



HAL
open science

Modélisation de la dispersion du pollen en milieu urbain

Raiarii Levy

► **To cite this version:**

Raiarii Levy. Modélisation de la dispersion du pollen en milieu urbain. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03577143

HAL Id: dumas-03577143

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03577143v1>

Submitted on 16 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg – AIR&D

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Stage réalisé entre janvier 2020 et juin 2020

Auteur : Raiarii LEVY

Spécialisation : Hydraulique Urbaine

FORMATION D'INGÉNIEUR

2017/2020

Promotion Bretagne

Modélisation de la dispersion du pollen en milieu urbain

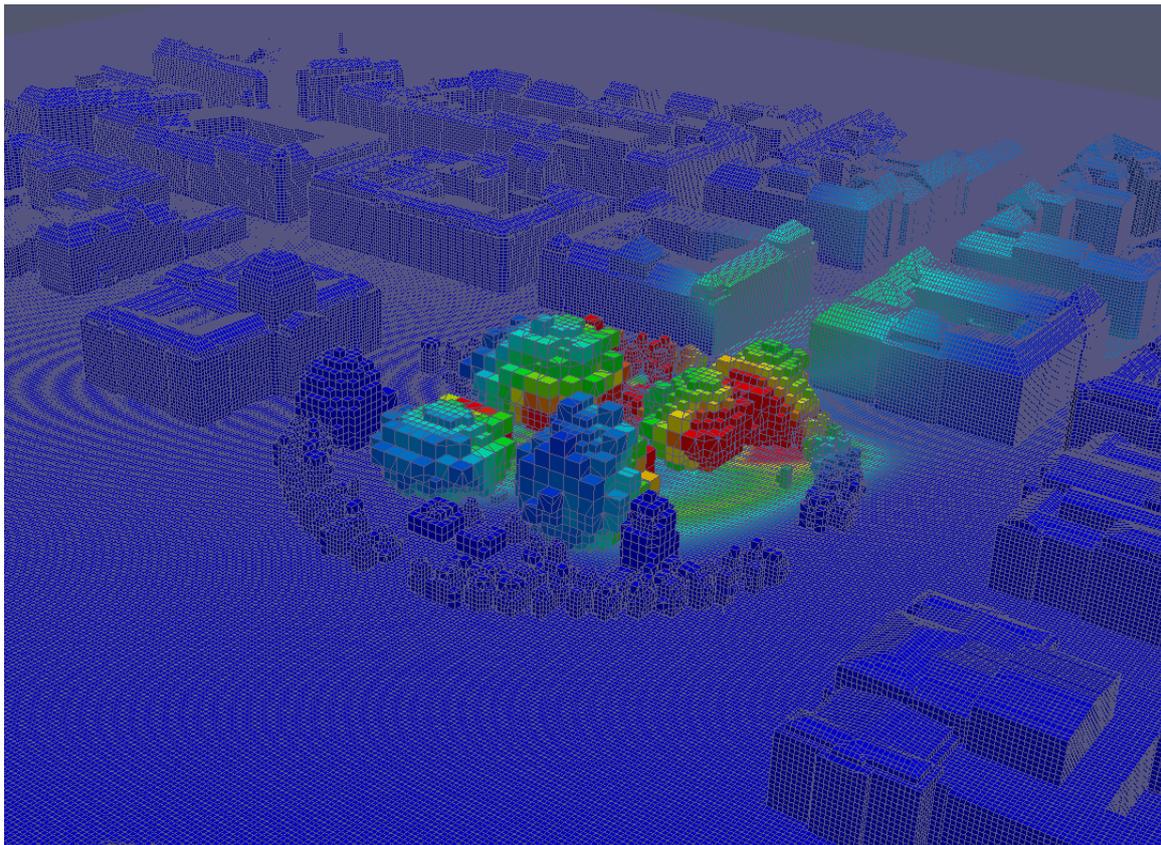


Figure : Exemple de simulation de dispersion du pollen sur l'interface ParaView

Structure d'accueil : AIR&D (32 Rue Wimpeling, 67000 Strasbourg, France)

Maître de stage : Nicolas REIMINGER

REMERCIEMENTS

Les traditionnels remerciements sont de rigueur, car ces six derniers mois furent tout simplement exceptionnels que ce soit d'un point de vue humain avec toutes les personnes que j'ai eu le plaisir de rencontrer et avec qui j'ai pu échanger sur de nombreux domaines et également d'un point de vue intellectuel, car de nombreuses connaissances ont été acquises et une certaine passion s'est confirmée. Ce fut dommage de ne pas avoir pu continuer cette expérience professionnelle en compagnie des autres collègues de bureau au vu de la situation sanitaire avec le confinement. Néanmoins, cela m'a permis de m'adapter au télétravail et à grandir en termes d'autonomie au travail malgré ces derniers mois difficiles.

Pour commencer, je tiens à remercier particulièrement M. Vazquez José, à la fois mon tuteur ENGEES pour ce travail, mon professeur à l'ENGEES qui a cru en moi et qui m'a mis en contact avec l'entreprise AIR&D. Il m'a énormément poussé tout au long de mes années de formations à l'ENGEES. Merci d'avoir été là dans les moments de doute et les moments difficiles où l'on ne sait plus trop quoi faire.

En second lieu, je souhaite remercier M. Reiminger Nicolas qui a accepté d'être mon maître de stage à AIR&D. Je le remercie pour le temps consacré et les connaissances qu'il m'a apportées notamment sur les méthodes de travail d'un ingénieur ainsi que d'un doctorant, sur l'apprentissage de l'outil de modélisation OpenFOAM et également pour sa grande disponibilité.

Je remercie également M. Legorgeu Christophe dirigeant d'AIR&D pour m'avoir fait confiance et également pour m'avoir permis de m'intégrer dans l'équipe.

Un remerciement vient également à tous mes collègues d'AIR&D qui ont également su me faire confiance, pendant ces premiers mois de stage et avec qui j'ai passé de bons moments, j'ai nommé M. Jurado Xavier, ingénieur de projet et doctorant à AIR&D, M. Eckstein Maxime, chargé de développement et Apprenti CDAD, et M. Benmoussa Marouane, Data scientist spécialisé en Intelligence Artificielle (IA).

Je n'oublie pas de remercier l'administration de l'ENGEES pour leur accompagnement pendant mes années dans cette excellente école d'ingénieur ainsi que pour l'aide de M. Godard Jean-Christophe, gestionnaire de patrimoine arboré au sein de l'Eurométropole de Strasbourg dans le cadre de mon projet.

Enfin, je souhaite remercier ma famille, mes amis et tout particulièrement mon chien Phoenix, qui m'ont accompagné tout le long de cette période.

RÉSUMÉ

Titre : Modélisation de la dispersion du pollen en milieu urbain

Ce mémoire présenté pour l'obtention du titre d'ingénieur ENGEES porte sur la modélisation 3D en milieu urbain du transport du pollen à une échelle locale. Après introduction du contexte sanitaire et réglementaire autour de la pollution atmosphérique et tout particulièrement du pollen, il comporte un état de l'art sur la modélisation de sa dispersion. Le mémoire explique le fonctionnement du modèle créé par AIR&D pour les polluants atmosphériques avant d'adapter cette méthodologie au pollen et de l'implémenter dans le code de calcul d'OpenFOAM. Le modèle ainsi créé a été testé et validé sur deux campagnes de mesure réalisées au niveau d'un champ aux États-Unis. Afin de prouver l'opérationnalité d'un tel modèle dans le transport du pollen, un protocole et une méthode de calcul ont été réalisés au sein de la Place de la République à Strasbourg.

ABSTRACT

Titre : Urban pollen dispersion modelling

This document for the ENGEES engineering degree focuses on the 3D modeling in urban areas of pollen dispersion at local scale. After introducing the health and the legal context of atmospheric pollution as well as of pollen, it includes a state of the art on the modeling of its dispersion. In this report, the reader will understand the functioning of the model created by AIR&D following by the adaptation of this methodology to pollen modelling and its implementation in the OpenFOAM calculation code. The model thus created was tested and validated on two measurement campaigns carried out in a maize field in the United States of America. To prove the operability of such a model to disperse pollen, a protocol and a calculation method were carried out at Place de la République in Strasbourg.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS	6
TABLES DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	7
INTRODUCTION	9
PARTIE 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE	11
1.1. LA PROBLÉMATIQUE DU POLLEN	11
➤ 1.1.1. Ses impacts sur la santé.....	11
➤ 1.1.2. Moyens pour limiter ses effets.....	12
1.2. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE.....	13
1.3. ÉTAT DE L'ART SUR LA MODÉLISATION DE LA DISPERSION DU POLLEN	15
PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES	17
2.1. MODÈLE NUMÉRIQUE 3D	17
➤ 2.1.1. Phénomènes physico-chimiques et équations directrices.....	17
➤ 2.1.2. Méthode de résolution RANS.....	18
➤ 2.1.3. Modèle de turbulence $k-\epsilon$	19
➤ 2.1.4. Équation de transport du polluant.....	19
➤ 2.1.5. Effets de la végétation sur l'écoulement.....	20
2.2. OUTILS OPENFOAM	22
➤ 2.2.1. Salome.....	22
➤ 2.2.2. Traitement et exploitation des résultats.....	23
2.3. ANALOGIE POUR LE TRANSPORT DU POLLEN	25
PARTIE 3 : VALIDATION DU MODÈLE	27
3.1. DESCRIPTION DU CAS TEST.....	27
3.2. CRÉATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE	30
➤ 3.2.1. Domaine de calcul.....	30
➤ 3.2.2. Conditions limites du modèle	31
➤ 3.2.3. Modélisation de la végétation.....	33
3.3. VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE	34
➤ 3.3.1. Sensibilité au maillage.....	34
➤ 3.3.2. Validation et optimisation du champ de vitesse	36
➤ 3.3.3. Validation et optimisation du transport du pollen.....	38
PARTIE 4 : CONCEPTION D'UN PROTOCOLE ET D'UNE MÉTHODE DE CALCUL	45
4.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	45
➤ 4.1.1. Localisation du site d'étude	45
➤ 4.1.2. Inventaire des polluants et pertinence de leur suivi.....	46
➤ 4.1.3. Objectifs de l'étude.....	47
4.2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE NUMÉRIQUE UTILISÉE.....	47
➤ 4.2.1. Création du domaine d'étude	47
➤ 4.2.2. Hypothèses de calcul.....	48
4.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES	49
➤ 4.3.1. Résultats numériques de champ de Vitesse.....	49
➤ 4.3.2. Résultats numériques de champ de concentration en pollen.....	50
SYNTHÈSE	52
RÉFÉRENCES	54
ANNEXE	57
SOMMAIRE DES ANNEXES	57

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

FIGURE 1 : PLACE DE LA RÉPUBLIQUE SUR STRASBOURG VU DEPUIS SALOME APRÈS CONVERSION DU FORMAT	22
FIGURE 2 : EXEMPLE DE RÉSULTATS AÉRAULIQUE (M/S) POUR UNE DIRECTION DE VENT DE 0° ET UNE INTENSITÉ DE VENT DE 3 M/S	23
FIGURE 3 : EXEMPLE DE RÉSULTATS DE CONCENTRATION DE POLLUANT (KG/M ³)	24
FIGURE 4 : SCHÉMA EXPLICATIF DU DISPOSITIF DE RELÂCHEMENT ET DE COLLECTE DU POLLEN	29
FIGURE 5 : DÉFINITION DU DOMAINE DE CALCUL	30
FIGURE 6 : PROFIL DE VENT DES DEUX EXPÉRIENCES DU CAS TEST	32
FIGURE 7 : ÉVOLUTION DU LAD D'UN PLANT DE MAÏS EN FONCTION DE LA HAUTEUR	33
FIGURE 8 : MÉTHODOLOGIE DE VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE	34
FIGURE 9 : MAILLAGE DU DOMAINE CHOISI POUR UN NIVEAU DE RAFFINEMENT DE 0,2 M	35
FIGURE 10 : ÉVOLUTION DU CHAMP DE VITESSE EN FONCTION DE L'ALTITUDE POUR DIFFÉRENTS COEFFICIENTS DE TRAÎNÉE C _D – RUN 1....	37
FIGURE 11 : ÉVOLUTION DU CHAMP DE VITESSE EN FONCTION DE L'ALTITUDE POUR DIFFÉRENTS COEFFICIENTS DE TRAÎNÉE C _D – RUN 2....	37
FIGURE 12 : INFLUENCE DU NOMBRE DE SCHMIDT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 3 POUR C _D = 0,2 – RUN 1.	39
FIGURE 13 : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 3 POUR C _D DIFFÉRENT – RUN 2.....	43
FIGURE 14 : LOCALISATION DE LA ZONE D'INTÉRÊT (IMAGE GÉOPORTAIL).....	45
FIGURE 15 : ILLUSTRATION DE LA GÉOMÉTRIE DU MODÈLE (EN ROUGE LE JARDIN DE LA PLACE DE LA RÉPUBLIQUE)	47
FIGURE 16 : ILLUSTRATION DU MAILLAGE DU MODÈLE	48
FIGURE 17 : ROSE DES VENTS MOYENNÉE SUR 20 ANS À ENTZHEIM (MÉTÉO FRANCE)	49
FIGURE 18 : EXEMPLE DE RÉSULTAT AÉRAULIQUE (M/S) POUR UN VENT DE DIRECTION EST DE 20° ET D'INTENSITÉ DE 1,5 M/S	50
FIGURE 19 : EXEMPLE DE RÉSULTATS DE CHAMP DE CONCENTRATION POUR UNE VENT DE DIRECTION EST DE 20° ET D'INTENSITÉ DE 1,5 M/S	51

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : VALEURS LIMITES ET OBJECTIFS DE QUALITÉ DE L'AIR SELON LES DIRECTIVES EUROPÉENNES	13
TABLEAU 2 : LIGNES DIRECTRICES DE L'ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE	14
TABLEAU 3 : CARACTÉRISTIQUES DES DEUX EXPÉRIENCES UTILISÉES POUR LA VALIDATION DU MODÈLE.....	28
TABLEAU 4 : PARAMÈTRES DES ÉQUATIONS DE PROFILS DE VENT	32
TABLEAU 5 : RÉSULTATS DE LA SENSIBILITÉ DES CONCENTRATIONS EN POLLEN AU MAILLAGE	36
TABLEAU 6 : COMPARAISON DES RÉSULTATS DE CHAMP DE VITESSE EN FONCTION DE C _D – RUN 1	38
TABLEAU 7 : COMPARAISON DES RÉSULTATS DE CHAMP DE VITESSE EN FONCTION DE C _D – RUN 2	38
TABLEAU 8 : RÉSULTATS DES FAC2 POUR LES DEUX EXPÉRIENCES, AVEC C _D DIFFÉRENT ET POUR UN S _{CT} VARIANT DE 0,1 À 1,3	41
TABLEAU 9 : RÉSULTATS DES MG POUR LES DEUX EXPÉRIENCES, AVEC C _D DIFFÉRENT ET POUR UN S _{CT} VARIANT DE 0,1 À 1,3	42
TABLEAU 10 : RÉSULTATS DES VG POUR LES DEUX EXPÉRIENCES, AVEC C _D DIFFÉRENT ET POUR UN S _{CT} VARIANT DE 0,1 À 1,3	42
TABLEAU 11 : RÉSULTATS DES INDICES DE PERFORMANCE DU RUN 1 AVEC C _D DIFFÉRENT POUR L'ANALYSE SANS GRAVITÉ	44
TABLEAU 12 : RÉSULTATS DES INDICES DE PERFORMANCE DU RUN 2 AVEC C _D DIFFÉRENT POUR L'ANALYSE SANS GRAVITÉ	44
TABLEAU 13 : INVENTAIRE DES ESPÈCES D'ARBRES AU SEIN DU JARDIN DE LA PLACE DE LA RÉPUBLIQUE - STRASBOURG.....	46

TABLES DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AASQA	Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air
APSF	Association des Pollinariums Sentinelles de France
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
EEA	European Environment Agency
GCI	Grid Convergence Index
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
LAD	Leaf Area Density
LAI	Leaf Area Index
LCSQA	Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air
LES	Large Eddy Simulation
OPALS	Ogren Plant Allergy Scale
OpenFOAM	Open Field Operation and Manipulation
OQA	Objectif de Qualité de l'Air
PM	Particulate Matter
PNSE	Plan National Santé Environnement
RAEP	Risque d'Allergie d'Exposition aux Pollens
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RNSA	Réseau National de Surveillance Aérobiologique
VL	Valeur Limite

