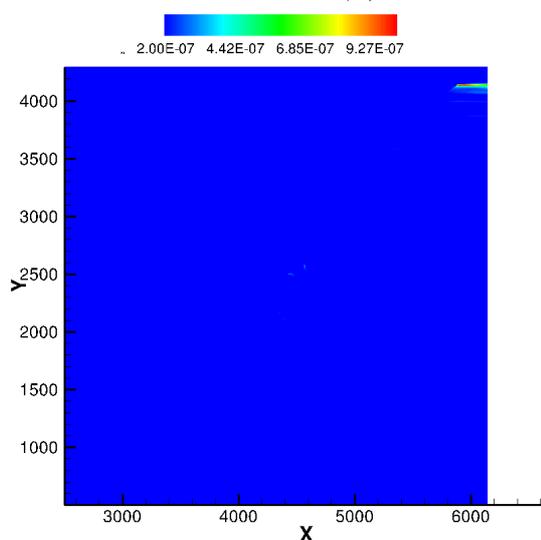


Figure 37. Cas neutre de sensibilité – Même légende que la Figure 36 mais avec une vitesse du vent en amont de 5 m s^{-1} à 10 m .

Profils verticaux horaires

Les Figures 38, 39 et 40 montrent les profils verticaux de concentration de NO_x au niveau des sondes 1, 4 et 5 pour une vitesse de vent en amont de 10 m s^{-1} (courbes noires) et 5 m s^{-1} (courbes rouges) à 10 mètres au-dessus du sol. Quelle que soit la sonde considérée, il n'y a pas de différence significative sur les profils verticaux pour les deux vitesses de vent considérées. La concentration de NO_x est faible (de l'ordre de $1 \times 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$).

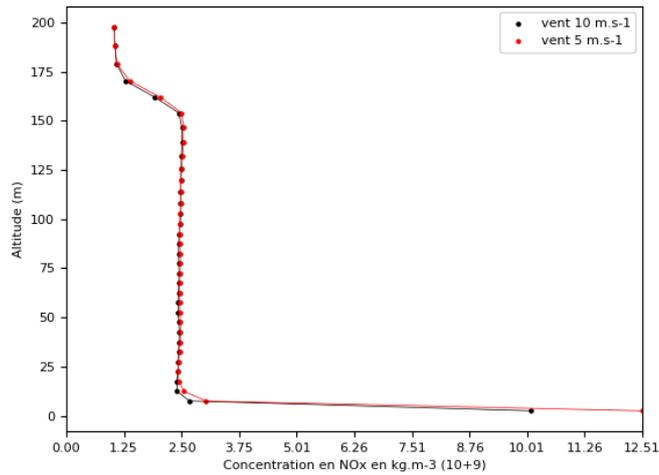


Figure 38. Cas neutre avec une variation de la vitesse de vent en amont – Profil vertical de la moyenne (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) pour la sonde 1 (terminal). La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence (avec une vitesse de 10 m s^{-1} à 10 m). La courbe rouge indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité (avec une vitesse de 5 m s^{-1} à 10 m).

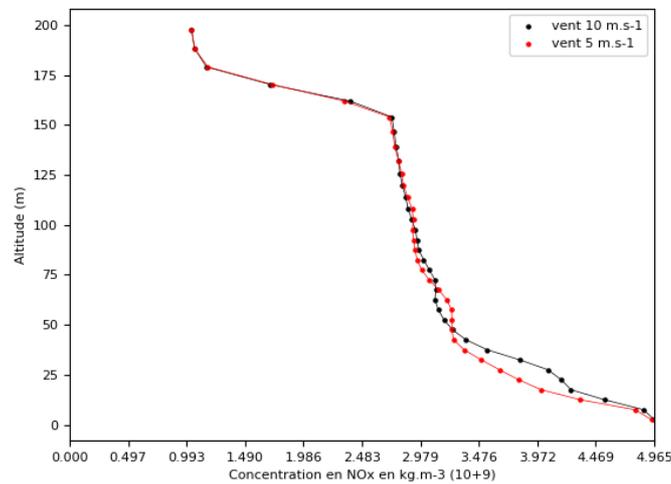


Figure 39. Cas neutre avec une variation de la vitesse de vent en amont – Même légende que la Figure 38 mais au niveau de la sonde 4 (en aval).

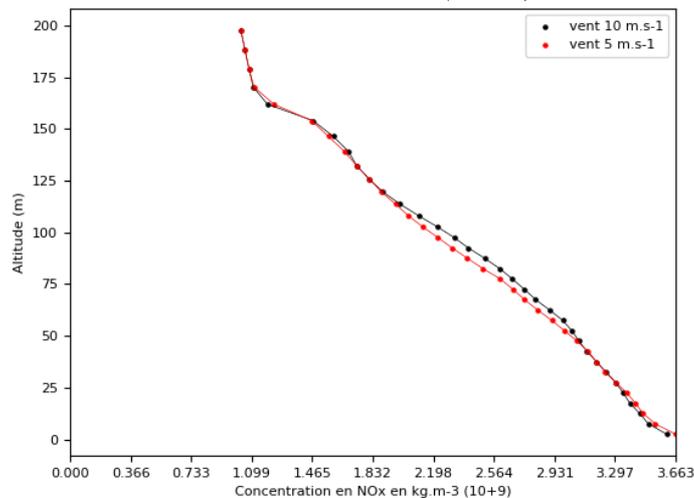


Figure 40. Cas neutre avec une variation de la vitesse de vent en amont – Même légende que la Figure 38 mais au niveau de la sonde 5 (en amont).

3. Bilan sur la situation météorologique neutre

Comme dans le cas stable précédemment étudié (voir partie II), la présence d'APU entraîne une concentration de NO_x plus élevée. L'impact des émissions des APU est néanmoins plus faible que dans le cas stable. Avec une vitesse de vent en amont de 10 m s^{-1} à 10 m , les émissions sont rapidement transportées et dispersées par la turbulence, ce qui peut expliquer l'impact moindre de l'utilisation des APU sur la qualité de l'air aéroportuaire dans le cas neutre.

La vitesse du vent en amont a peu d'influence sur la concentration de NO_x dans la gamme de valeurs considérées [5 m s^{-1} ; 10 m s^{-1}].

Quelle que soit la situation observée (avec ou sans APU, variation de la vitesse du vent en amont), la concentration de NO_x atteint le seuil d'effets réversibles voire celui d'information et de recommandation en moyenne horaire au niveau de la piste de décollage et à proximité du terminal. Dans la majeure partie du CAEPport, la concentration de NO_x reste faible. Les émissions sont donc rapidement transportées et dispersées par la turbulence. Le cas neutre est par conséquent moins problématique en termes de qualité de l'air que le cas stable.