LISTE DES SYMBOLES

C_1	Constantes du modèle k- ϵ standard
C_2	Constantes du modèle k- ϵ standard
C_{coarse}	Concentration en pollen dans une maille de taille grossière
C_D	Coefficient de traînée
C_{fine}	Concentration en pollen dans une maille de taille fine
C_p	Capacité calorifique à pression constante
$C_{\epsilon 4}$	Constantes des équations de transport dans le modèle k- ϵ standard
$C_{\epsilon 5}$	Constantes des équations de transport dans le modèle k- ϵ standard
C_μ	Constante en CFD
D_{pollen}	Diamètre du pollen
D_s	Coefficient de diffusion moléculaire
D_t	Coefficient de diffusion turbulente
E_s	Terme d'émission en polluant
F_c	Force de Coriolis
F_d	Terme puits dans le système de Navier-Stokes
g	Accélération de la pesanteur
H_{max}	Hauteur maximale des éléments d'un domaine

H_{moy}	Hauteur moyenne des éléments d'un domaine
j	Flux massique
k	Energie cinétique turbulente
LAD	Densité du feuillage
n	Ordre du schéma numérique
P	Champ de pression
Q	Source de chaleur
r	Ratio entre les dimensions des mailles grossière et fine
s	Polluant / Scalaire passif
Sc_t	Nombre de Schmidt
S_d	Terme puits dans l'équation de transport du polluant
S_k	Terme source des équations de transport du modèle k-ε standard
$S_ε$	Terme source des équations de transport du modèle k-ε standard
T	Champ de température
U	Champ de vitesse
u^*	Vitesse de frottement
V_d	Vitesse de dépôt
z	Altitude
z_0	Longueur de rugosité
$α$	Constante de régression de la loi puissance
$β$	Constante de régression de la loi puissance
$β_d$	Constantes des équations de transport dans le modèle k-ε standard
$β_p$	Constantes des équations de transport dans le modèle k-ε standard
$ε$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
$η$	Viscosité dynamique de l'air
$κ$	Constante de von Kármán
$κ_{k-ε}$	Valeur efficace de la constante de von Kármán
$λ$	Variable de progression de la réaction chimique
$μ_θ$	Conductivité thermique
$ν$	Viscosité cinématique de l'air
$ν_t$	Viscosité cinématique turbulent
$ρ$	Masse volumique de l'air
$ρ_{pollen}$	Masse volumique du pollen
$σ$	Constantes du modèle k-ε standard
$τ_{p,g}$	Terme de sédimentation par la gravité
$ω_r$	Terme source de la réaction
$ω_s$	Vitesse de sédimentation
$\vec{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$	Vecteur X
$ \vec{X} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$	Norme du vecteur X
$\frac{\partial X}{\partial Y}$	Dérivée partielle de X par rapport à Y
$\frac{DX}{DY}$	Dérivée particulaire de X par rapport à Y
$\vec{\nabla}X = \text{grad}(X)$	Gradient de X
$\vec{\nabla} \cdot \vec{X} = \text{div}(X)$	Divergent de X
$\Delta X = \vec{\nabla}^2 X$	Laplacien de X

INTRODUCTION

La qualité de l'air en France et dans le monde est une préoccupation majeure. D'après l'article L. 220-2 du code de l'environnement, une pollution atmosphérique constitue « l'introduction par l'homme, directement ou indirectement ou la présence, dans l'atmosphère et les espaces clos, d'agents chimiques, biologiques ou physiques ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives ». Les pollens peuvent donc également être considérés comme des polluants atmosphériques, car il s'agit d'agents biologiques pouvant provoquer pour certaines personnes une nuisance ou une gêne par son aspect allergène. La modélisation de son transport en milieu urbain en est donc un incontournable pour prévenir la population de sa propagation. Les objectifs attendus par une telle méthode de prévention, sont de localiser les zones de concentrations en pollen issus d'espèces à fort risque allergène dans l'optique d'informer la population des zones sensibles à éviter ou encore d'optimiser l'aménagement de certaines zones pour éviter l'accumulation de pollen dans l'air.

Il s'agit d'un travail de fin d'étude (TFE) pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES. Ce travail a été réalisé au sein de l'entreprise AIR&D (une start-up se spécialisant dans l'étude et le diagnostic de la qualité de l'air en environnement extérieur) à Strasbourg sous la direction de Nicolas Reiminger, ingénieur de projet et doctorant ainsi qu'ancien élève diplômé de l'ENGEES. L'objectif de ce travail de fin d'étude est de déterminer la dispersion du pollen en milieu urbain à l'aide de la modélisation 3D et de l'intégrer dans le modèle utilisé par AIR&D.

Vis-à-vis de cet objectif, plusieurs sous-objectifs et questionnement surgissent : Comment fonctionne le modèle actuellement utilisé par AIR&D ? Est-il applicable pour le transport du pollen ? En quoi ce transport du pollen est-il différent du transport des autres polluants atmosphériques ?

Pour répondre aux différentes questions et objectifs, ce mémoire est séparé en quatre parties distinctes et le lecteur pourra retrouver :

- En partie 1 : Les problématiques qu'engendre le pollen, le contexte légal autour de ce polluant de l'air et l'état de l'art quant à la modélisation de sa dispersion.
- En partie 2 : La description du modèle numérique 3D utilisée par AIR&D et de l'outil OpenFOAM®, suivi d'une analogie avec la dispersion du pollen.
- En partie 3 : L'application du modèle retenu sur un cas test avec deux expériences ainsi que diverses études afin de valider le modèle.

- En partie 4 : L'utilisation du modèle de transport du pollen au sein de la place de la République (Strasbourg) dans le but d'établir un protocole à suivre pour la réalisation d'une étude de la dispersion du pollen.

PARTIE 1 : CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

Avant de s'intéresser au contexte réglementaire et à l'état de l'art de la modélisation de la dispersion du pollen à proprement parlé, certaines notions essentielles à la compréhension des mécanismes et phénomènes liés au pollen devront être expliqués. L'objectif de cette partie est de mettre en avant ces notions afin de comprendre pourquoi le pollen est une nuisance pour la santé et qu'il est justifié d'en venir à la modélisation.

1.1. LA PROBLÉMATIQUE DU POLLEN

Le pollen est une structure complexe chez les plantes qui peut s'apparenter à un grain de poussière à l'œil nu, libéré par les anthères des étamines (partie mâle de la plante) et qui se dépose sur le pistil pour féconder la plante (partie femelle). Le grain de pollen joue un rôle essentiel dans la reproduction de la majorité des plantes qui, selon les espèces, s'effectue par le transport via insectes (entomophilie) ou par le vent (anémophilie). La dispersion du pollen dans l'air correspond simplement au mode de reproduction de certains végétaux, mais ce dernier aura un impact néfaste sur la santé.

> 1.1.1. Ses impacts sur la santé

Les pollens sont responsables de réactions allergiques appelées pollinoses, qui se manifestent principalement par des rhinites saisonnières, par une irritation des bronches et plus rarement par de l'asthme. Tous les pollens ne provoquent pas de réactions allergiques. Pour être allergisant, un grain de pollen doit disposer de substances (protéines ou glycoprotéines) reconnues comme immunologiquement néfastes pour un individu donné. Il est possible de classer le potentiel allergène d'une espèce de pollen en suivant le code de classification OPALS (Ogren Plant Allergy Scale) introduits par M. Ogren Thomas [Ogren, 2015] qui se définit par une valeur comprise entre 1 et 10, Les pollens ayant un bas potentiel de provoquer des réactions allergiques ont un OPALS de l'ordre de 1 à 3. Lorsqu'une même variété de plante est très présente dans un jardin, il peut y avoir un potentiel moyen de causer des allergies : leur OPALS avoisine ainsi 4 à 6. Pour des plantes qui sont classées entre 7 et 10, le risque allergique est très présent et il est conseillé soit d'en planter le moins possible, soit de les remplacer par des espèces moins allergisantes.

Dans le cadre de ce projet, seul les pollens allergisants anémophiles sont étudiés par rapport aux pollens entomophiles. D'une part, par le fait qu'ils sont à l'origine de la majorité des cas de pollinoses puisque leur émission dans l'atmosphère se fait en plus grandes quantités et donc les chances de les respirer sont d'autant plus fortes. D'autre part, le phénomène de transport par l'intermédiaire d'insectes est beaucoup trop hasardeux pour pouvoir être modélisé.

En France, il est estimé qu'une personne sur cinq souffre d'allergie respiratoire liée au pollen [Besancenot, 2007]. Il s'agit aussi de l'une des principales causes de perte de productivité dans le monde. En effet, les allergies respiratoires dégradent la qualité de vie en provoquant les symptômes suivants : fatigue, troubles du sommeil, difficultés de concentration, baisse d'efficacité au travail. De plus, ce phénomène devrait s'amplifier dans les prochaines années à cause du changement climatique. Par conséquent, cette pathologie a un impact non négligeable sur la qualité de vie des Français allergiques et sur les dépenses de santé.

➤ **1.1.2. Moyens pour limiter ses effets**

Étant donné que l'allergie au pollen dépend à la fois de la sensibilité des individus, de la quantité de pollens dans l'air et du potentiel allergisant de chaque plante, il semble important de tenir informée la population sur les risques encourus. Suivant les régions et la météo locale, les saisons d'émissions de pollens peuvent varier. Une surveillance attentive de cet allergène et de leur diffusion dans l'atmosphère est donc indispensable. Si l'information d'alerte aux pollens est délivrée rapidement dans les régions impactées, il est possible d'anticiper les traitements et modifier le comportement des populations atteintes pour la saison pollinique en cours et d'inciter les nouveaux cas d'allergies à une prise en charge pour les années suivantes. Cette surveillance des pollens peut se faire selon plusieurs méthodes différentes : Par observations phénologiques, par l'utilisation de capteurs et par modélisation numérique.

Les observations phénologiques correspondent à l'étude des phases de développements saisonniers des espèces présentant un risque d'allergie. Celles-ci sont très utiles pour la détermination des saisons de pollen dans l'air (floraison, début et fin d'émission de pollens). Elles peuvent être réalisées soit au sein de jardins botaniques ou polliniers, soit en faisant appel à un réseau participatif de pollinariums sentinelles tel que Pollin'air.

Les mesures par capteurs sont aussi un autre moyen de surveiller la propagation des pollens en quantifiant et en identifiant les espèces dont sont issus les grains de pollens (Lify-Air). Ces mesures sont ensuite utilisées afin d'établir des cartes de vigilance sur le risque d'allergie lié à l'exposition aux pollens (RAEP). Cependant, l'usage de la métrologie peut poser plusieurs problèmes. Un capteur est souvent coûteux et en avoir en nombre suffisant afin d'obtenir des données interprétables augmente considérablement le prix de ce moyen de surveillance. De plus, une campagne de mesure peut aussi prendre beaucoup de temps puisque la saison pollinique dure généralement quelques mois. Néanmoins, en couplant cette métrologie avec de la modélisation, il sera possible d'évaluer l'exposition de la population aux pollens et définir des plans d'actions à n'importe quelle échelle, même en cas d'aménagements futurs.

1.2. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

La qualité de l'air est soumise à la réglementation sous trois niveaux imbriqués entre eux : européen, national et local. L'ensemble de ces réglementations ont pour objectif d'évaluer l'exposition de la population et des milieux naturels à la pollution atmosphérique, d'entreprendre des actions afin de limiter cette pollution et d'informer la population sur la qualité de l'air. Au niveau européen, la directive européenne 2008/50/CE prévoit l'élaboration de programmes pour répondre aux objectifs cités précédemment dans les zones où les normes de concentration en polluant atmosphériques sont dépassées.

Au niveau national, les critères de qualité de l'air sont définis dans le code de l'Environnement aux articles R222-1 à R222-3. Ils retranscrivent les directives européennes relatives à la qualité de l'air. L'arrêté du 19 avril 2017 désigne les missions des organismes chargés de coordonner la surveillance de la qualité de l'air ambiant : les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air nommées « AASQA » ainsi que le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air nommé « LCSQA ».

Au niveau local, les régions sont chargées de mettre en place des plans d'actions en cas de dépassement des valeurs réglementaires, qui sont évaluées selon les valeurs suivantes :

- L'Objectif de Qualité de l'Air (OQA), qui correspond à un objectif de concentration permettant d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement sur le long terme.
- La Valeur Limite (VL), correspondant au niveau de concentration limite en polluant à ne pas dépasser pour éviter des procédures contentieuses avec la Commission Européenne.

Les seuils en vigueur par polluant sont disponibles dans l'article R.221-1 du Code de l'Environnement et le Tableau 1 synthétise les différents seuils des principaux polluants (NO₂, PM₁₀ et PM_{2.5}) qu'évaluent AIR&D dans leur expertise.

Tableau 1 : Valeurs limites et objectifs de qualité de l'air selon les directives européennes

Moyenne	VL			OQA
	Annuelle	Journalière	Horaire	Annuelle
NO ₂	40 µg/m ³	-	200 µg/m ³ (ne pas dépasser plus de 18 fois par an)	40 µg/m ³
PM ₁₀	40 µg/m ³	50 µg/m ³ (ne pas dépasser plus de 35 fois par an)	-	30 µg/m ³
PM _{2.5}	25 µg/m ³	-	-	10 µg/m ³

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a publié en 2017 un rapport intitulé « Évolution des valeurs guides de l'OMS sur la qualité de l'air : le passé, le présent et l'avenir » [Maynard et al., 2017] recensant plusieurs concentrations cibles intermédiaires ainsi que les objectifs finaux de concentrations en polluants (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Lignes directrices de l'Organisation Mondiale de la sante

Moyenne	OMS		
	Annuelle	Journalière	Horaire
NO ₂	40 µg/m ³	-	200 µg/m ³
PM ₁₀	20 µg/m ³	50 µg/m ³	-
PM _{2.5}	10 µg/m ³	25 µg/m ³	-

Les pollens sont reconnus comme pollution de l'air par la législation française, en tant qu'agents biologiques (cf. article L.220-2 du code de l'Environnement). Des actions de surveillance, de prévention et de réduction relative à la présence de pollens allergisants dans l'air sont menées à différents échelons. On peut retrouver au niveau national que certaines actions du Plan National Santé Environnement (PNSE) concernent spécifiquement le pollen. Par exemple, l'action n°10 cherche à inciter, dans un premier temps, les collectivités à réduire la présence et le développement de végétaux émetteurs de pollens allergisants et, dans un second temps, à la diffusion d'une information sur le risque allergique et/ou toxique lors de la vente des espèces concernées.

Bien qu'il existe au niveau national un arrêté désignant les missions des organismes chargés de coordonner la surveillance des pollens et des moisissures de l'air ambiant (Arrêté du 5 août 2016) : le Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA), le réseau des AASQA et l'Association des Pollinariums Sentinelles de France (APSF), avec la participation du Ministère des Solidarités et de la Santé et du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire ; il n'existe aucune valeur réglementaire pour évaluer le danger des pollens au niveau local. Comme pour le cas de la qualité de l'air, un nouveau cadre réglementaire qui fixerait ces seuils pour les espèces les plus allergènes serait nécessaire afin d'améliorer la mise en place de plans d'actions.

Le RNSA propose le suivi des taxons dont le risque allergique est élevé et pour les plus répandus en France : Ambrosies, Armoise, Aulne, Bouleau, Charme, Châtaignier, Chêne, Cyprès, Frêne, Graminées, Noisetier, Olivier, Oseille, Peuplier, Plantain, Platane, Saule, Tilleul et Urticacées. Il est possible de s'informer du risque allergique par pollen et en fonction de la ville sur laquelle on se trouve. D'ailleurs, le bulletin allerge pollinique du 29 Mai 2020 sonne l'alerte rouge pour la présence de pollen de graminées dans toute la France.

1.3. ETAT DE L'ART SUR LA MODÉLISATION DE LA DISPERSION DU POLLEN

De nombreuses études concernant le transport du pollen ont été réalisées et il est possible de les classer selon l'échelle spatiale, les processus clés et le domaine d'étude considéré. Tout d'abord, certains scientifiques travaillent sur la construction d'un modèle afin de simuler le phénomène d'émission du pollen en lui-même. [Kawashima et Takahashi, 1999] ont construits un modèle sur le pollen de Cèdre en prenant en compte la température de l'air et les vitesses de vents. [Schueler et Schlünzen, 2006] ont développé un modèle d'émission pour le pollen de chêne avec le comptage des grains et les saisons de floraison en utilisant une courbe polynomiale de quatrième ordre. Quant à [Helbig et al., 2004], son modèle empirique d'émission de pollens de Noisetier et d'Aulne se caractérisent par le flux d'émission annuel qui se déplace sur une longueur caractéristique couplés avec des variables météorologiques (humidité, température et vitesse du vent). Son approche fut modifiée et adaptée par [Efstathiou et al., 2011] pour les pollens de Bouleau et d'Ambroisies.