IV. Simulation de référence et études de sensibilité pour la situation météorologique instable

En raison d'un problème technique dans le post-traitement des données simulées, les résultats du cas instable n'ont pas pu être présentés dans le rapport du LOT 2 (Auguste et al. 2019a). Ce problème a été résolu dans le cadre du LOT 3. Aussi les résultats du cas instable de référence (émissions des APU prises en compte, vitesse du vent en amont égale à 4 m s^{-1} à 10 m de hauteur) sont présentés dans cette partie. Comme pour le cas neutre, des études de sensibilité ont été menées : une première en enlevant les émissions des APU du cadastre d'émissions considéré par MNH-IBM, une seconde sur l'impact de la vitesse du vent en amont (en divisant la vitesse du vent en amont par un facteur 2, soit une vitesse égale à 2 m s^{-1} à 10 m de hauteur).

1. Influence des APU

Séries temporelles

Comme pour les cas stable et neutre, il s'agit d'analyser en premier lieu l'évolution journalière (5 h/19 h) de la concentration de NO_x avec ou sans APU. Au niveau de la sonde 4 en aval de l'aéroport (voir Figure 41), le comportement de la concentration de NO_x est similaire avec ou sans APU, elle est inférieure au seuil d'effets réversibles ($10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$), à l'exception de 4 pics de concentration liés à l'atterrissage et au décollage des avions. En moyenne, la concentration de NO_x est supérieure en présence d'APU.

Dans la zone proche du terminal (voir Figure 42), il y a des différences importantes entre les cas avec ou sans APU. La concentration de NO_x est beaucoup plus élevée en présence d'APU, de l'ordre de $3 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$ en moyenne sur la journée, avec des pics pouvant dépasser le seuil d'information et de recommandation et même le seuil d'alerte (avant 12 h). A noter que même en l'absence d'APU, la concentration de NO_x avoisine le seuil d'effets réversibles en moyenne horaire.

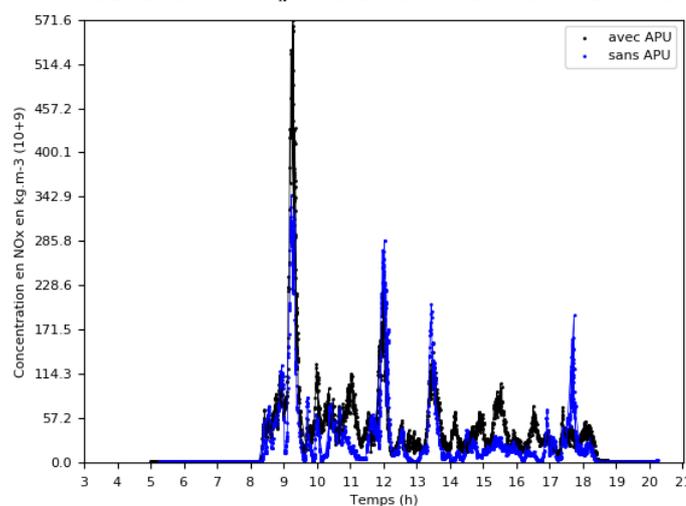


Figure 41. Cas instable avec ou sans APU – Évolution temporelle de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) au niveau de la sonde 4. La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence MNH-IBM (avec APU). La courbe bleue indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité MNH-IBM (sans APU).

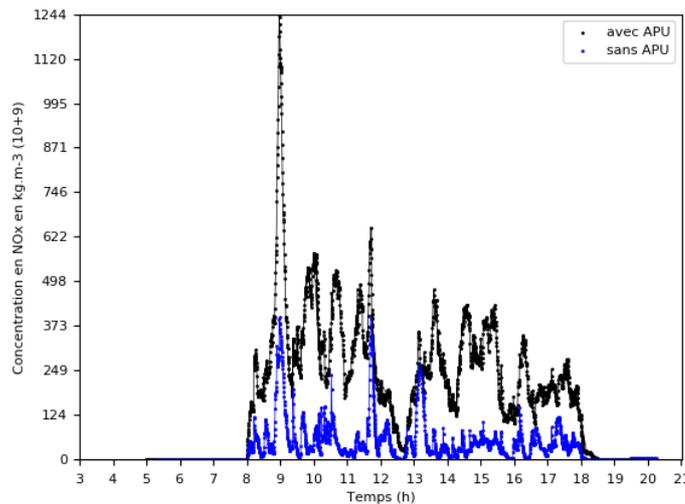


Figure 42. Cas instable avec ou sans APU – Même légende que la Figure 41 mais au niveau de la sonde terminal.

Coupes horizontales horaires

En deuxième lieu, des coupes horizontales de concentration de NO_x à 2 mètres au-dessus du sol sont présentées pour analyser la variabilité spatiale de cette concentration avec ou sans APU, à deux moments de la journée : sur le créneau 9 h/10 h (Figures 43-44-45-46), puis sur le créneau 15 h/16 h (Figures 47-48-49-50). Ces moments ont été choisis à partir des séries temporelles, ils correspondent à des moments où la concentration de NO_x est élevée aux sonde 4 et terminal.

Sur le créneau 9 h/10 h, les Figures 43 et 44 indiquent la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'effets réversibles ($1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$, correspondant à la zone de couleur rouge). Le seuil d'effets réversibles est atteint en aval de la piste de décollage et à proximité du terminal. La zone concernée est plus étendue avec APU. De plus, la concentration de NO_x y est plus élevée que sans émissions d'APU. Les Figures 45 et 46 indiquent la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'information et de recommandation ($2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$, correspondant à ce qui n'est pas de couleur bleu foncé). La piste de décollage fait partie de cette zone avec ou sans APU. Même le seuil d'alerte peut localement y être atteint. De plus, en présence d'APU, la concentration de NO_x dépasse le seuil d'information et de recommandation et le seuil d'alerte aux abords du terminal.

Sur le créneau 15 h/16 h, les Figures 47 et 48 indiquent la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'effets réversibles ($1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$). Avec ou sans APU, le seuil d'effets réversibles est atteint en amont de la piste de décollage et dans la zone Nord-Est de l'aéroport. Seulement, en présence d'APU, la concentration de NO_x dépasse ce seuil aux abords du terminal. Les Figures 49 et 50 indiquent la zone où la concentration de NO_x dépasse le seuil d'information et de recommandation ($2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$). Avec ou sans APU, en amont de la piste de décollage, le seuil d'information et de recommandation ainsi que le seuil d'alerte sont franchis, pouvant même atteindre une concentration de $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. Ces seuils peuvent également être franchis aux abords du terminal dans le cas avec émissions d'APU.