Après libération, les grains de pollens se dispersent aux alentours de la source par l'effet du vent (échelle locale ≈ 1 km). Ces grains viennent ensuite se mélanger et se disperser au sein de la couche limite atmosphérique (échelle régionale ≈ 100 km). Enfin, lorsque ces déplacements se font jusqu'à la troposphère, il va s'agir d'échelle longue distance (synoptique, continentale et globale) et peut s'étendre de 1000 km jusqu'à plus de 5000 km. Très longtemps, l'étude de la dispersion du pollen à grandes échelles avait pour but de s'intéresser à la fois aux domaines de la santé et dans ceux de la météorologie et climatologie puisqu'il s'agit d'un bon traceur. Dans de rares cas, il a été possible d'effectuer des études sur la propagation de pollens exotiques. Notamment, [Cariñanos et al., 2004] s'intéresse aux évènements de forts vents provenant d'Afrique ayant transporté du pollen de cannabis jusqu'au sud de l'Espagne. De même, [Saarikoski et al., 2007] a étudié le transport de pollen de bouleau depuis la Russie jusqu'en Islande en traversant toute l'Europe.

L'introduction des Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) dans l'agriculture a accru l'intérêt des producteurs, mais aussi des scientifiques à mieux comprendre les avantages et les inconvénients liés à la culture des OGM [Jarosz et al., 2004 ; Dupont et al., 2006]. Les principales questions relatives à l'introduction des OGM sont, sans aucun doute, les risques sur la santé humaine, mais les risques pour les écosystèmes et de leur coexistence entre cultures sont aussi à prendre en compte. Concernant les écosystèmes cultivés, le pollen provenant d'une culture transgénique peut transmettre par fécondation le transgène considéré aux plantes de son environnement, cultivées ou sauvages à une échelle locale.

PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette partie a pour objectif de décrire le code CFD 3D sous OpenFOAM® dont dispose la start-up AIR&D [Reiminger, 2017] pour son expertise environnementale. Après avoir introduit le modèle numérique utilisé et les équations directrices à résoudre pour décrire la dynamique des polluants atmosphériques, l'outil OpenFOAM® et ses fonctionnalités seront présentés puis une analogie sera faite sur la nouvelle équation utilisée afin de décrire la dynamique du pollen cette fois-ci.

2.1. MODÈLE NUMÉRIQUE 3D

La pollution atmosphérique est une problématique récurrente de notre époque et son étude est primordiale afin de protéger les populations actuelles et futures. AIR&D a décidé d'axer son expertise sur la modélisation du transport de masses polluantes à l'échelle urbaine et en 3D. Cependant, la modélisation de phénomènes aussi complexes intervenant dans la pollution atmosphérique a nécessité de faire différents choix pour créer un modèle fiable.

La méthode de modélisation numérique à échelle microscopique utilisée est une méthode de type CFD (Computational Fluid Dynamics). Cette méthode permet la résolution complète des équations de calcul des vitesses du vent sans les hypothèses simplificatrices usuellement admises (c'est-à-dire en ne considérant pas que l'écoulement est uniforme, permanent, etc.). La complexité de l'écoulement et également la turbulence liée à la présence d'obstacles (bâtiments) est enfin prise en compte dans l'évolution du panache de pollution.

➤ 2.1.1. Phénomènes physico-chimiques et équations directrices

Dans le domaine de la pollution atmosphérique, de nombreux composés rentrent en jeu et peuvent se déplacer par advection et/ou diffusion dans l'atmosphère et afin de suivre leur évolution dans l'air, un modèle dit on-line de CFD est employé. Ces modèles sont basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes dont les différentes équations sont décrites ici :

- La conservation de la masse :
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \cdot \vec{U}) = 0$$

Avec ρ la masse volumique de l'air, t le temps et \vec{U} le vecteur du champ de vitesse.

- La conservation de la quantité de mouvement :
$$\rho \cdot \frac{D\vec{U}}{Dt} = -\vec{\nabla} P + \rho \cdot \vec{g} + \rho \cdot \vec{F}_C + \eta \cdot \Delta U$$

On note $\frac{D\vec{U}}{Dt}$ la dérivée particulaire de \vec{U} par rapport au temps tel que
$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{U} \vec{U})$$

Avec η la viscosité dynamique de l'air, P la pression, \vec{g} l'accélération de la pesanteur et \vec{F}_C la force de Coriolis.

- La conservation de l'énergie : $\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \mu_\theta \cdot \Delta T$

Avec C_p la capacité calorifique à pression constante, T le champ de température, Q la source de chaleur et μ_θ la conductivité thermique.

- L'équation réactives de Navier-Stokes : $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \lambda) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \cdot |\vec{U}| \cdot \lambda + j) = \omega_r$

Avec λ la variable de progression de la réaction chimique, j le flux massique et ω_r le terme source de la réaction.

Dans le domaine d'étude d'AIR&D, il a été décidé de s'intéresser à un type bien précis d'écoulements : monophasique (mélange de plusieurs gaz dans l'air), turbulent (par la présence de la couche limite dynamique dû aux effets des frottements générés par la condition d'adhérence du vent au sol), incompressible (puisque l'écoulement considéré présente un nombre Mach de l'ordre de 0,01 Mach, inférieur au seuil de compressibilité de 0,3 Mach [Amiroudine et Battaglia., 2017]) et en régime transitoire (pour observer les instabilités de l'écoulement faces aux bâtiments servant d'obstacles). Sur la base des différentes caractéristiques énoncées précédemment, le système de Navier-Stokes devient :

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{U} \vec{U}) - \nu \cdot \vec{\nabla}^2 U = \frac{-1}{\rho} \vec{\nabla} P \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \end{cases}$$

Avec ν la viscosité cinématique de l'air est définie comme étant le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique de l'air tel que $\nu = \frac{\eta}{\rho}$.

➤ **2.1.2. Méthode de résolution RANS**

L'approche de résolution choisie pour résoudre ce système d'équations de Navier-Stokes est l'approche non-déterministe dite RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) qui cherche à exprimer les équations en prenant les champs moyens de l'écoulement afin d'éviter des calculs de mouvements instantanés. Par rapport aux approches DNS (Direct Numerical Simulation) et LES (Large Eddy Simulation), la démarche RANS permet de gagner du temps de calcul pour une taille de modèle plus conséquente. En revanche, puisque la turbulence est modélisée à la place d'être résolue, de l'erreur numérique supplémentaire est entraînée.

Avec cette méthode de résolution, les variables employées pour caractériser l'écoulement peuvent se décomposer en différents termes en suivant la méthode de décomposition de Reynolds qui consiste à séparer d'un champ X instantanée en un champ \bar{x} dit moyen et un champ x' fluctuant :

$$X = \bar{x} + x'$$

Le nouveau système d'équations de Navier-Stokes moyenné qui en découle est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}\bar{u}) = \frac{-1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \nabla \overline{u'u'} \\ \nabla \cdot \bar{u} = 0 \end{cases}$$

Avec \bar{u} le champ de vitesse moyenne, \bar{p} le champ de pression moyenne et $\nabla \overline{u'u'}$ le tenseur des contraintes de Reynolds.

➤ **2.1.3. Modèle de turbulence k-ε**

Par l'apparition du tenseur des contraintes de Reynolds, la résolution du système d'équations de Navier-Stokes se voit impossible sans choisir un schéma de fermeture des flux turbulents. Les avis quant au modèle de turbulence le plus adapté pour modéliser la pollution atmosphérique divergent entre les modèles principalement utilisés en CWE : k-ε standard, RNG k-ε, realizable k-ε et k-ω SST (Shear Stress Transport). Le modèle le plus utilisé est le k-ε standard [Franke et al., 2004] et il n'est pas moins efficace que les autres [Fiates et al., 2016]. Le choix s'est donc porté sur un modèle de turbulence k-ε standard qui nécessitent de spécifier les variables k (l'énergie cinétique turbulente) et ε (le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente) se calculant de la manière suivante à l'aide de [Richards et Norris, 2011] :

$$\begin{cases} k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \\ \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa \cdot z} \\ \kappa_{k-\varepsilon} = \sqrt{(C_2 - C_1) \cdot \sigma \cdot C_\mu} = 0,4237 \end{cases}$$

Avec u_* la vitesse de frottement, C_μ une constante généralement prise à 0,09 en CFD, $\kappa_{k-\varepsilon}$ la valeur effective de la constante de von Kármán, z l'altitude, C_2 , C_1 et σ , des constantes caractéristiques du modèle k-ε standard valant respectivement 1,92, 1,44 et 1,3.

➤ **2.1.4. Équation de transport du polluant**

Une fois que l'écoulement est bien défini, il est possible d'y transporter un polluant atmosphérique qui va être assimilé à un champ scalaire passif au sein de l'écoulement. Afin de modéliser le transport de ce polluant, il est nécessaire de résoudre l'équation de conservation de la masse en prenant en compte les phénomènes d'évolution du scalaire passif dans le temps, d'advection, de diffusion moléculaire, de diffusion turbulente et d'émission du polluant :

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \vec{v} \cdot (s \cdot \vec{U}) = \vec{v} \cdot \left[\left(D_s + \frac{v_t}{Sc_t} \right) \cdot \vec{\nabla} s \right] + E_s$$

Avec s le champ scalaire représentant la concentration en polluant, \vec{U} le champ de vitesse, D_s le coefficient de diffusion moléculaire, ν_t la viscosité cinématique turbulente dans l'air, Sc_t le nombre de Schmidt et E_s le terme d'émission en polluant.

Le nombre de Schmidt turbulent Sc_t , qui est défini comme étant le rapport entre la viscosité cinématique turbulente dans l'air ν_t (m^2/s) et le coefficient de diffusion turbulente D_t (m^2/s), est utilisé pour caractériser les écoulements de fluides dans lesquels interviennent simultanément viscosité et transfert de matière.

Le modèle de base d'Air&D est constitué de la combinaison de l'équation du transport du polluant avec le système de Navier-Stokes précédemment introduit. En fonction de l'objectif de l'étude sur laquelle ils travaillent, les ingénieurs d'Air&D peuvent utiliser ce modèle en le combinant avec d'autres phénomènes. Par exemple, si de la végétation est impliquée, si une source de chaleur modifie l'écoulement ou bien si la prise en compte du dépôt sur la végétation est un des enjeux, il est possible de modifier les équations précédentes en rajoutant un terme supplémentaire pour prendre en compte ces phénomènes.

➤ **2.1.5. Effets de la végétation sur l'écoulement**

Dans le cas de la végétation, il n'est pas envisageable de représenter un arbre, une haie ou une forêt comme étant un simple mur de la même forme. [Salim et al., 2015] s'est interrogé sur les effets aérodynamiques des arbres sur l'écoulement d'air dans des zones urbaines. Il propose de comparer cette approche avec celle où la végétation est modélisée comme étant un milieu poreux qui laisse passer l'écoulement en le ralentissant tel un frein. Ce phénomène est décrit par deux paramètres qui sont utilisés afin de représenter ce ralentissement : le coefficient de traînée C_D et le LAD (Leaf Area Density) représentant la densité du feuillage. Ces résultats ont prouvé que seule la seconde approche permet de simuler convenablement l'écoulement.

L'influence de la végétation s'observe par l'ajout d'un terme puits dans le système de Navier-Stokes et de termes sources dans les équations de transport du modèle k- ϵ standard [Buccolieri et al., 2019 ; Amarin et al., 2013] :

$$\begin{cases} F_d = -\rho \cdot LAD \cdot C_D \cdot |\vec{U}| \cdot u_i \\ S_k = \rho \cdot LAD \cdot C_D \cdot (\beta_p \cdot |\vec{U}|^3 - \beta_d \cdot |\vec{U}| \cdot k) \\ S_\epsilon = \rho \cdot LAD \cdot C_D \cdot (C_{\epsilon 4} \cdot \beta_p \cdot |\vec{U}|^3 \cdot \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 5} \cdot \beta_d \cdot |\vec{U}| \cdot \epsilon) \end{cases}$$

Avec $|\vec{U}|$ le champ de vitesse ou la norme du vecteur \vec{U} , β_p , β_d , $C_{\epsilon 4}$ et $C_{\epsilon 5}$ des constantes caractéristiques des équations de transport employées dans le modèle de turbulence k- ϵ standard.

La caractérisation du dépôt des polluants atmosphériques sur la végétation fut particulièrement approfondie par Clément VITTEAU pendant son stage de fin d'étude [Vitteau, 2019] à AIR&D et d'après son travail, ce phénomène de dépôt peut être modélisé comme étant un terme puits dans l'équation du transport du polluant.

$$S_d = -LAD.V_d.s$$

Avec V_d la vitesse de dépôt et s le champ scalaire représentant la concentration en polluant.

Son étude a montré quel était le modèle de vitesse de dépôt le plus adapté à utiliser en fonction de la particule ou molécule choisie. La nouvelle équation de transport du polluant atmosphérique est donc la suivante :

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \vec{v} \cdot (s \cdot \vec{U}) = \vec{v} \cdot \left[\left(D_s + \frac{v_t}{Sc_t} \right) \cdot \vec{\nabla} s \right] + E_s - LAD.V_d.s$$

Avec s la concentration en polluant, t le temps, \vec{U} le champ de vitesse, D_s le coefficient de diffusion moléculaire, v_t la viscosité cinématique turbulente dans l'air, Sc_t le nombre de Schmidt, E_s le terme d'émission en polluant et V_d la vitesse de dépôt.

2.2. OUTILS OPENFOAM

L'appellation OpenFOAM vient de l'anglais : Open Field Operation and Manipulation. Il s'agit d'une bibliothèque logicielle en langage C/C++ permettant d'effectuer des simulations multi-physiques principalement axée sur la résolution des équations de la mécanique des fluides. Lors du développement de la start-up, plusieurs logiciels de modélisation avaient été pris en compte : ANSYS - Fluent®, ANSYS - CFX® ou Code Saturne®. Le choix s'est finalement porté sur OpenFOAM étant un logiciel gratuit et open source. De plus, il est possible de développer ses propres « solver » afin de s'adapter aux domaines de prédilection d'AIR&D soit la qualité de l'air en zone urbaine.

➤ **2.2.1. Salome**

La création du domaine d'étude et de la géométrie de la zone d'étude (bâtiments, arbres, champs) se fait via le logiciel Salome®. Si les données 3D des zones d'intérêts sont disponibles, il est toujours possible de les utiliser sur l'interface de Salome®. Toutefois, une conversion des données dans le bon format est souvent nécessaire. Par exemple, dans le cas de la Figure 1, les données 3D des bâtiments et des arbres de la place de la République furent récupérées depuis la cartotheque de l'Eurométropole de Strasbourg¹. Seul le logiciel SketchUp® permettait d'ouvrir ces données et après l'avoir importé sur Autocad, ces données 3D ont été converties dans un format iges compatible avec Salome®.

Avant d'exporter le domaine d'étude dans un format STL, une réflexion est à mener sur les dimensions du domaine d'étude et son orientation pour coïncider avec la direction du vent ainsi que sur le découpage de la zone d'intérêt afin de réduire au maximum le nombre de mailles. Cette partie sera détaillée dans la partie 3.2. Création du modèle numérique plus loin.

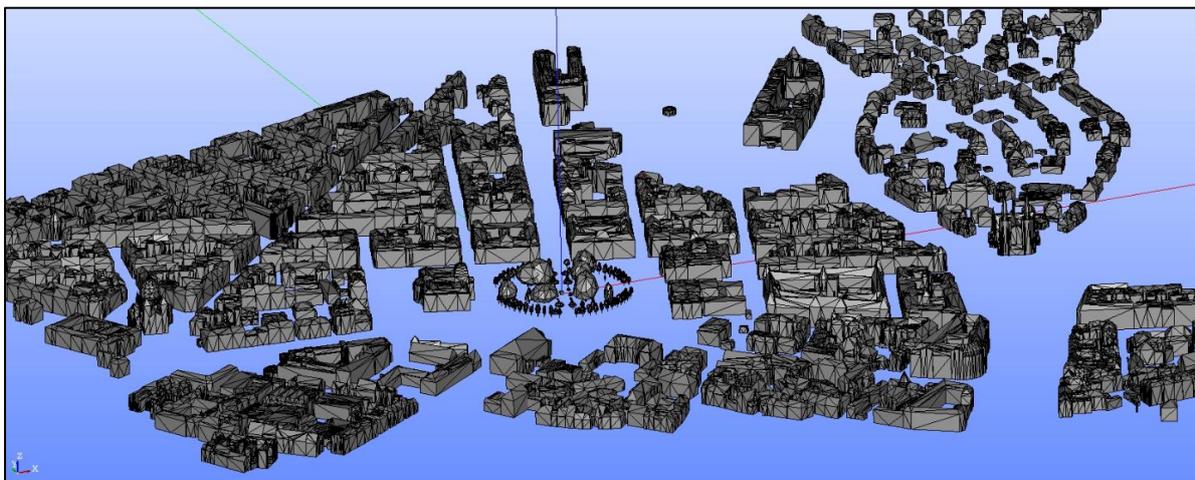


Figure 1 : Place de la République sur Strasbourg vu depuis Salome après conversion du format

¹ <https://data.strasbourg.eu/pages/cartotheque/>

➤ 2.2.2. Traitement et exploitation des résultats

Une fois le calcul est fini, il est possible d'observer les résultats du champ de vitesse au sein du volume de calcul et de la distribution spatiale du polluant dans la zone d'intérêt et à différentes hauteurs sous OpenFOAM via l'interface ParaView. Voici le type de carte qu'on peut obtenir après la simulation (cf. Figure 2 et Figure 3).

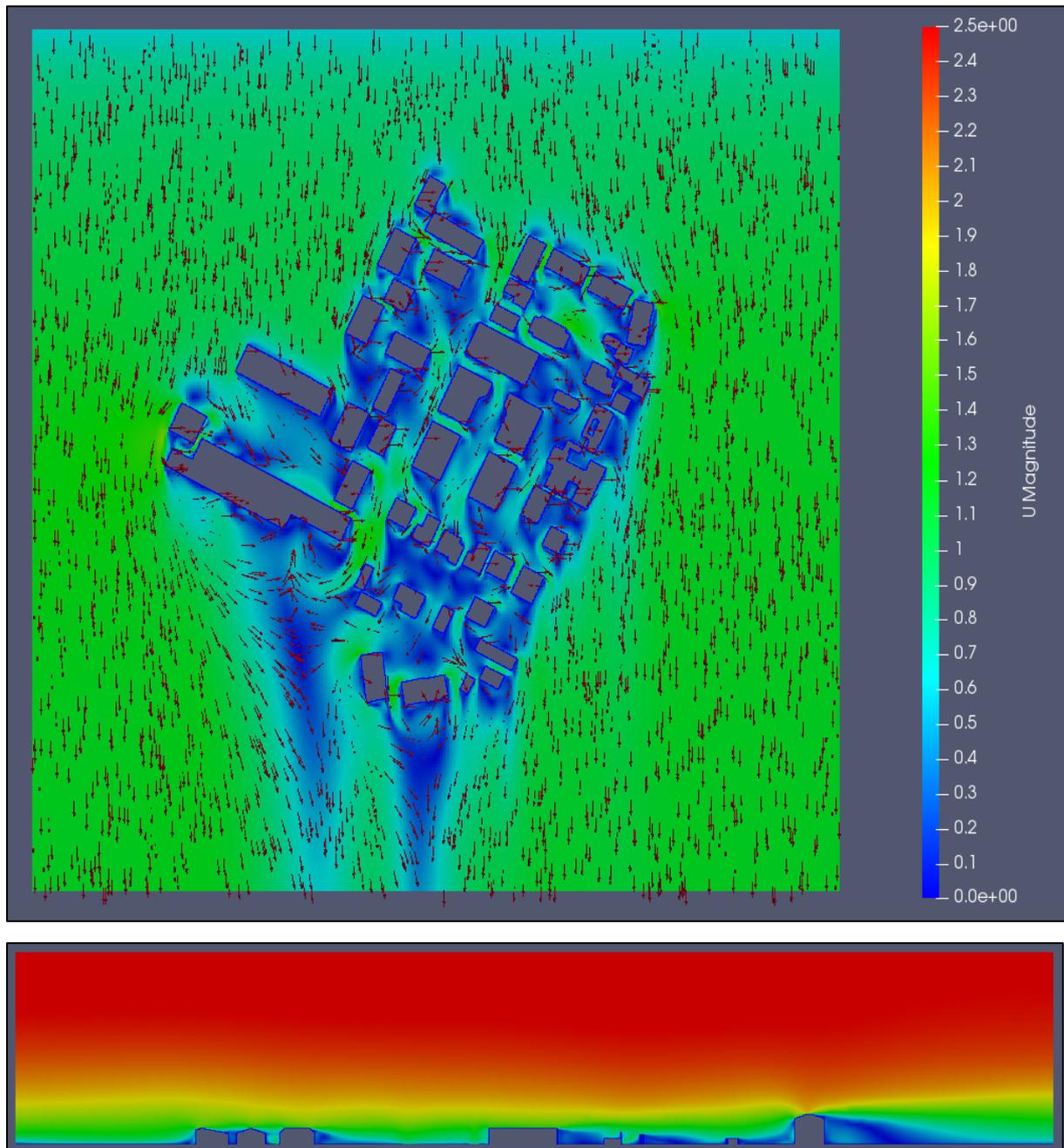


Figure 2 : Exemple de résultats aéraulique (m/s) pour une direction de vent de 0° et une intensité de vent de 3 m/s

Cet exemple de champ de vitesse à 1,5 m d'altitude est issu d'un profil de vent provenant du nord (Direction 0°) avec une intensité de 1,5 m/s à 10 m d'altitude. Ces résultats montrent que le champ de vitesse est bien variable dans la zone d'intérêt par la présence des différents obstacles qui perturbent l'écoulement.

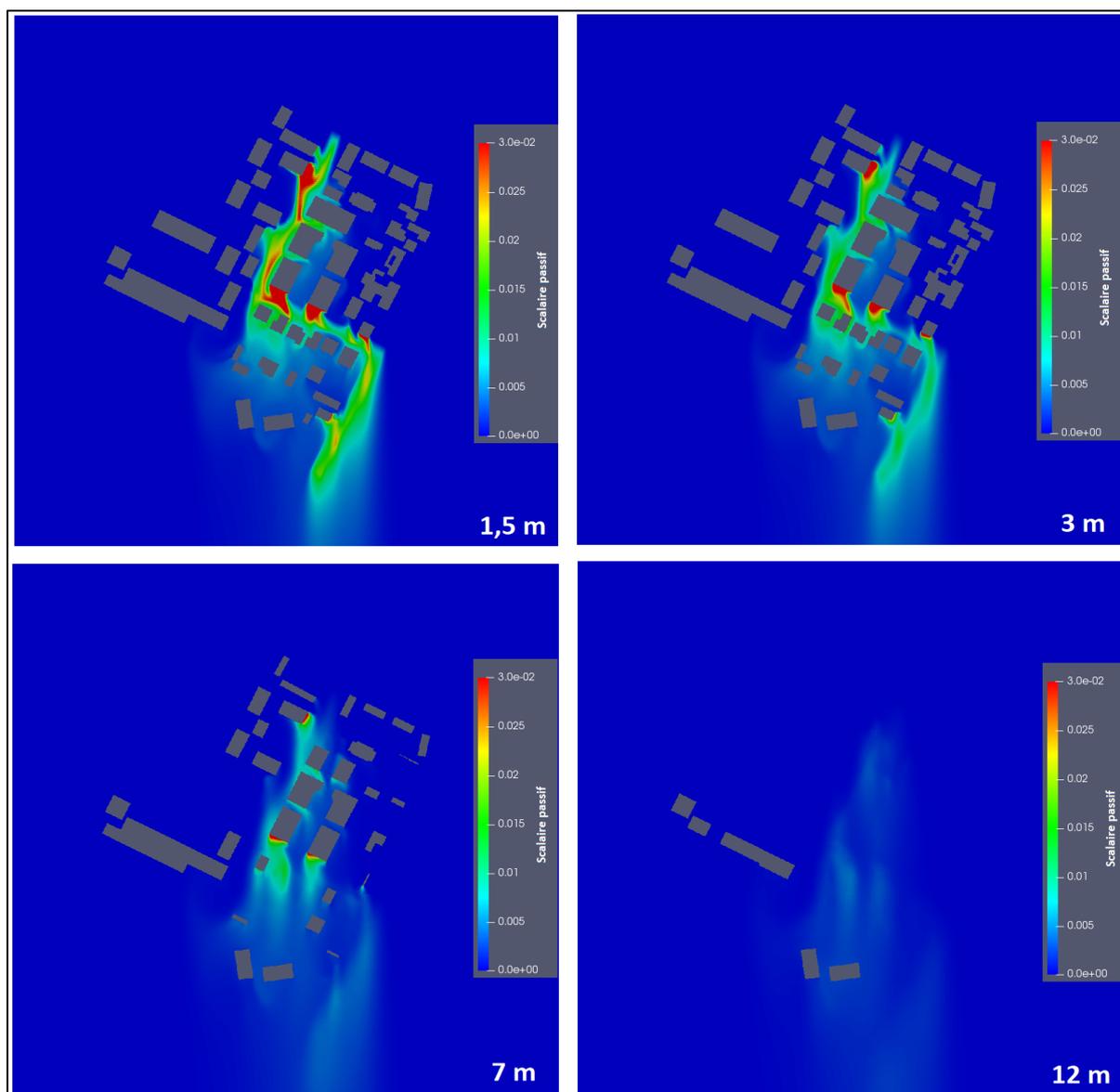


Figure 3 : Exemple de résultats de concentration de polluant (kg/m^3)

Usuellement, la méthode proposée par l'European Environment Agency (EEA) dans le guide intitulé « EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016 » [EEA, 2016] permet de prendre en compte les émissions des principaux polluants liées au moteur et à l'abrasion des pneus des véhicules, de leurs freins et du revêtement routier pour les particules. Par l'analyse de données routières comme les types de véhicules, les carburants utilisés, les caractéristiques de la route ou le passage horaire de véhicule et les vitesses observées, il est possible de calculer les émissions moyennes annuelles de nos principaux polluants. La Figure 3 correspond aux résultats de simulations à plusieurs hauteurs de la dispersion d'un scalaire passif dont le terme d'émission est réglé à 1. Une fois que les résultats des simulations sont combinés pour toutes les directions dominantes de vent, il est possible de comparer les concentrations des polluants simulés avec les normes en vigueur et si besoin, de proposer des aménagements afin de réduire la pollution atmosphérique.

2.3. ANALOGIE POUR LE TRANSPORT DU POLLEN

L'essentiel de ce qui a été décrit dans cette partie a été uniquement orienté pour le transport de polluant atmosphérique comme les particules fines (PM₁₀ et PM_{2.5}). Dans le cadre de l'étude de la qualité de l'air, les particules en suspension sont souvent désignées par l'abréviation « PM » qui signifie « Particulate Matter » en anglais. L'appellation « PM₁₀ » ou « PM_{2.5} » désignent les particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm et 2,5 µm respectivement. Un grain de pollen est une particule beaucoup plus grande que ces PM. À la différence des PM_{2.5} et PM₁₀ dont le diamètre est inférieur à 10 µm, le pollen possède un diamètre de quelques dizaines à une centaine de micromètres (µm). Par conséquent, l'action de la pesanteur est à rajouter dans les phénomènes à prendre en compte dans le transport du pollen. En effet, à la place d'un simple vecteur vitesse \vec{U} dans le terme d'advection, un nouveau vecteur \vec{V} rentre en jeu en faisant apparaître l'effet de la gravité tel que $\vec{V} = \vec{U} + \tau_p \cdot \vec{g} = \vec{U} - \omega_s \cdot \vec{z}$.

Avec $\tau_p \cdot \vec{g}$ le terme de sédimentation par la gravité et ω_s la vitesse de sédimentation définie avec la loi de Stokes issue de [Salesky et al., 2019] telle que $\omega_s = \frac{\rho_{pollen} \cdot g \cdot D_{pollen}^2}{18 \cdot \eta}$ avec ρ_{pollen} la masse volumique du pollen, g l'accélération de la pesanteur, D_{pollen} le diamètre du pollen et η la viscosité dynamique de l'air.

De plus, la diffusion moléculaire étant un transport de matière sous l'effet de l'agitation thermique qui ne concerne que les molécules, le terme faisant intervenir le coefficient de diffusion moléculaire D_s sera donc retiré de l'équation de transport du polluant.

Quant au terme de dépôt sur la végétation, celle-ci est identique à la formulation pour les polluants atmosphériques excepté que la vitesse de dépôt est remplacée par la vitesse de sédimentation introduit avant. Dans [Pan et al., 2014], il existe une condition de vitesse critique pour laquelle les particules se déposent sur des surfaces horizontales ou sont remises en suspension. [Dupont et al., 2006] fait uniquement apparaître dans l'équation un coefficient de taux de re-suspension mais la formulation est la même. Ces deux auteurs introduisent aussi le phénomène d'impaction inertielle sur des surfaces verticales, mais il a été décidé dans la suite de l'étude de ne pas représenter ce phénomène.

Finalement, voici ce que donne l'équation de transport du pollen :

$$\frac{\partial s_p}{\partial t} + \vec{v} \cdot (s_p \cdot \vec{V}) = \vec{v} \cdot \left(\frac{v_t}{Sc_t} \cdot \vec{\nabla} s_p \right) + E_s - LAD \cdot \omega_s \cdot s_p$$

Avec s_p la concentration en pollen, t le temps, \vec{V} le champ de vitesse, v_t la viscosité cinématique turbulente dans l'air, Sc_t le nombre de Schmidt, E_s le terme d'émission en pollen et ω_s la vitesse de sédimentation.

PARTIE 3 : VALIDATION DU MODÈLE

Cette partie a pour but de valider le nouveau modèle implémenté sur des données expérimentales. Cette validation permettra de juger de la justesse et la pertinence du modèle de transport du pollen. Le cas test utilisé pour la validation sera d'abord présenté. Le modèle numérique ainsi que les conditions limites choisies le seront également. La comparaison des résultats expérimentaux et numériques permettra ou non de valider modèle numérique créé. Enfin, la sensibilité globale du modèle de dispersion sera évaluée.

3.1. DESCRIPTION DU CAS TEST

Le choix du cas test se base sur de nombreux critères et celui qui a été utilisé dans le cadre de ce projet en remplissait la majorité. Tout d'abord, il faut savoir qu'il n'était pas possible d'effectuer soi-même une expérience de relâchement et de collecte du pollen afin d'observer le transport de celui-ci par manque de temps et d'équipements. La seule solution était de chercher dans les précédentes études réalisées sur le transport du pollen, une expérience avec un niveau de détails élevés pour pouvoir utiliser les résultats. Très peu de cas portaient sur une étude à échelle locale puisque la majorité des recherches sur le transport du pollen se sont portés à une échelle régionale voire sur de longue distance. Grâce au développement d'organismes génétiquement modifiés, de nouvelles études se sont portées sur l'impact d'accouplement entre différentes espèces qu'elles soient des OGM ou non. Le transport du pollen issus de tels organismes pouvant poser des problèmes, de nombreuses études à échelle locale sont apparues. De plus, dans certains cas, la géométrie du site d'étude était mal précisée, ou certaines données de mesure du vent, de concentrations étaient manquantes. Le cas test choisi était bien complet, à la fois sur les données de vent mais aussi sur une multitude de points de mesure avec différentes hauteurs. Ce dernier n'a pas été mené dans un milieu urbain, ce qui aurait été préférable pour se rapprocher le plus possible de l'étude dans la partie suivante qui a pour objectif d'analyser le transport du pollen au sein de la place de la République à Strasbourg. Néanmoins, il s'agit aussi d'un avantage puisqu'il fait clairement apparaître l'influence de la végétation sur le transport du pollen. Étant donné que la végétation a une place majeure dans un milieu urbain, il semblait judicieux de pouvoir en tenir compte lors de cette étude. Par chance, l'entreprise AIR&D possède déjà le savoir-faire pour étudier le transport des polluants atmosphériques avec pour obstacle, de la végétation.

L'expérience de relâchement et capture de pollen choisi [Gleicher et al., 2014] a été menée entre juin et juillet 2011 dans un grand champ planté de Maïs (*Zea mays* L.) près de Mahomet, une petite ville américaine du comté de Champaign dans l'État d'Illinois. Le site expérimental s'étendait à 120 m au Sud et à 500 m depuis la bordure ouest du champ.

Deux expériences avec des conditions expérimentales différentes ont été menées et leurs caractéristiques sont décrites dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques des deux expériences utilisées pour la validation du modèle

	Date	Temps (EDT)	h (m)	LAI	Direction du vent Φ (°)	u^* (m/s)	Q_{S1} (spores/s)	Q_{S2} (spores/s)	Q_{S3} (spores/s)
Run 1	09-juil	14:55-15:25	1,93	3,3	5,8	0,41	4,18E-04	8,36E-04	6,27E-04
Run 2	10-juil	11:43-12:13	2,05	3,3	-2,4	0,51	9,40E-04	4,18E-04	6,79E-04

Dans ce type d'expérience, les données généralement attendues sont la vitesse du vent et la concentration en pollen. Pour ce faire, différents instruments de mesures ont été nécessaires.

Cinq 3D Campbell CSAT3 sonic anemometers² ont été utilisés pour mesurer les trois composantes de la vitesse du vent et la température de l'air à des hauteurs différentes (0,70, 1,40, 2,10, 2,80 et 3,50 m). D'après les données techniques du constructeur, tant que les vitesses mesurées sont inférieures à 30 m/s, l'instrument mesure la vitesse avec une incertitude de 0,12 m/s.