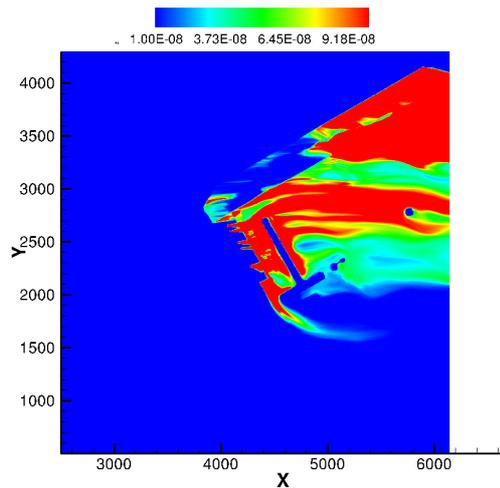


Figure 43. Cas instable de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 9 h et 10 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

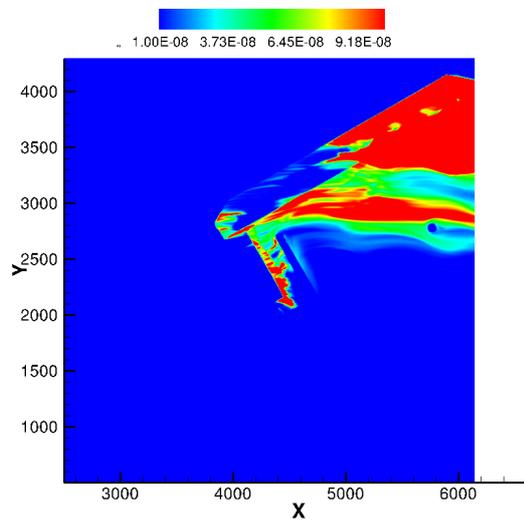


Figure 44. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 43 mais sans APU.

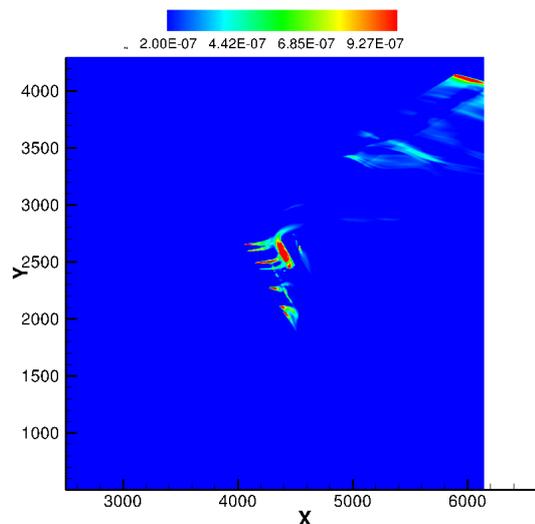


Figure 45. Cas instable de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 9 h et 10 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

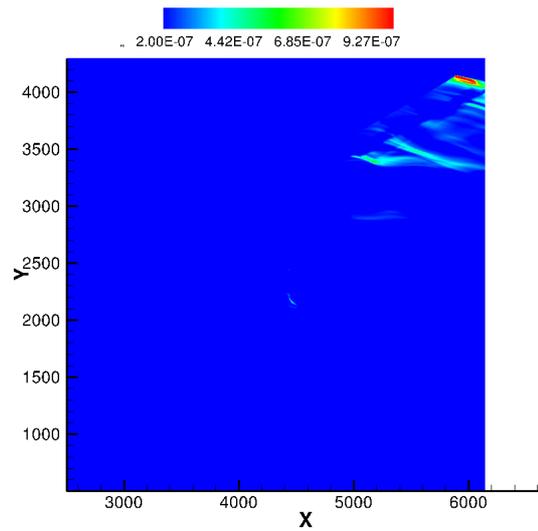


Figure 46. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 45 mais sans APU.

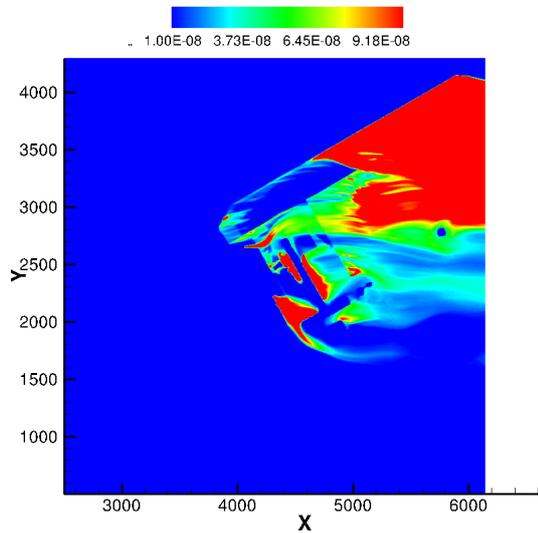


Figure 47. Cas instable de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

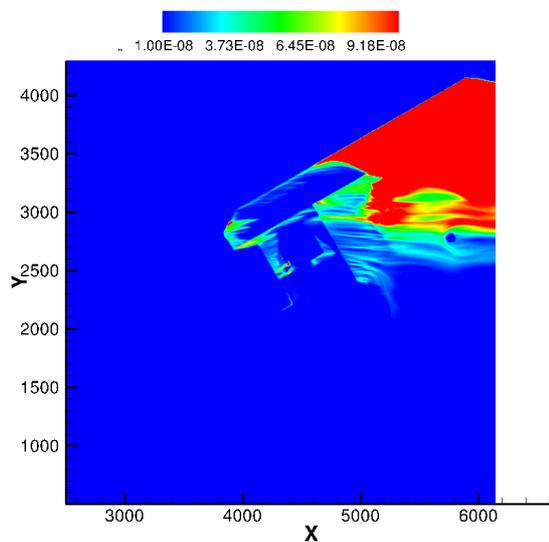


Figure 48. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 47 mais sans APU.

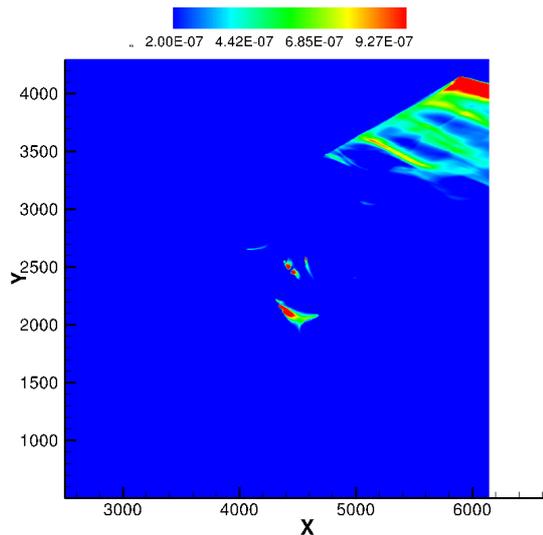


Figure 49. Cas instable de référence (avec APU) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