Le pollen utilisé est issu d'une plante du genre *Lycopodium* dont les caractéristiques ont été prises dans d'autres études ; on retrouve son diamètre $D_{pollen} = 32,8 \mu\text{m}$ [Ferrandino et Aylor, 1985] et sa masse volumique $\rho_{pollen} = 1,15 \text{ g/cm}^3$ [Petroff, 2005]. Comme dans beaucoup d'études du transport du pollen, il est nécessaire d'en caractériser les propriétés qui sont spécifiques à l'espèce dont sont issus les pollens. Le diamètre proposé pour le pollen de *Lycopodium* correspond aux ordres de grandeurs. Une base de données de l'INRA répertorie le diamètre de nombreuses espèces d'arbres et de fleurs³. Quant à la masse volumique, aucune base de données semblable n'a été trouvée donc le seul moyen est de trouver dans la littérature ces valeurs comme pour le pollen de Maïs $\rho_{pollen} = 1140 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ [van Hout et Katz, 2004] ou celui de l'Amarante de Palmer $\rho_{pollen} = 1218 \text{ kg/m}^3$ [Sosnosky et al., 2009].

Pour chacune de ces expériences, du pollen de *Lycopodium* a été coloré en trois couleurs différentes (rouge, jaune et bleu) et ensuite relâché à des hauteurs différentes (0,70, 1,40 et 2,10 m) à l'aide de trois entonnoirs Büchner de 150 mL de volume. Quant au dispositif de collecte du pollen, ce dernier est placé à l'intérieur du champ de maïs. Il est composé de trois rangées de pôles, situées à 2, 4 et 8 m de la source de relâchement du pollen. Sur une même rangée, trois pôles étaient espacés de 0,762 m chacun et sur chacun d'entre eux, il y avait cinq collecteurs placés aux mêmes hauteurs mesurées par les anémomètres.

À la fin des expériences, le pollen restant dans le dispositif de relâchement est pesé afin d'en déduire le débit du pollen relâché à chaque hauteur. Le nombre de spores contenu dans les collecteurs a été énuméré à l'aide d'un microscope pour déterminer la concentration du pollen de

² <https://www.campbellsci.fr/csat3>

³ <http://www.apibotanica.inra.fr/>

Lycopodium présent aux différents points de mesure. La Figure 4 représente le dispositif expérimental dans son ensemble.

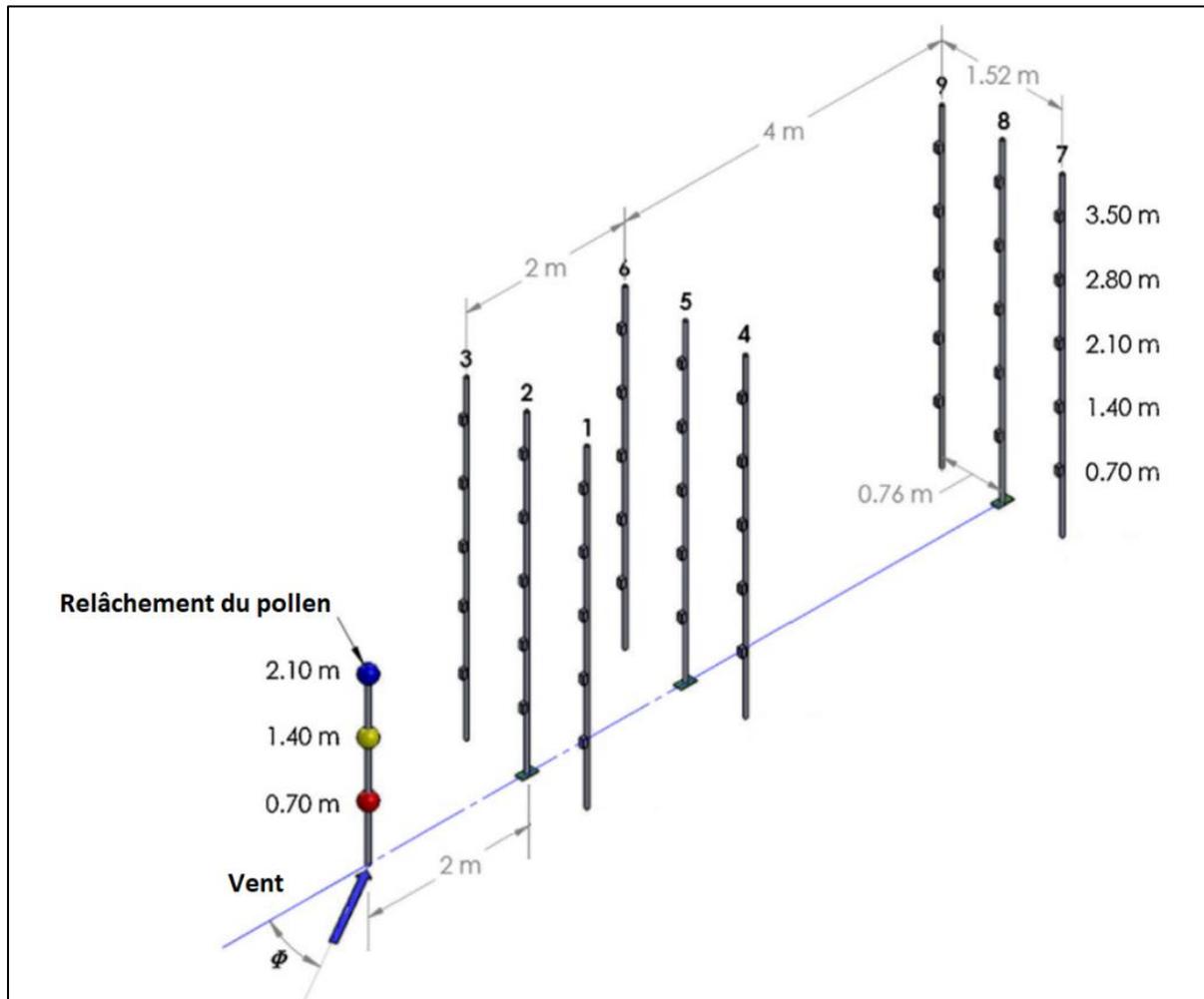


Figure 4 : Schéma explicatif du dispositif de relâchement et de collecte du pollen

En ce qui concerne le champ en lui-même, les rangées de maïs sont orientées dans la direction nord-sud. La densité moyenne des plants était à peu près de 10,5 plantes/m² avec un espacement de 0,762 m entre les rangées et de 0,125 m entre chaque plante. Le champ était géré en utilisant des techniques standards de production. Au début de l'expérience, 5 plants de maïs représentatif du champ ont été marqués afin de suivre leur croissance. Un 6^{ème} spécimen a été retiré du champ pendant l'expérimentation afin de déterminer la densité du feuillage (LAD) à l'aide du LICOR Area Meter (LI300) et d'en déduire le LAI (Leaf Area Index). Toutes les données de vitesse du vent, du LAD pour chacune des expériences et les concentrations en pollen présents aux différents pôles et pour chacune des expériences n'étaient accessibles que sous forme de graphique. Afin de retrouver l'ensemble des données de mesures des expériences, le logiciel WebPlotDigitizer⁴ a été utilisé.

⁴ <https://apps.automeris.io/wpd/>

3.2. CRÉATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

➤ 3.2.1. Domaine de calcul

La première étape de la modélisation est la création du domaine d'étude avec l'ensemble des éléments à représenter (bâtiments, arbres, etc.). La création du domaine d'étude et de la géométrie du champ est réalisée à l'aide du logiciel de représentation 3D Salome®. En revanche, une étude préalable est nécessaire sur le choix des dimensions du domaine d'étude et sur ce qui est important de détailler ou non. Les dimensions du domaine de calcul sont des paramètres majeurs pour une modélisation représentative du cas test. En effet, il doit être suffisamment grand autour de la zone d'intérêt afin d'obtenir un écoulement d'air représentatif de la réalité. Une distance trop faible entre l'injection d'air et la zone d'intérêt ne permet pas d'obtenir un profil de vitesse développé dû aux effets de bords. De même, si les distances minimales de modélisation ne sont pas respectées entre la zone d'intérêt et le toit du modèle, il pourrait y avoir une accélération de l'écoulement. Selon les recommandations de [Franke et al., 2007], les distances minimales à appliquer à la zone d'intérêt dépendent de la face du domaine en question et sont résumées dans la Figure 5.

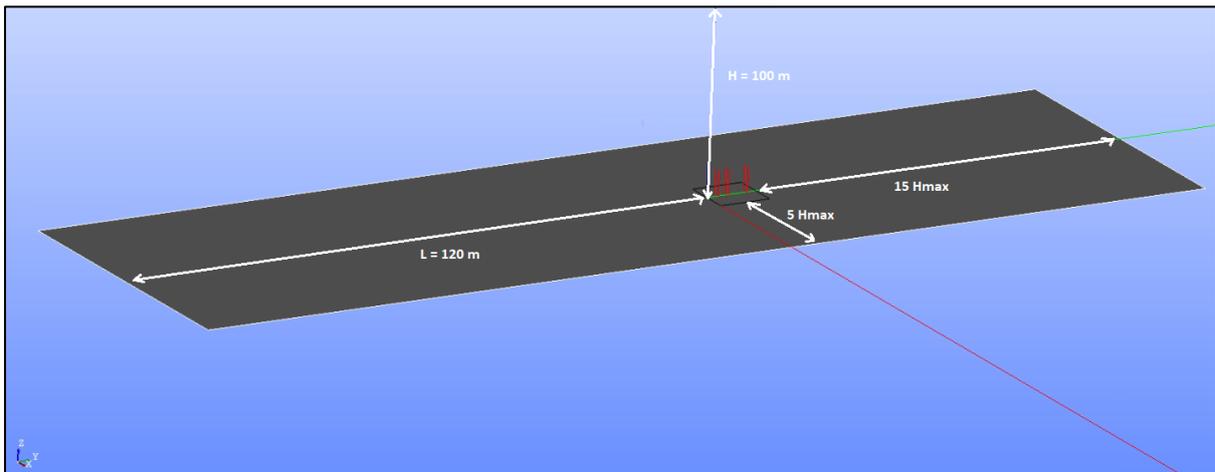


Figure 5 : Définition du domaine de calcul

La zone d'intérêt considérée s'étend à 10 m de longueur et de largeur ainsi que sur 5 m de hauteur, correspondant à la hauteur des spécimens de maïs. Étant donné que la bordure sud du champ est connue à 120 m de la zone d'intérêt, il va s'agir de la limite du modèle en amont. Cette dernière est primordiale car c'est de cette face que sort l'écoulement et elle sera utilisée pour déterminer le profil de vent à mettre en condition limite plus loin.

Les distances minimales à appliquer aux faces latérales sont de $5 \times H_{\max}$ avec H_{\max} considéré comme la hauteur maximale du champ. En ce qui concerne la face dans le sens de l'écoulement, elle s'étend à $15 \times H_{\max}$ puisque ce qui nous intéresse est l'étude de l'écoulement dans la zone d'intérêt.

Le choix de la hauteur du domaine s'est surtout fait en considérant les bâtiments ou arbres alentours de l'ordre de 20 m ce qui donne une distance minimale entre le sol et la face supérieure du domaine de l'ordre de 100 m.

Un des inconvénients à avoir un domaine de calcul trop grand est qu'il va falloir modéliser ce grand espace et plus le domaine est grand, plus le temps de calcul est long. D'où l'intérêt de simplifier et de réduire le plus possible le domaine de calcul. Ici, la modélisation se fait sur une partie du champ en question et non sur sa totalité, car le terrain est assez homogène pour s'en passer et puisque les distances minimales de domaines sont respectées, les résultats de la modélisation seront réalistes.

➤ **3.2.2. Conditions limites du modèle**

Une bonne définition des conditions limites est également essentielle pour bien représenter la réalité. La zone de mesure au niveau des dispositifs de relâchement et de collecte du pollen se trouve éloignée de 120 m de la limite du domaine d'où part le flux d'air. La condition limite à choisir pour cette face est un velocity-inlet afin d'y envoyer un profil de vitesse réelle. La condition limite de la face opposée à l'entrée d'air sera représenté par un pressure-outlet pour permettre la libre circulation de l'écoulement en sortie. Les faces latérales et la face du haut auront ici une condition limite dite de symmetry. Enfin, la face au sol sera représentée par un wall. Un des inconvénients du placement du dispositif de mesure du vent est que pour valider le modèle, il faut retrouver le profil de vent situé dans la zone d'intérêt en envoyant en entrée un tout autre profil. Pour cela, il a été nécessaire de reconstruire le profil observé dans l'expérimentation en le fragmentant en 2 parties : la partie supérieure correspondant au profil du vent sans obstacle et la partie inférieure où se situent les maïs. Pour reconstruire les différents profils de vent, les données de l'expérimentation seront utilisées. Tous les points inférieurs à 2,1 m seront utilisés pour retrouver l'équation à l'intérieur du champ alors que tous les points supérieurs à 2,1 m serviront à retrouver l'équation au-dessus du champ ; avec le point en $z = 2,1$ m, la liaison entre les deux profils.

À l'intérieur du champ, le profil de vent peut se retrouver à l'aide d'une courbe de tendance sur les données situées à 0,7, 1,4 et 2,1 m. L'équation suit la forme suivante :

$$U_{int}(z) = \alpha \cdot z^\beta$$

Au-dessus du champ, le profil du vent généralement utilisé dans la dispersion des polluants atmosphériques est logarithmique [Tominaga et al., 2008] et s'exprime de la manière suivante :

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z - z_0}{z_0}\right)$$

Avec u_* la vitesse de frottement, κ la constante de von Kármán ($\kappa = 0,41$), z l'altitude et z_0 la longueur de rugosité.

Dans le cas de terres agricoles ouvertes sans clôtures ni haies, la valeur de la longueur de rugosité⁵ est de $z_0 = 0,03$ m. Pour déterminer l'équation au-dessus de la canopée, un solveur est utilisé pour déterminer la vitesse de frottement u_* adéquate pour chacune des expériences. Les différents paramètres pour retrouver les équations sont inscrits dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Paramètres des équations de profils de vent

	α (s^{-1})	β	u_* (m/s)
Run 1	0,1444	3,1185	0,1052
Run 2	0,163	3,0459	0,1309

Finalement, la courbe obtenue pour représenter le profil de vitesse global peut s'observer dans la Figure 6. La première expérience appelée « Run 1 » est représentée par des carrés et la seconde expérience « Run 2 » est quant à elle représentée par des losanges.

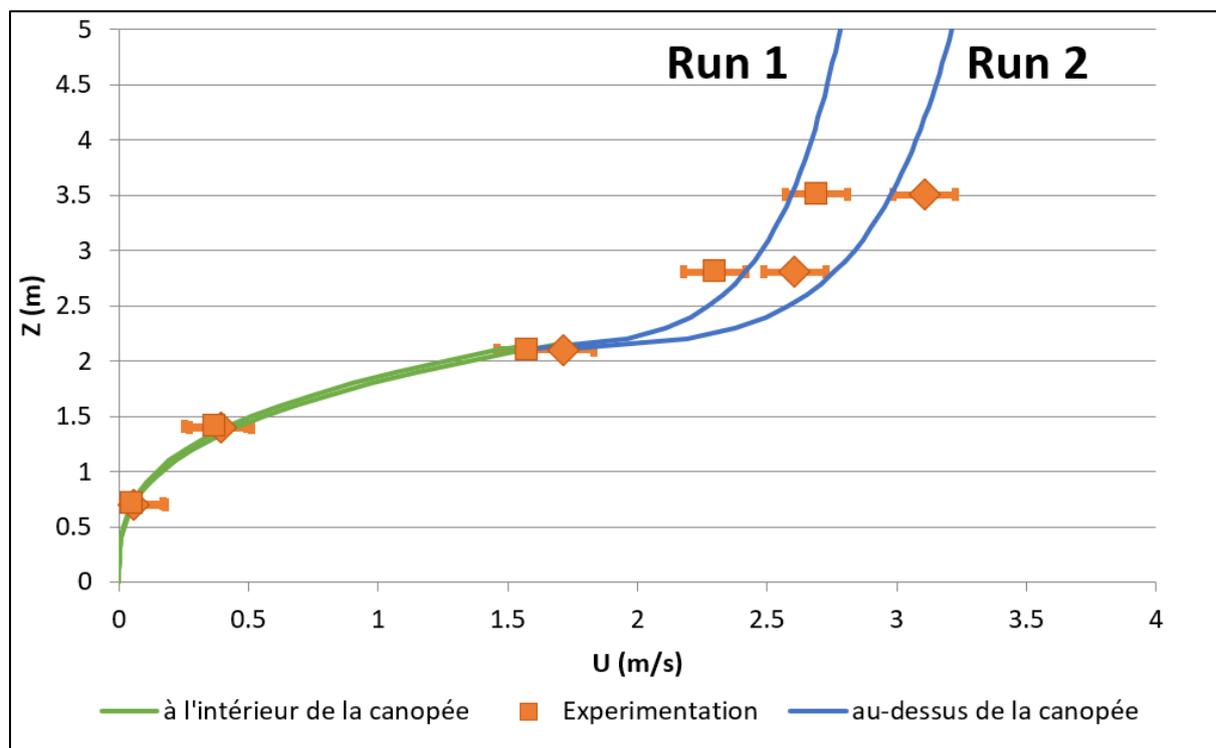


Figure 6 : Profil de vent des deux expériences du cas test

Le vent mesuré pour la seconde expérience était plus intense que celui de la première expérience. Aux premiers abords, si le profil envoyé est celui-ci, le profil qui est retrouvé dans la zone d'intérêt se retrouve grandement atténué. Pour pallier ce problème, un même facteur a été appliqué à la courbe initiale afin de se rapprocher le plus possible du profil de vent attendu.

⁵ <https://wind-data.ch/tools/profile.php?lng=fr>

➤ 3.2.3. Modélisation de la végétation

La prise en compte de la végétation dans une modélisation se retranscrit généralement par le freinage de l'écoulement. Ce freinage par la végétation est piloté par deux paramètres, le LAD et le coefficient de traînée C_D ayant été définis plus haut. Concernant le LAD, celui-ci a été mesuré pour un spécimen de maïs type afin de s'appliquer à tout le champ. La Figure 7 montre l'évolution de ce paramètre en fonction de la hauteur.

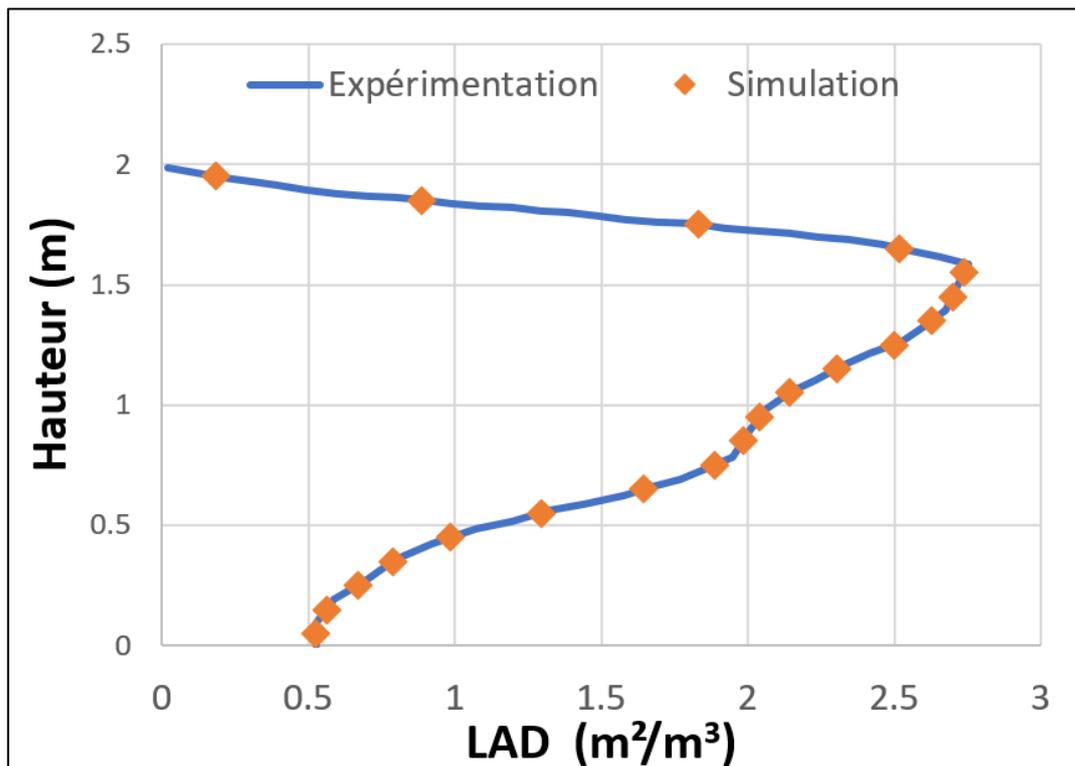


Figure 7 : Évolution du LAD d'un plant de maïs en fonction de la hauteur

Concrètement, pour le représenter dans le modèle, il est choisi de créer un volume de végétation qui s'étend sur tout le domaine jusqu'à la hauteur moyenne des plants de maïs, soit environ 2 m. Ce volume est ensuite partitionné en 20 volumes d'épaisseur de 0,1 m avant d'y insérer dans chaque volume la valeur de LAD située à son milieu. Par exemple, la première couche (couche 0) qui s'étend du sol à 0,1 m d'altitude aura comme valeur de LAD, celle située à une altitude de 0,05 m, soit environ 0,53 m²/m³.

En ce qui concerne le coefficient de traînée, il est considéré comme étant uniforme sur tout ce volume de champ. D'après [Zeng et Takahashi, 2000], la valeur habituellement utilisé pour représenter le freinage dans le cas d'un champ de maïs s'élève à 0,2. Cependant, après une étude plus poussée, il est remarqué que le vent n'est pas assez freiné au sein du champ et qu'il est nécessaire d'augmenter ce coefficient de traînée C_D . Il est donc décidé d'utiliser un C_D de 0,4, qui permet de mieux représenter la réalité et donc de valider l'étude en termes de champ de vitesse.

3.3. VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

La validation des résultats du modèle numérique vis-à-vis des résultats expérimentaux ne peut se faire qu'en suivant la méthodologie proposée dans la Figure 8.

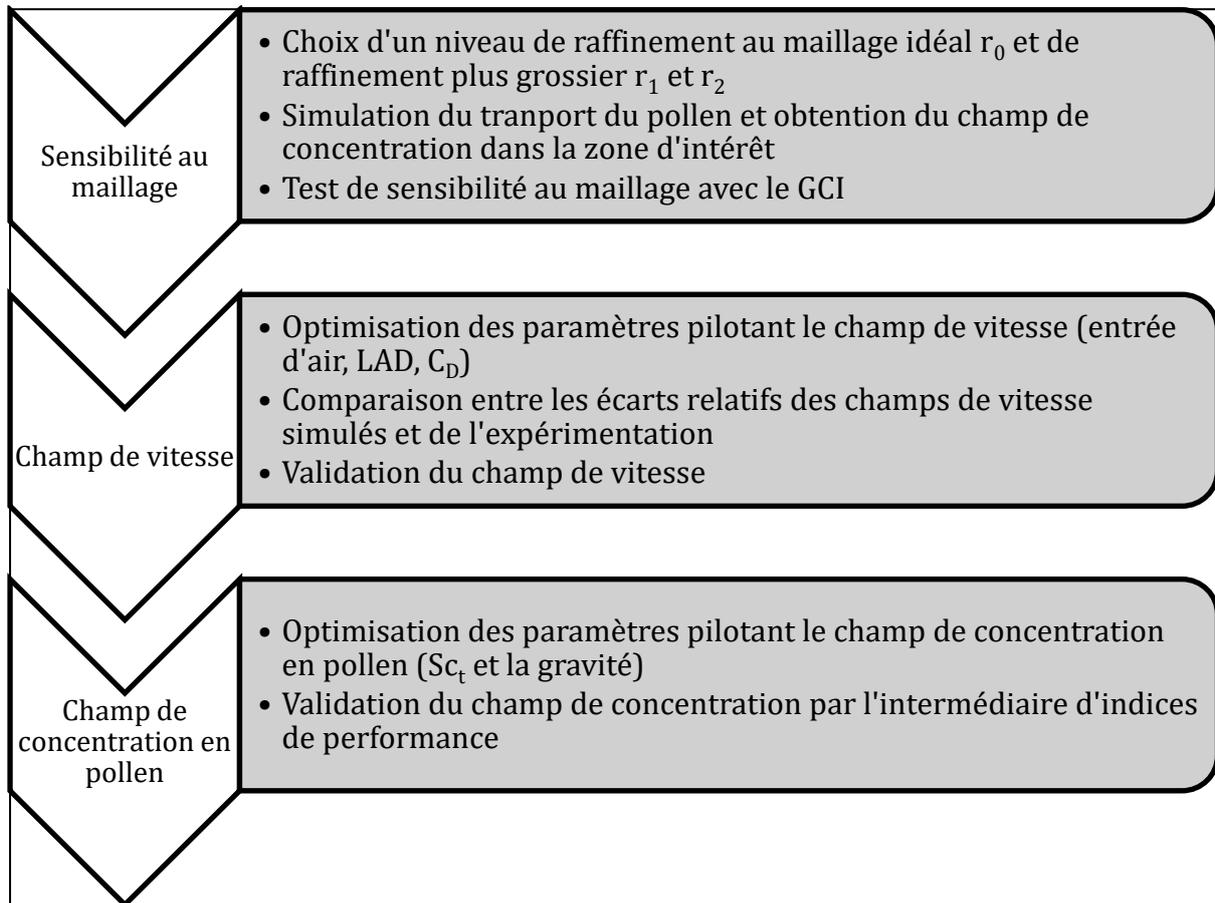


Figure 8 : Méthodologie de validation du modèle numérique

➤ **3.3.1. Sensibilité au maillage**

Une des caractéristiques récurrentes dans le domaine de la simulation numérique est le choix du maillage. En effet, quel degré de précision une étude doit-elle faire apparaître pour être considérée réaliste ? Choisir une maille infiniment petite serait trop chronophage et une maille grossière ne ferait qu'augmenter les erreurs numériques. Par conséquent, le choix de la taille de maille est primordial tout en faisant un compromis entre le temps de calcul et le degré de précision. À première vue, étant donné que les distances présentes dans la zone d'intérêt du cas test est de l'ordre du 0,1 m, il semble judicieux d'utiliser une maille de 0,1 m de taille dans cette zone. Au premier lancement du calcul, la simulation a duré plus d'une semaine pour aboutir. Certes, la précision du calcul est irréprochable mais pour le calcul d'un domaine pareil, 1 ou 2 jours sont généralement les ordres de grandeurs attendus.

Il faut savoir que pendant cette phase de maillage, un maillage grossier est d'abord appliqué à l'ensemble du volume de simulation. Dans le cas de la géométrie du cas test, le premier maillage

grossier obtenu présente des mailles de taille de 12,8 m. Le second maillage appliqué permet de diviser ces blocs de 12,8 par un multiple de deux en fonction de la hauteur. Plus on se rapproche du sol et plus le degré de précision est important. Par exemple, si pour une hauteur allant du sol à 6 m, une maille de 0,2 m attendue, il faut rentrer le paramètre 6 pour diviser six fois par 2 la maille grossière. Il faut choisir avec précaution ce paramétrage pour obtenir un maillage adéquat. La Figure 9 nous montre le maillage final obtenu après avoir choisi le bon niveau de raffinement.

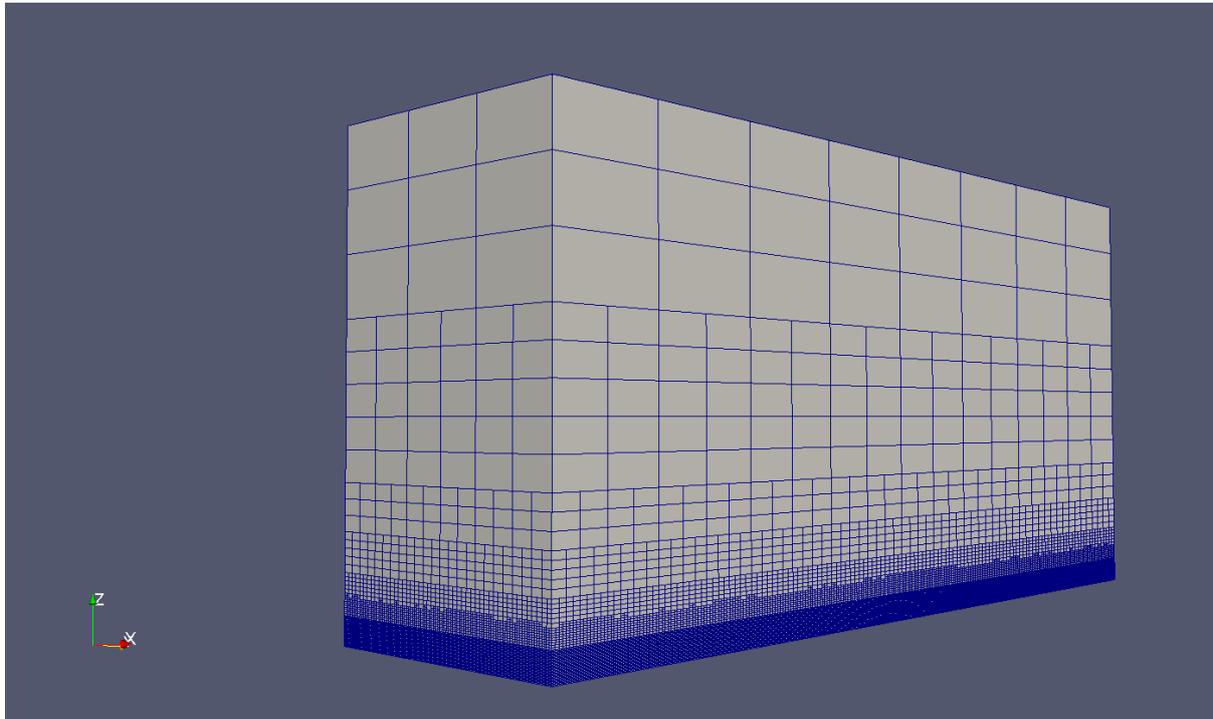


Figure 9 : Maillage du domaine choisi pour un niveau de raffinement de 0,2 m

C'est pour cela qu'une étude de sensibilité du maillage est nécessaire pour trouver le maillage adéquat afin d'avoir une durée de calcul moindre tout en ayant des résultats numériques en concentration en pollen suffisamment insensibles au changement du maillage. Il est possible d'évaluer cette sensibilité avec le Grid Convergence Index (GCI) [Roache, 1994] qui se calcule de la manière suivante :

$$GCI = 3 \cdot \left| \frac{C_{fine} - C_{coarse}}{C_{fine}} \right| \cdot \frac{1}{r^n - 1}$$

Avec C_{fine} la concentration en pollen dans une maille de dimension plus fine que pour C_{coarse} la concentration en pollen dans une maille de taille grossière, r le ratio entre les dimensions des mailles grossières et fines, n l'ordre du schéma numérique utilisé pour suivre la concentration en pollen étant égal à 2 puisqu'il s'agit d'un second ordre (Gauss linearUpwind).

Au sein de la zone d'intérêt, le GCI de chacune des mailles a été calculé entre trois types de tailles de mailles différentes : la plus fine de 0,1 m, une moyenne de 0,2 m et une grossière de 0,4 m.

$$r_{fine} \xrightarrow{x2} r_{moyenne} \xrightarrow{x2} r_{grossiere}$$

Le GCI_{moyen} obtenu pour chaque source de pollen apparaît dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Résultats de la sensibilité des concentrations en pollen au maillage

GCI _{moyen}	Source 1 (z = 0,7 m)	Source 2 (z = 1,4 m)	Source 3 (z = 2,1 m)
Maille de 0,4 m vs Maille de 0,1 m	2,32%	2,75%	2,75%
Maille de 0,4 m vs Maille de 0,2 m	5,11%	6,28%	6,60%
Maille de 0,2 m vs Maille de 0,1 m	6,46%	7,28%	7,03%

Au premier abord, il semble intéressant d'utiliser une maille de taille de 0,4 m vis-à-vis d'une maille de 0,1 m puisque le GCI_{moyen} est inférieur à 3% pour l'ensemble des sources de pollens. Cependant, en observant la zone d'intérêt, il est remarqué qu'il n'y aurait à peine que deux mailles séparant deux points de mesure sur un même pôle. Le choix se porte donc sur une maille de taille de 0,2 m pour pallier cela et garantit une sensibilité au maillage d'environ 7%.

➤ **3.3.2. Validation et optimisation du champ de vitesse**

Une fois l'étape de sensibilité du maillage validée, la seconde étape de validation à étudier correspond au champ de vitesse. Cette étape se fait avant la validation du transport du pollen car le champ de vitesse impacte directement l'évolution de la concentration en pollen.