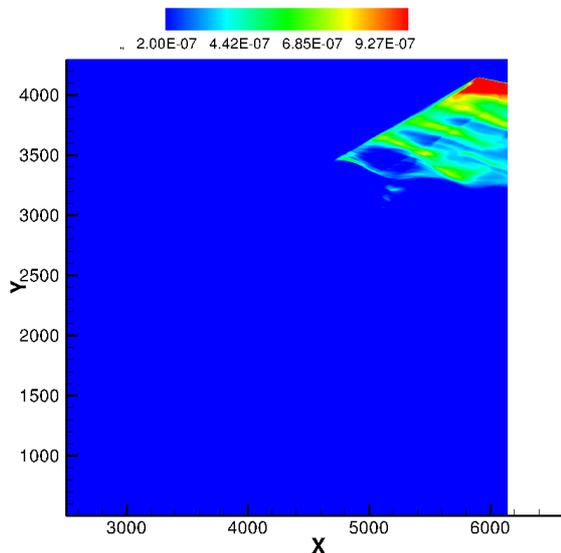


Figure 50. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 49 mais sans APU

Profils verticaux horaires

Comme pour les coupes horizontales horaires, les profils verticaux des concentrations de NO_x sont présentés pour deux tranches horaires distinctes : 9 h/10 h (Figure 51 avec APU et Figure 52 sans APU) d’une part, 15 h/16 h (Figure 53 avec APU et Figure 54 sans APU) d’autre part.

Les résultats montrent que la concentration de NO_x évolue de manière similaire avec l’altitude dans les deux tranches horaires. En présence d’APU, la concentration de NO_x est plus élevée quelle que soit la sonde étudiée. La concentration de NO_x est négligeable pour la sonde 5 (située en amont) au regard de la sonde 1 (située au niveau du terminal) et de la sonde 4 (située en aval).

La dispersion verticale se situe aux alentours de 30 m environ au niveau de la sonde 4.

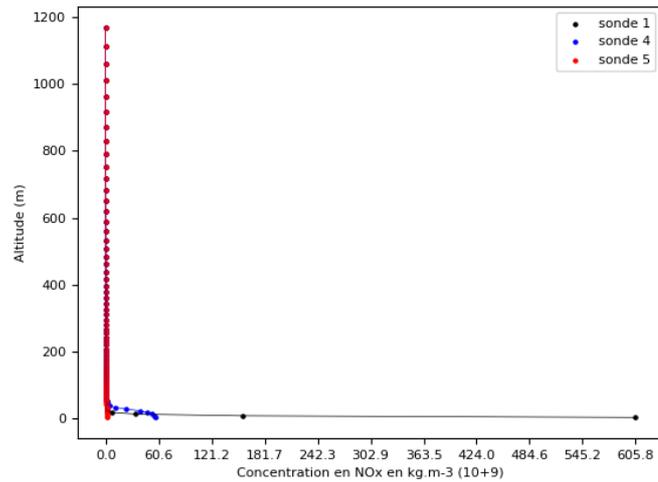


Figure 51. Cas instable de référence (avec APU) – Profil vertical de la moyenne (entre 9 h et 10 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) pour différentes sondes numériques : la sonde 5 en aval de l'aéroport (en rouge), la sonde 1 au niveau du terminal (en noir) et la sonde 4 en aval de l'aéroport (en bleu).

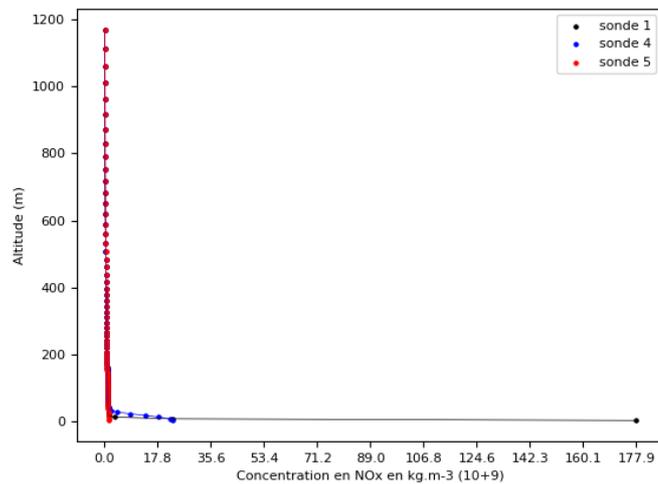


Figure 52. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 51 mais sans APU.

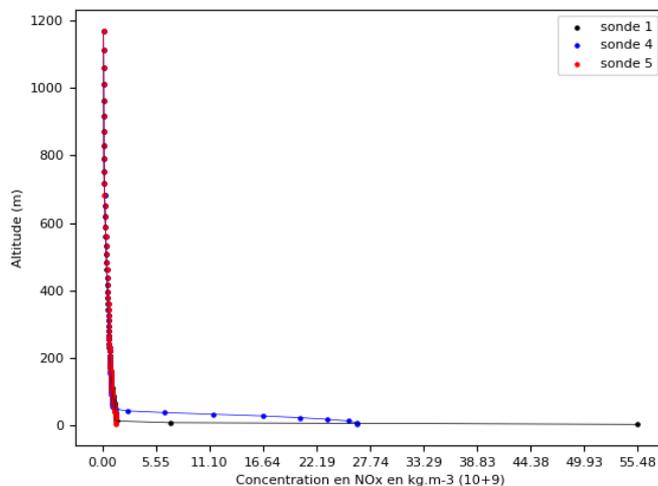


Figure 53. Cas instable de référence (avec APU) – Même légende que la Figure 51 mais pour le créneau horaire entre 15 h et 16 h.

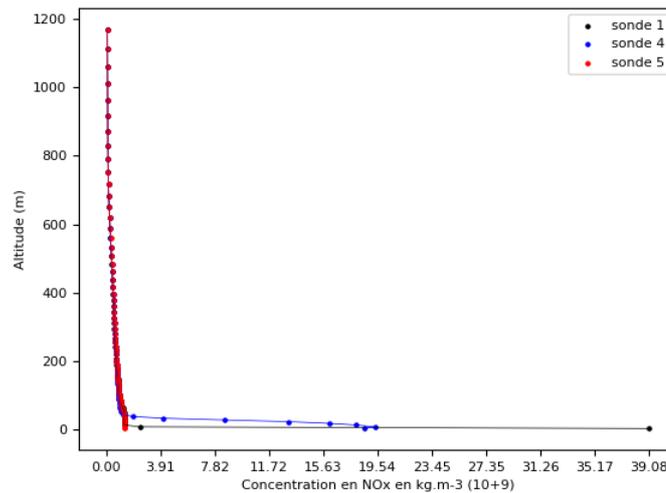


Figure 54. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 51 mais sans APU et pour le créneau horaire entre 15 h et 16 h.

2. Influence de la vitesse du vent en amont

De manière similaire au cas neutre, nous avons réalisé une étude de sensibilité à la vitesse du vent en amont de l'aéroport en divisant par un facteur 2 la vitesse sur tout le profil vertical.