Tel que montré dans la partie 3.2. , le profil de vent a été reconstruit avec les mesures de vitesse prises dans l'expérimentation. Dans un premier temps, ce profil de vent a été envoyé en entrée et il est ressorti grandement atténué dans la zone d'intérêt probablement par le fait que l'écoulement se stabilise dans le volume de calcul. Ainsi, il a été décidé de multiplier tout le profil de vent par un même facteur de 1.7 dans les deux expériences. Le profil de vent ainsi obtenu coïncide grossièrement à celui de l'expérimentation, mais il s'agit d'une bonne approximation avant d'optimiser le modèle avec les paramètres de végétation.

Dans un second temps, l'influence de la végétation a donc voulu être étudiée. Concernant le LAD, celui-ci est resté inchangé puisqu'il s'agit de réelle mesure sur terrain. Pour pouvoir garder le partitionnement de 20 valeurs de LAD, il a été nécessaire de modifier le maillage dans la zone d'intérêt. Pour éviter que les couches de LAD ne se superposent, un degré de précision a été ajouté pour y obtenir des mailles plus fines de 0,1 m. Quant au coefficient de traînée, il a été décidé de prendre en premier lieu sa valeur issue de la littérature ($C_D = 0,2$) [Zeng et Takahashi, 2000]. Au vu des premiers résultats du champ de vitesse, les vitesses observées dépassent celles de l'expérience pour des hauteurs inférieures à 2 m. Par conséquent, le coefficient C_D a été doublé afin de ralentir l'écoulement au sein de la végétation et ainsi, pour se rapprocher au mieux des résultats expérimentaux. Comme ce paramètre, qui caractérise le freinage par la végétation, a une réelle influence sur le champ de vitesse, il peut même être rendu nul ($C_D = 0,01$) pour observer le profil de vent obtenu sans obstacle. Les Figure 10 et Figure 11 permettent d'observer les différents champs de vitesse énoncés précédemment pour chaque expérience.

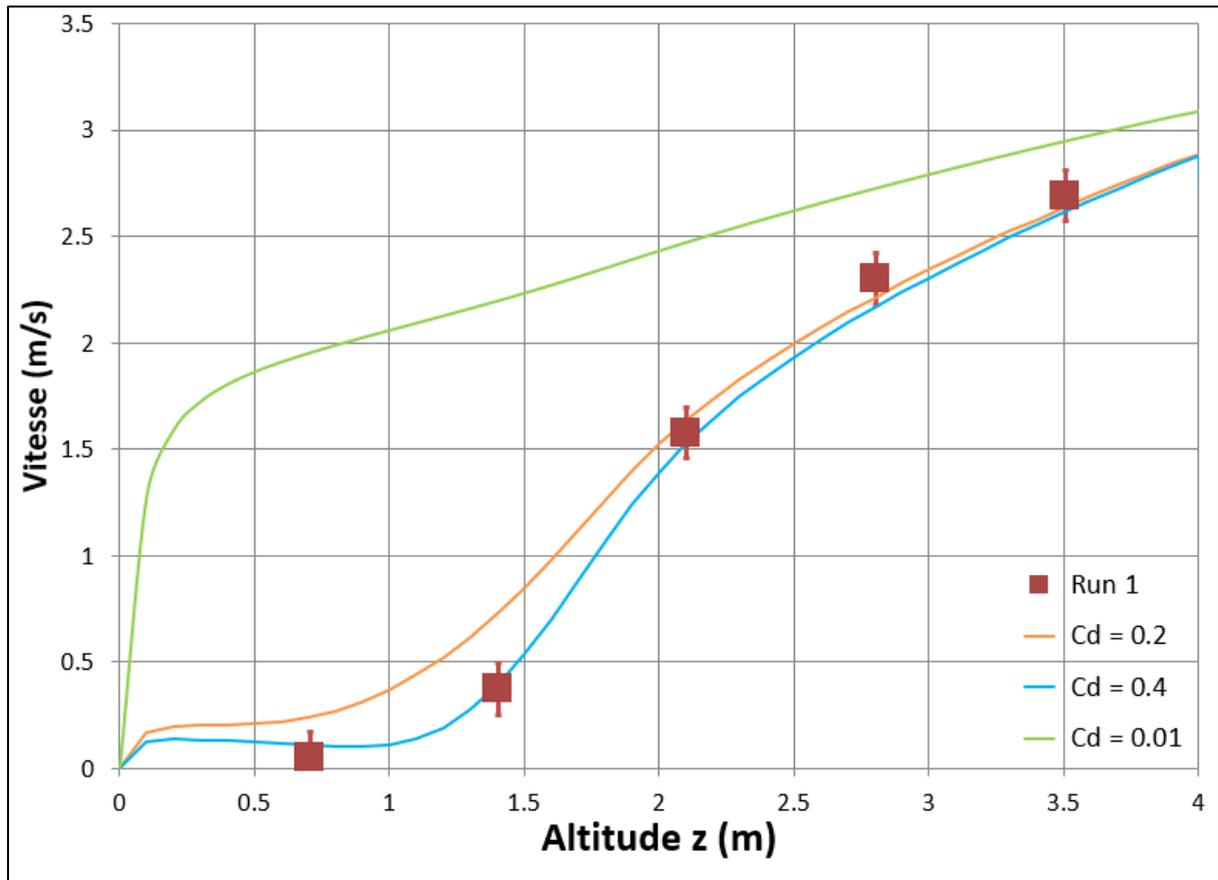


Figure 10 : Évolution du champ de vitesse en fonction de l'altitude pour différents coefficients de traînée C_D - Run 1

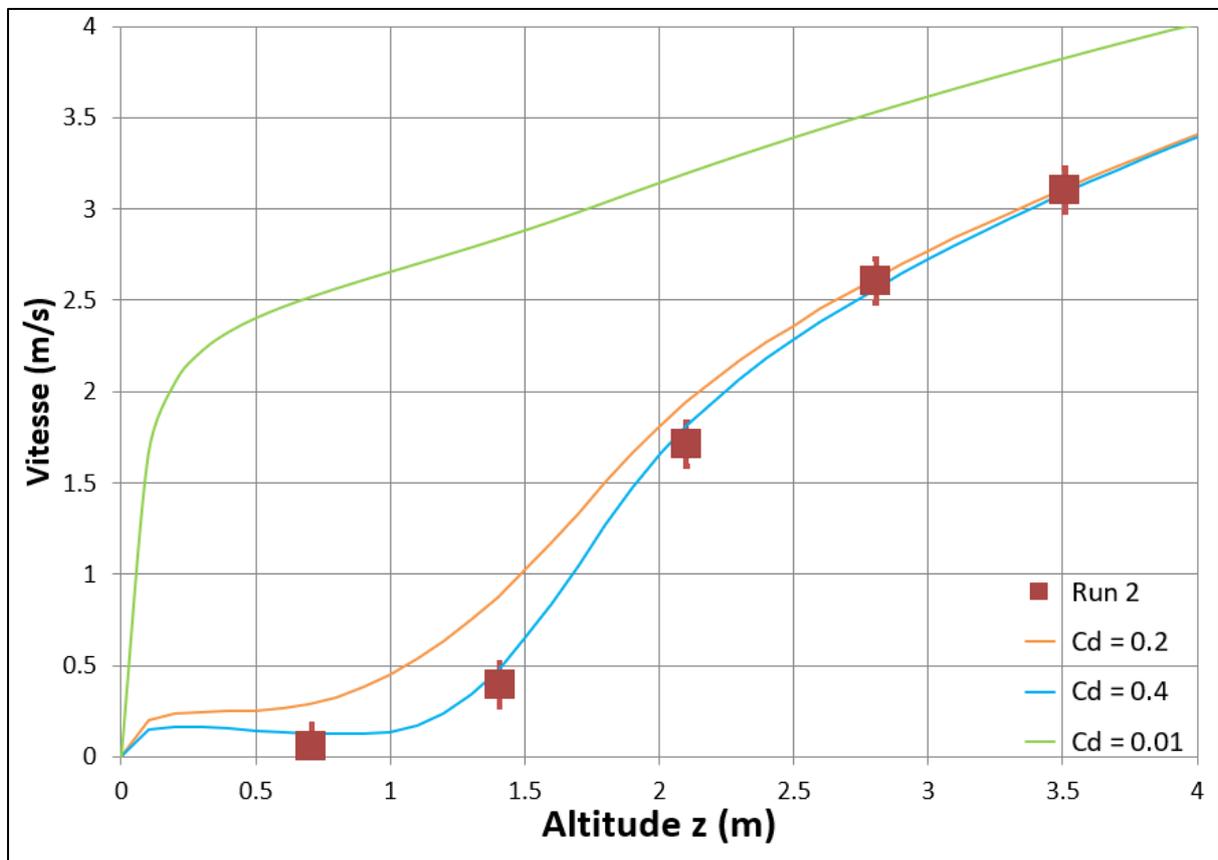


Figure 11 : Évolution du champ de vitesse en fonction de l'altitude pour différents coefficients de traînée C_D - Run 2

Le profil de vent lorsque le coefficient de traînée est de 0,2 diffère bien des mesures pour des hauteurs inférieures à 2 m. En revanche, la courbe pour $C_D = 0,4$ coïncide bien avec les points de mesure. Dans le cas où la végétation est négligée, le profil de vent n'est plus ralenti et se rapproche d'un profil logarithmique si le point de vue observé est l'altitude en fonction de la vitesse.

Le choix du coefficient de traînée $C_D = 0,4$ semble le plus à même d'obtenir le champ de vitesse adéquat. Lors de la comparaison entre les différentes simulations, les Tableau 6 et Tableau 7 montrent que ce choix est justifié en termes d'écart relatif. Mise à part, le grand écart relatif observé pour l'altitude de $z = 0,7$ m pour des vitesses très faibles, l'écart relatif moyen observé est de 25,4% pour l'expérience 1 et 30,0% pour l'expérience 2. Sans tenir compte de cette valeur, les écarts relatifs moyens ne sont plus que de 4,2% et 7,2% respectivement.

Tableau 6 : Comparaison des résultats de champ de vitesse en fonction de C_D - Run 1

Altitude (m)	Champ de vitesse (m/s)				Écart relatif (%)			
	Expérience	$C_D = 0,01$	$C_D = 0,2$	$C_D = 0,4$	Incertitude sur la mesure	$C_D = 0,01$	$C_D = 0,2$	$C_D = 0,4$
0,7	0,05	1,95	0,24	0,11	233%	3686%	359%	110%
1,4	0,37	2,2	0,73	0,39	32%	490%	95%	5%
2,1	1,58	2,47	1,64	1,52	8%	57%	4%	3%
2,8	2,3	2,72	2,21	2,17	5%	18%	4%	6%
3,5	2,69	2,94	2,63	2,61	4%	9%	2%	3%

Tableau 7 : Comparaison des résultats de champ de vitesse en fonction de C_D - Run 2

Altitude (m)	Champ de vitesse (m/s)				Écart relatif (%)			
	Expérience	$C_D = 0,01$	$C_D = 0,2$	$C_D = 0,4$	Incertitude sur la mesure	$C_D = 0,01$	$C_D = 0,2$	$C_D = 0,4$
0,7	0,06	2,52	0,29	0,13	208%	4251%	398%	121%
1,4	0,39	2,83	0,87	0,47	31%	622%	123%	21%
2,1	1,71	3,19	1,94	1,81	7%	87%	13%	6%
2,8	2,61	3,53	2,62	2,56	5%	35%	0%	2%
3,5	3,11	3,82	3,11	3,08	4%	23%	0%	1%

Après avoir validé le champ de vitesse, la prochaine étape consiste à valider le transport du pollen par l'étude des concentrations en pollen en fonction des différentes sources.

➤ **3.3.3. Validation et optimisation du transport du pollen**

Avec l'étape précédente, il est à présent possible de valider les résultats en concentration par l'optimisation des paramètres pilotant le transport du pollen et en particulier la diffusion turbulente. Un des paramètres introduits dans la partie Matériel et Méthodes est le nombre de Schmidt turbulent Sc_t qui a été défini comme étant le rapport entre la viscosité cinématique turbulente dans l'air ν_t et le coefficient de diffusion turbulente D_t . Sa valeur est généralement fixée à 0,7 puisqu'il s'agit de la valeur standard rentrée dans les logiciels de CFD comme Fluent. Il

est intéressant de se demander s'il s'agit bien d'une valeur réaliste et si elle peut être optimisée. Les auteurs s'accordent pour dire que le nombre de Schmidt généralement employé dans une simulation CFD se situe dans un intervalle compris entre 0,1 et 1,3 [Gromke et Blocken, 2015], et c'est sur cet intervalle que va se baser notre prochaine étude du transport du pollen. Il a donc été décidé de comparer les différents résultats de simulation du transport du pollen à partir des trois sources, pour des valeurs de nombre de Schmidt compris dans cet intervalle (0,1, 0,4, 0,7, 1,0 et 1,3), pour chaque expérience et pour les deux valeurs de coefficient de traînée C_D (0,2 et 0,4). Les Annexe A et Annexe B nous montrent l'ensemble de ces différents graphiques d'évolution de la concentration en pollen en fonction de l'altitude et à chaque pôle. Néanmoins, voici un exemple de résultats qu'il est possible d'observer sur la Figure 12.

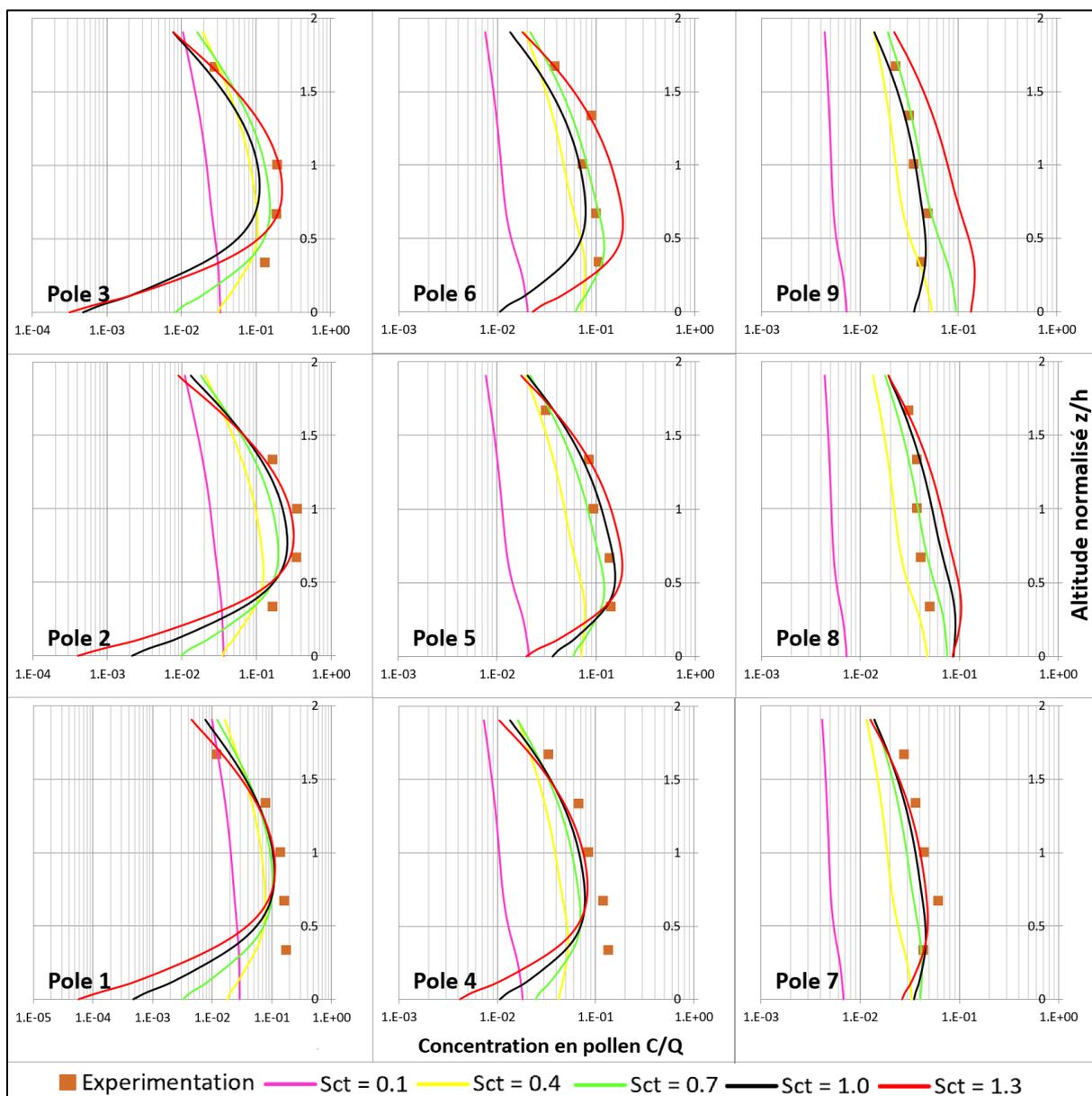


Figure 12 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour $C_D = 0,2$ - Run 1

Les résultats de concentrations en pollen montrent que le modèle est très sensible à la valeur de Sc_t choisie. Vis-à-vis du pollen émis par la source 1, les concentrations simulées sont largement sous-estimées au-dessus du champ et surestimées à l'intérieur du champ. Cette prévision de concentrations sous-estimées est d'autant plus vraie plus le coefficient de traînée est élevé. De plus, les écarts par rapport aux résultats expérimentaux s'agrandissent plus le nombre de Schmidt est grand. Une exception peut tout de même s'observer pour la simulation dont le nombre de Schmidt est de 0,1 où le profil de concentration, même s'il est sous-estimé, correspond le mieux à l'expérience. On peut remarquer qu'une grande partie du pollen stagne au sol sans pouvoir se propager très loin. On a l'impression que la végétation freine tellement l'écoulement que le panache de pollen reste bloqué au sein d'elle ou bien que la gravité impacte trop la sédimentation du pollen dans le champ. C'est la raison pour laquelle des études de sensibilité du champ de vitesse (influence du C_D) et de la gravité ont été menées afin de vérifier ces pistes. Concernant les concentrations en pollen émis par la source 2 à une altitude $z = 1,4$ m, elles suivent les mesures expérimentales dans la majorité, mais il est possible d'observer le même phénomène de surestimation en pollen au niveau du sol pour les pôles situés dans le sens de l'écoulement du vent par rapport à la source et à plus de 4 m de celle-ci. Opposé à cette surestimation, on remarque une sous-estimation des concentrations au-dessus du champ, probablement causée par le surplus de pollen au sol. Finalement, quant au pollen émis par la troisième source au-dessus du champ, il correspond au plus fidèle des modèles de dispersion par rapport aux autres sources et il se comporte presque identiquement à celui de l'expérience. Ici, le rôle du C_D influe très peu la variation des concentrations par rapport aux sources S1 et S2. Une légère surestimation du pollen au sol pour les pôles éloignés s'observe tout de même. Comme il s'agit de l'unique source qui libère son pollen hors de la végétation, cela signifierait que la végétation joue un rôle majeur dans la simulation de la dispersion du pollen mais que si l'étude était effectuée dans un milieu urbain avec peu de végétation, le modèle simulerait de manière réaliste son transport.