Séries temporelles

Les Figures 55 et 56 montrent l'évolution temporelle de la concentration de NO_x en fonction de la vitesse du vent en amont pour deux sondes, la sonde 4 et la sonde terminal, respectivement.

Au niveau de la sonde 4 (voir Figure 55), la concentration de NO_x est beaucoup plus faible quand la vitesse du vent est plus élevée. Avec une vitesse du vent de 4 m s⁻¹, la concentration de NO_x est faible et ne dépasse le seuil d'effets réversibles que lors de pics de valeur dus au décollage et à l'atterrissage des avions. Lors de ces pics, même le seuil d'information et de recommandation est atteint. En revanche, quand la vitesse du vent est de 2 m s⁻¹, la qualité de l'air est dégradée. La concentration de NO_x atteint ce seuil en moyenne sur la journée et pas uniquement de manière sporadique. Le seuil d'alerte peut même être atteint ponctuellement, la concentration de NO_x pouvant dépasser 1x10⁻⁶ kg m⁻³.

Aux abords du terminal (Figure 56), la concentration de NO_x est également plus élevée quand la vitesse du vent est plus faible. D'une part, avec une vitesse du vent de 4 m s⁻¹, la concentration de NO_x moyenne sur la journée est supérieure au seuil d'effets réversibles ainsi qu'au seuil d'information et de recommandation. D'autre part, avec une vitesse du vent de 2 m s⁻¹, cette concentration moyenne atteint le seuil d'alerte.

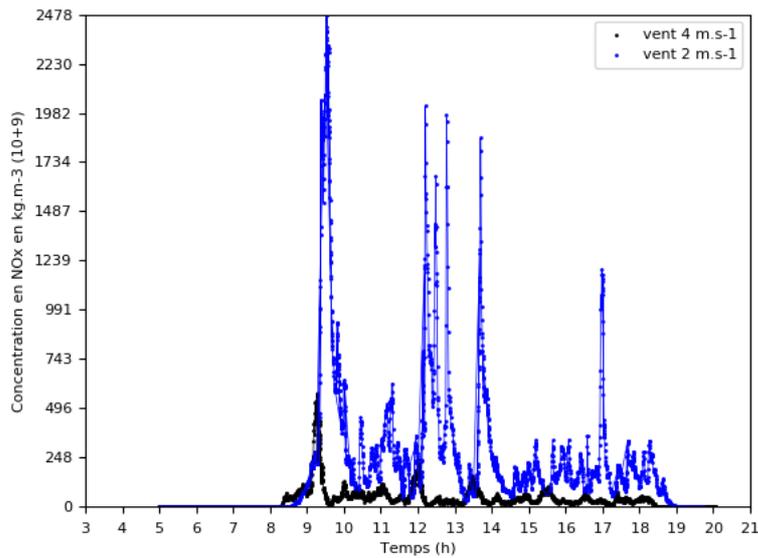


Figure 55. Cas instable avec une variation de la vitesse de vent en amont – Évolution temporelle de la concentration de NO_x (en kg m³, multipliée par un facteur 10⁹) au niveau de la sonde 4. La courbe noire indique les résultats obtenus pour la simulation de référence MNH-IBM (avec une vitesse de 4 m s⁻¹ à 10 m). La courbe bleue indique les résultats obtenus pour la simulation de sensibilité MNH-IBM (avec une vitesse de 2 m s⁻¹ à 10 m).

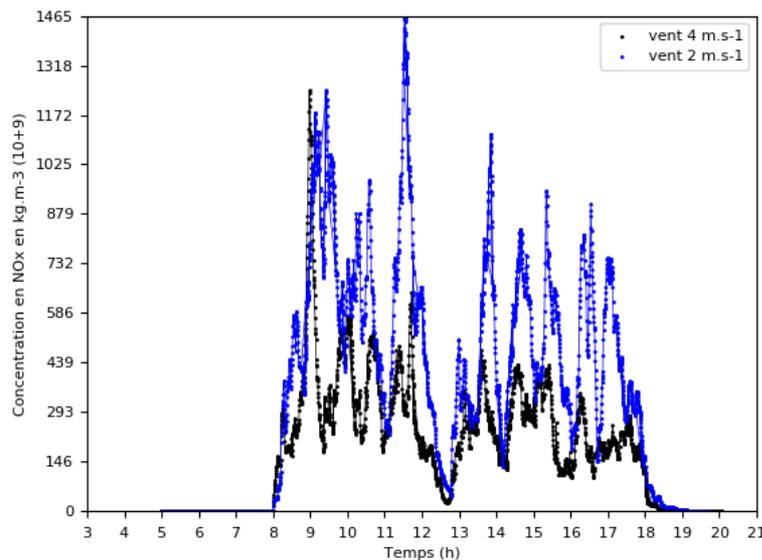


Figure 56. Cas instable avec une variation de la vitesse de vent en amont – Même légende que la Figure 55 mais au niveau de la sonde terminal.

Coupes horizontales horaires

Les Figures 57, 58, 59 et 60 montrent les coupes horizontales horaires de concentration de NO_x en fonction de la vitesse du vent en amont pour le créneau 9 h/10 h. Le seuil d'effets réversibles est atteint au niveau de la piste de décollage, dans la zone Nord-Est de l'aéroport et aux abords du terminal quelle que soit la vitesse du vent. De plus, la concentration de NO_x est supérieure au seuil d'information et de recommandation et même au seuil d'alerte au niveau de la piste de décollage et à proximité du terminal. Quand la vitesse du vent est faible, les zones où les différents seuils étudiés sont atteints sont plus étendues. Les Figures 61, 62, 63 et 64 sont l'équivalent des Figures 57, 58, 59 et 60 pour le créneau 15 h/16 h. Les mêmes conclusions peuvent être établies.

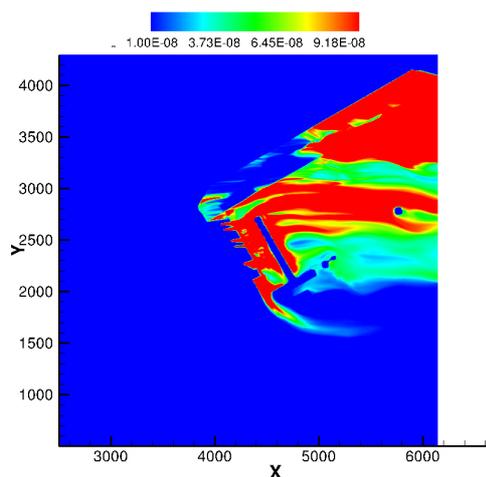


Figure 57. Cas instable de référence (avec une vitesse de vent en amont de 4 m s^{-1} à 10 m) – Moyenne horaire (entre 9 h et 10 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

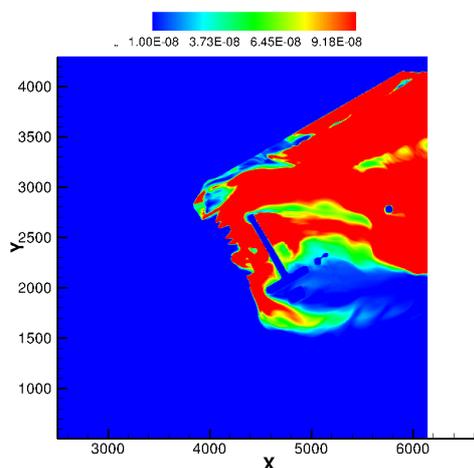


Figure 58. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 58 mais avec une vitesse de vent en amont de 2 m s^{-1} à 10 m .

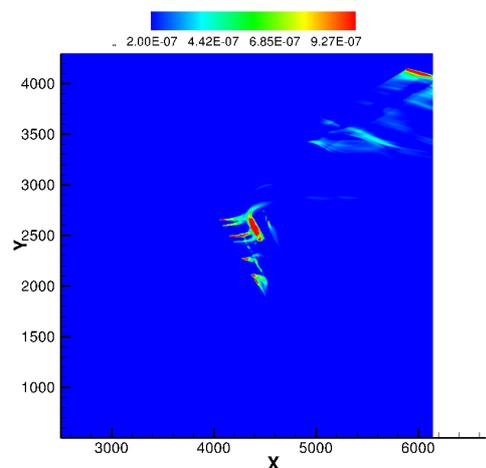


Figure 59. Cas instable de référence (avec une vitesse de vent en amont de 4 m s^{-1} à 10 m) – Moyenne horaire (entre 9 h et 10 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

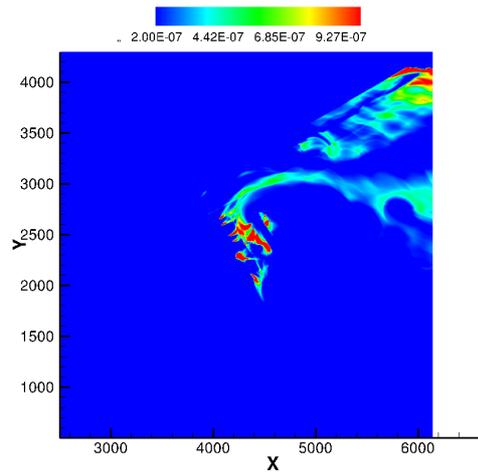


Figure 60. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 59 mais avec une vitesse de vent en amont de 2 m s^{-1} à 10 m .

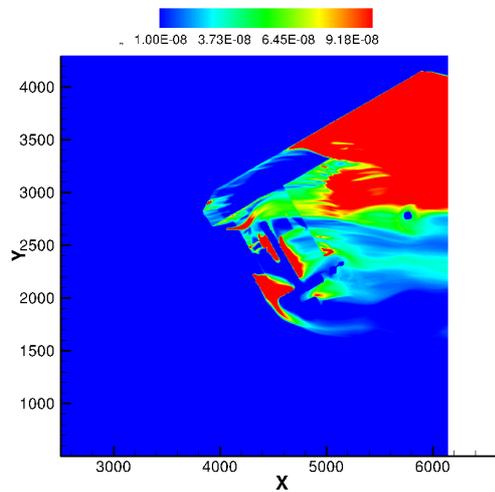


Figure 61. Cas instable de référence (avec une vitesse de vent en amont de 4 m s^{-1} à 10 m) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$.
La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

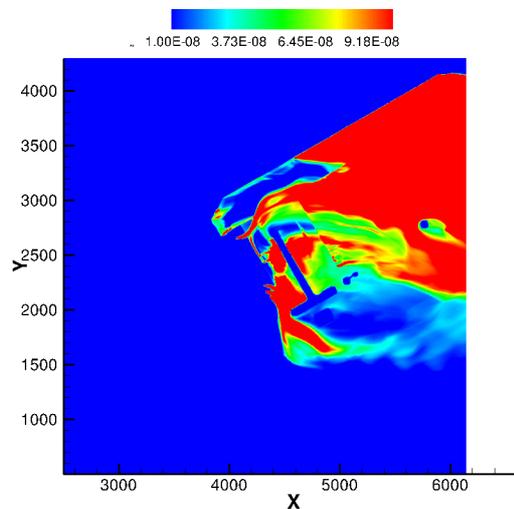


Figure 62. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 61 mais avec une vitesse de vent en amont de 2 m s^{-1} à 10 m .

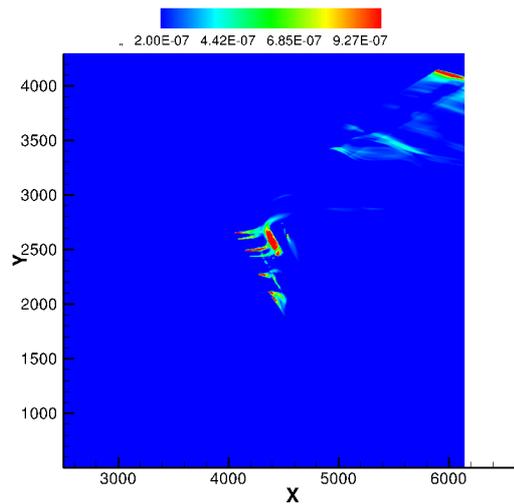


Figure 63. Cas instable de référence (avec une vitesse de vent en amont de 4 m s^{-1} à 10 m) – Moyenne horaire (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3}) à 2 mètres au-dessus du sol, seuillée à $1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$. La composante X correspond à la composante Ouest/Est (m) ; la composante Y correspond à la composante Sud/Nord (m).

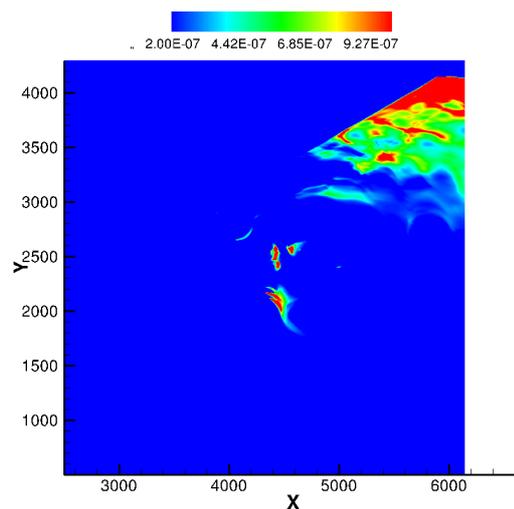


Figure 64. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 63 mais avec une vitesse de vent en amont de 2 m s^{-1} à 10 m .

Profils verticaux horaires

Les profils verticaux sont présentés selon les différentes vitesses de vent aux créneaux horaires 9 h/10 h (Figure 65 pour 4 m s^{-1} , Figure 66 pour 2 m s^{-1}) puis 15 h/16 h (Figure 67 pour 4 m s^{-1} et Figure 68 pour 2 m s^{-1}). Les résultats montrent que la concentration de NO_x évolue de manière similaire avec l'altitude dans les deux créneaux horaires. De plus, la concentration de NO_x pour la sonde 5 (située en amont) est négligeable au regard des concentrations de NO_x simulées à la sonde 1 (située au niveau du terminal) et à la sonde 4 (située en aval).

Sur le créneau 9 h/10 h, la concentration de NO_x est plus importante au niveau de la sonde 1 quand la vitesse de vent est plus élevée. C'est l'inverse qui se produit au niveau de la sonde 4.

Sur le créneau 15 h/16 h, la concentration de NO_x est plus importante au niveau des deux sondes (sondes 1 et 4) quand la vitesse de vent est plus faible. Le seuil d'effets réversibles et le seuil d'information et de recommandation sont atteints au niveau des sondes 1 et 4 quand la vitesse du vent en amont est de 2 m s^{-1} à 10 m . Comme pour l'étude de sensibilité avec ou sans APU, la dispersion verticale est de l'ordre de 30 m au niveau de la sonde 4.

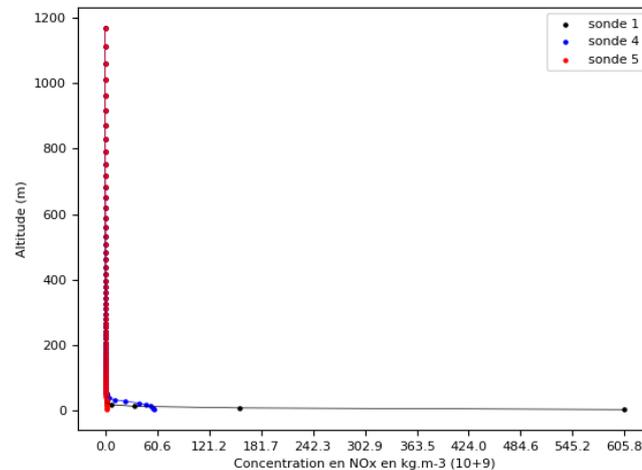


Figure 65. Cas instable de référence (avec une vitesse de vent en amont de 4 m s^{-1} à 10 m) – Profil vertical de la moyenne (entre 9 h et 10 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) pour différentes sondes numériques : la sonde 5 en aval de l'aéroport (en rouge), la sonde 1 au niveau du terminal (en noir) et la sonde 4 en aval de l'aéroport (en bleu).

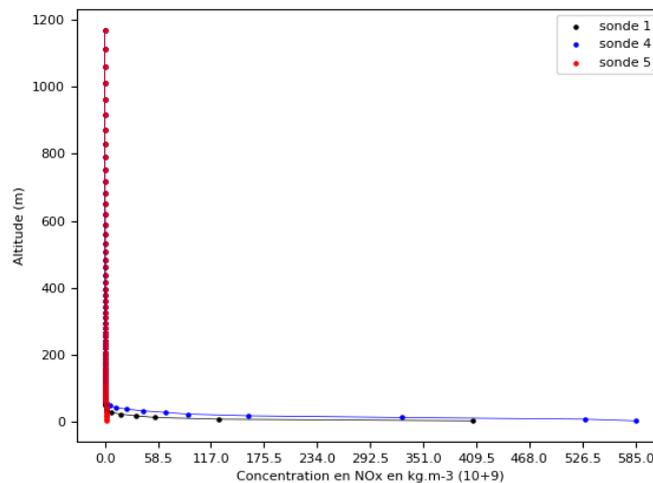


Figure 66. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 65 mais avec une vitesse de vent en amont de 2 m s^{-1} à 10 m .

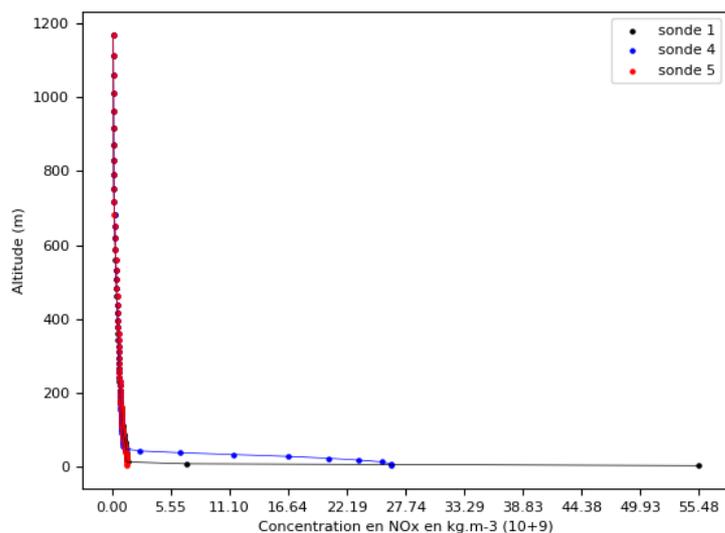


Figure 67. Cas instable de référence (avec une vitesse de vent en amont de 4 m s^{-1} à 10 m) – Profil vertical de la moyenne (entre 15 h et 16 h) de la concentration de NO_x (en kg m^{-3} , multipliée par un facteur 10^9) pour différentes sondes numériques : la sonde 5 en aval de l’aéroport (en rouge), la sonde 1 au niveau du terminal (en noir) et la sonde 4 en aval de l’aéroport (en bleu).

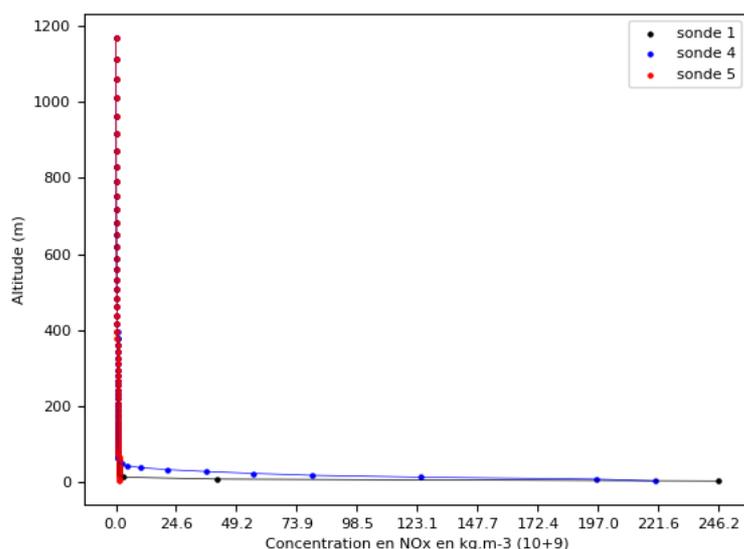


Figure 68. Cas instable de sensibilité – Même légende que la Figure 67 mais avec une vitesse de vent en amont de 2 m s^{-1} à 10 m .

3. Bilan de la situation météorologique instable

Les divers seuils étudiés ici sont atteints, voire même dépassés, au niveau de la piste de décollage, dans la partie Nord-Est de l’aéroport et aux abords du terminal dans le cas instable. Comme dans le cas stable, les émissions des APU entraînent une augmentation importante de la concentration de NO_x . Les mêmes résultats sont obtenus en réduisant la vitesse du vent en amont d’un facteur 2. Cette diminution implique une accumulation des espèces chimiques en basse couche, notamment dans la zone proche du terminal et au niveau de la piste de décollage. Le cas instable peut donc être problématique pour la qualité de l’air, surtout en présence d’APU avec une vitesse de vent faible (ici 2 m s^{-1}).

Conclusions

Le Cerfacs a réalisé les simulations MNH-IBM auxquelles il s'était engagé, soit 3 simulations de référence dans les situations météorologiques stable, neutre et instable et 6 études de sensibilité incluant les émissions des APU, la vitesse du vent en amont et les flux de chaleur sensible en surface. Le lecteur peut se référer au Tableau 1 de l'Introduction pour avoir un récapitulatif de ces simulations réalisées dans le cadre des LOTS 2 et 3 du projet MOSIQAA.

Dans les cas stable et instable étudiés, la concentration de NO_x modélisée dépasse dans de nombreuses situations, plusieurs seuils réglementaires de qualité de l'air. Les valeurs maximales de concentration de NO_x ne sont pas restreintes à une zone mais concernent les zones proches du terminal, des pistes de décollage et en aval dans le Nord-Est du site aéroportuaire. Dans toutes les études de sensibilité, la concentration de NO_x atteint le seuil d'effets réversibles en moyenne horaire. Dans le cas stable, quand le flux de chaleur sensible est faible, le seuil d'information et de recommandation ainsi que le seuil d'alerte sont franchis. Dans le cas instable, quand la vitesse du vent en amont est faible, le seuil d'information et de recommandation peut aussi être franchi.

Dans le cas neutre, la vitesse du vent en amont (10 m s^{-1} à 10 mètres de hauteur) est relativement élevée et est probablement responsable de la dispersion rapide des NO_x , atténuant leur concentration au niveau de l'aéroport. Dans le cas instable, passer la vitesse du vent en amont de 4 à 2 m s^{-1} induit une forte augmentation de la concentration de NO_x , notamment au niveau du terminal. Ce comportement n'est pas observé dans le cas neutre en passant la vitesse du vent en amont 10 à 5 m s^{-1} . La vitesse du vent considérée dans l'étude de sensibilité reste sans doute encore trop importante pour voir un effet significatif sur la dispersion des NO_x .

Dans tous les cas étudiés, l'utilisation des APU implique des émissions de NO_x supplémentaires et ainsi une augmentation de la concentration de NO_x proche de la surface, à l'échelle de l'aéroport CAEPport. Cette augmentation induite par les APU est particulièrement marquée dans les cas stable et instable. Les simulations MNH-IBM réalisées par le Cerfacs montrent ainsi que ne pas utiliser les APU est efficace pour faire baisser la concentration des NO_x à proximité du terminal, notamment dans les cas stable et instable. Ceci peut être une stratégie à envisager afin de maintenir les concentrations en-dessous des seuils réglementaires.

Les simulations MNH-IBM du cas stable ont montré que cette situation météorologique est particulièrement critique vis-à-vis de la qualité de l'air au niveau du CAEPport. Il est reconnu aujourd'hui qu'un cas météorologique stable est propice à des épisodes de pollution et est difficilement modélisable avec des modèles gaussiens utilisés classiquement en qualité de l'air. C'est donc un cas particulièrement intéressant à simuler en mode LES. Le cas stable est toutefois complexe à modéliser, les résultats sont sensibles au flux de chaleur sensible en surface. Il est donc important de pouvoir le calculer avec précision, ou de le déterminer de manière indirecte en diagnostiquant l'évolution de la hauteur de couche limite. Dans un aéroport réel, une mesure de cette hauteur de couche limite apparaît nécessaire pour bien prévoir la dispersion verticale des polluants.

Références

- Auguste, F., and Cariolle, D. (2018) Développements et implémentation de méthodes numériques au sein du code MesoNH en vue des simulations du CAEPport – Lot 1 du projet MOSIQAA. Technical report, CERFACS.
- Auguste, F., and Cariolle, D. (2019a) Simulations numériques de référence avec le code Meso-NH et la méthode des frontières immergées – Lot 2 du projet MOSIQAA. Technical report, CERFACS.
- Auguste, F., Rea, G., Paoli, R., Lac, C., Masson, V., and Cariolle, D. (2019b) Implementation of an Immersed Boundary Method in the Meso-NH model: Applications to an idealized urban like environment. *Geoscientific Model Development*, in press. doi: 10.5194/gmd-2018-7
- Auguste, F., Lac, C., Masson, V., and Cariolle, D. Large eddy simulations devoted to the health impact of pollutant dispersions in cities: the case of the NO₂ plume due to the AZF explosion in Toulouse (21/09/01), In preparation for submission to *Boundary Layer Meteorology*.
- Aumond, P., Masson, V., Lac, C., Gauvreau, B., Dupont, S., and Berengier, M. (2013). Including the drag effects of canopies: real case large-eddy simulation studies. *Boundary Layer Meteorology*, 146: 65-80.
- Bergot, T., Escobar, J., and Masson, V. (2015) Effect of small scale surface heterogeneities and buildings on radiation fog: Large eddy simulation study at Paris Charles de Gaulle airport. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141: 285-298.
- Groupe de travail “GT 3D dispersion”, 2015. Guide de Bonnes Pratiques pour la réalisation de modélisations 3D pour des scénarios de dispersion atmosphérique en situation accidentelle. INERIS, Technical Report No. DRA-15- 148997-06852A.
- Lac, C., Chaboureau, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., and others (2018) Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11: 1929-1969.
- Lafore, J. P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fisher, C., Hèreil, P., Mascart, P., Masson, V., Pinty, J. P., Redelsperger, J.-L., Richard, E., and Vilà-Gueau de Arellano, J. (1998) The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: adiabatic formulation and control simulations. Scientific objectives and experimental design. *Annales Geophysicae*, 16, 90-109.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., and others (2013) The SURFEXv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6: 929-960.
- Mittal, R., and Iaccarino, G. (2005) Immersed Boundary Methods. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37:239-261.
- Tissot, S., and Pichard, A. (2004) Seuils de Toxicité Aiguë du Dioxyde d’Azote. Rapport final INERIS, ETSC.