Afin d'évaluer les performances de dispersions de notre modèle, la combinaison des différents indices de performance suivants sera utilisée : FAC2, MG et VG.

Le coefficient de prédiction avec un facteur d'observation de 2 (FAC2) se définit comme étant la proportion de valeur telle que $0,5 \leq \frac{C_{sim}}{C_{obs}} \leq 2$. La tendance géométrique moyenne MG et la variance géométrique VG se définissent de la manière suivante :

$$MG = e^{\overline{\ln(C_{obs}) - \ln(C_{sim})}} \qquad VG = e^{\overline{[\ln(C_{obs}) - \ln(C_{sim})]^2}}$$

Dans le cas d'un modèle parfait, ces indices de performance doivent atteindre 1, mais puisque certains paramètres atmosphériques comme la turbulence dans la couche limite atmosphérique sont tellement variables, il n'existe pas de modèle parfait. Une erreur de l'ordre de 30% est

généralement acceptée pour valider un modèle de transport de polluant atmosphérique [Chang et Hanna, 2004] ce qui se traduit par les recommandations suivantes :

$$FAC2 > 50\% \qquad 0,7 < MG < 1,3 \qquad VG < 1,6$$

Dans ce type de modélisation, il est préférable d'utiliser MG et VG lorsque les concentrations varient de quelques ordres de grandeurs. Cependant, une valeur limite de 10^{-2} doit être employée puisque ces deux indices sont très sensibles aux faibles valeurs.

D'un côté, MG est une mesure de la tendance relative moyenne et ne rend compte que des erreurs systématiques (erreur expérimentale qui quantifie l'écart entre la valeur vraie du mesurande et la valeur moyenne des mesurages), de l'autre côté, VG mesure la dispersion relative moyenne et reflètent des erreurs systématiques et non systématiques (aléatoires). Quant à FAC2, il s'agit d'un indice plus robuste puisqu'il est insensible à la distribution des variables à analyser.

L'ensemble des simulations ont été analysées et les résultats d'indices de performances ont été synthétisés dans les Tableau 8, Tableau 9 et Tableau 10. Le calcul des indices de performances s'est fait pour une même source de pollen ainsi que pour l'ensemble des sources de pollen (Total). Il ne s'agit pas de la moyenne des précédents mais d'applique la même méthodologie de calcul des indices en prenant tous les points de mesures provenant des trois sources.

Au vu de cette analyse statistique, on note déjà que les concentrations en pollen sont plus fidèles à la réalité pour un coefficient de traînée C_D de 0,2. Principalement dû au fait que la dispersion du pollen depuis la source S1 est très mal simulée pour un C_D de 0,4. Un approfondissement de l'étude de la dispersion du pollen au sein du champ serait nécessaire afin d'améliorer le modèle. Dans le cas où l'objet de l'étude est d'étudier la dispersion du pollen à l'intérieur d'un champ, le nombre de Schmidt le plus adapté est aux alentours de $Sc_t = 0,1$. En revanche, pour une étude de la dispersion du pollen à l'intermédiaire entre le dessus et l'intérieur d'un champ, un Sc_t proche de 0,4 est alors plus adapté. Enfin, pour l'envoi d'un pollen sans obstacle immédiat dans les airs, un nombre de Schmidt d'environ 0,7 permet d'améliorer les résultats obtenus pour la simulation de la dispersion du pollen. Il s'agit du paramétrage choisi pour la partie suivante.

Tableau 8 : Résultats des FAC2 pour les deux expériences, avec C_D différent et pour un Sc_t variant de 0,1 à 1,3

FAC2	Sc _t = 0,1	Sc _t = 0,4	Sc _t = 0,7	Sc _t = 1,0	Sc _t = 1,3	$C_D = 0,2$	Run 1
Source 1	58%	49%	37%	30%	26%		
Source 2	2%	91%	77%	70%	49%		
Source 3	2%	56%	91%	86%	79%		
Total	21%	65%	68%	62%	51%		
Source 1	16%	2%	5%	5%	0%		
Source 2	9%	84%	70%	53%	40%		
Source 3	5%	72%	93%	84%	70%		
Total	10%	53%	56%	47%	36%		

Source 1	17%	62%	38%	31%	24%	C ₀ = 0,2	Run 2
Source 2	21%	71%	43%	38%	31%		
Source 3	2%	33%	76%	83%	81%		
Total	13%	56%	52%	51%	45%		
Source 1	5%	0%	0%	7%	10%	C ₀ = 0,4	
Source 2	45%	55%	31%	26%	26%		
Source 3	2%	52%	88%	81%	76%		
Total	17%	36%	40%	38%	37%		

Tableau 9 : Résultats des MG pour les deux expériences, avec C₀ différent et pour un S_c variant de 0,1 à 1,3

MG	Sct = 0,1	Sct = 0,4	Sct = 0,7	Sct = 1,0	Sct = 1,3		
Source 1	1,57	0,68	0,97	2,68	3,69	C ₀ = 0,2	Run 1
Source 2	4,85	1,23	0,88	1,07	0,85		
Source 3	6,31	1,73	1,21	1,29	1,02		
Total	4,78	1,40	1,25	1,95	1,86		
Source 1	1,65	3,46	3,46	3,46	3,46	C ₀ = 0,4	
Source 2	4,02	1,02	0,78	0,78	0,89		
Source 3	5,71	1,49	1,02	0,89	0,87		
Total	4,40	2,68	4,77	5,06	5,06		
Source 1	3,14	1,14	1,42	2,31	4,15	C ₀ = 0,2	Run 2
Source 2	2,70	0,65	0,44	0,39	0,39		
Source 3	8,45	2,22	1,51	1,28	1,21		
Total	5,78	1,50	1,23	1,33	1,60		
Source 1	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	C ₀ = 0,4	
Source 2	2,19	0,51	0,36	0,34	0,36		
Source 3	6,72	1,90	1,27	1,08	1,03		
Total	4,13	2,45	3,65	4,13	4,13		

Tableau 10 : Résultats des VG pour les deux expériences, avec C₀ différent et pour un S_c variant de 0,1 à 1,3

VG	Sct = 0,1	Sct = 0,4	Sct = 0,7	Sct = 1,0	Sct = 1,3		
Source 1	1,48	3,20	5,71	4,33	9,38	C ₀ = 0,2	Run 1
Source 2	6,63	1,22	1,37	1,54	2,43		
Source 3	21,92	1,66	1,25	1,45	1,64		
Total	5,99	1,87	2,14	2,13	3,34		
Source 1	3,46	9,62	9,52	7,97	7,65	C ₀ = 0,4	
Source 2	4,61	1,39	1,90	2,79	4,03		
Source 3	17,22	1,41	1,21	1,44	1,79		
Total	6,50	2,66	2,80	3,18	3,81		
Source 1	2,03	1,79	2,71	3,42	3,99	C ₀ = 0,2	Run 2
Source 2	2,20	1,43	2,81	4,76	6,90		
Source 3	30,04	2,12	1,43	1,50	1,85		
Total	5,12	1,76	2,22	2,90	3,71		
Source 1	2,59	5,46	5,44	4,48	4,04	C ₀ = 0,4	
Source 2	1,75	2,26	5,49	9,88	14,26		
Source 3	23,03	1,69	1,32	1,58	2,04		
Total	4,71	2,75	3,40	4,12	4,90		

Lors de la définition de l'équation de transport, il a été remarqué que l'une des modifications du code consistait à ajouter l'influence de la gravité. Il semblait intéressant d'étudier l'influence de ce paramètre dans un second temps. Pour chacune des expériences et pour un coefficient C_D différent, l'Annexe C représente l'évolution de la concentration en pollen avec la prise en compte ou non de la gravité pour les deux expériences. La Figure 13 montre un exemple de résultats de simulations pour mettre en évidence l'influence de la gravité dans l'étude.

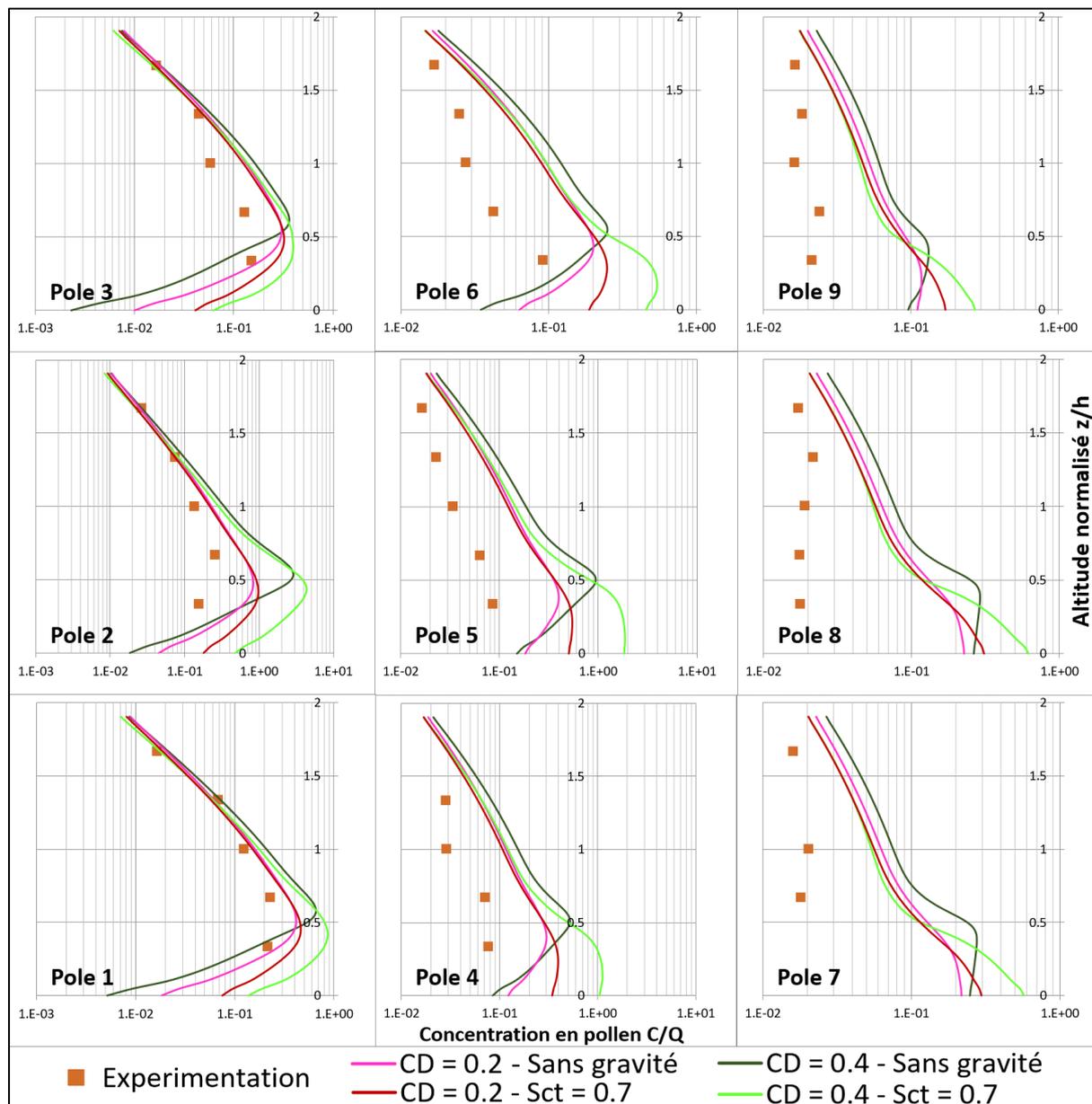


Figure 13 : Influence de la gravité sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour C_D différent - Run 2

Ces résultats de concentrations en pollen montrent que le modèle est aussi très sensible à la prise en compte de la gravité. Vis-à-vis du pollen émis par la source 1, les concentrations simulées sans gravité sont de manière générale plus fortes que dans le cas normal. Dans le cas du Run 1 et pour un C_D de 0,2, le pollen est sous-estimé au-dessus du champ et pour les pôles éloignés à moins de

8 m de la source. Cependant, on remarque qu'entre deux C_D différents, l'écart entre les simulations avec et sans prise en compte de la gravité est plus important pour un C_D élevé. Par rapport à l'analyse précédente sur le nombre de Schmidt où le pollen semblait s'accumuler au sol, on en vient à la même conclusion pour la majorité des pôles. Ce phénomène de surestimation au sol s'observe moins pour les pollens qui se dispersent depuis les sources S2 et S3. Le pollen stagne plus longtemps dans les airs au lieu de se déposer au sol. Pour la source S2, ce sera bénéfique pour se rapprocher des résultats expérimentaux à proximité du sol. Quant à la source S3, cela ne fera qu'agrandir cet écart.

Les résultats d'indices de performances pour les simulations sans prise en compte de la gravité ont été analysés et ont été synthétisés dans les Tableau 11 et Tableau 12.

Vis-à-vis de la tendance relative, les simulations sans gravité sont meilleures qu'avec prise en compte de la gravité. En revanche, en termes de dispersion relative, les résultats sans gravité sont beaucoup trop élevés en concentration, ce qui pousse à choisir de modéliser le transport du pollen avec la gravité. Par conséquent, l'interrogation quant à l'influence de la gravité est justifiée et sa prise en compte est préférable lorsqu'on traite de particules lourdes.

Tableau 11 : Résultats des indices de performance du Run 1 avec C_D différent pour l'analyse sans gravité

	MG		VG		FAC2			
	Sct = 0,7	Sans gravité	Sct = 0,7	Sans gravité	Sct = 0,7	Sans gravité		
Source 1	0,97	0,95	5,71	51,62	37%	23%	$C_D = 0,2$	Run 1
Source 2	0,88	0,83	1,37	2,37	77%	53%		
Source 3	1,21	1,19	1,25	2,11	91%	77%		
Total	1,25	1,21	2,14	6,37	68%	51%		
Source 1	3,46	0,80	9,52	182,98	5%	23%	$C_D = 0,4$	
Source 2	0,78	0,72	1,90	1,88	70%	67%		
Source 3	1,02	1,39	1,21	2,25	93%	81%		
Total	4,77	1,14	2,80	9,19	56%	57%		

Tableau 12 : Résultats des indices de performance du Run 2 avec C_D différent pour l'analyse sans gravité

	MG		VG		FAC2			
	Sct = 0,7	Sans gravité	Sct = 0,7	Sans gravité	Sct = 0,7	Sans gravité		
Source 1	1,42	0,75	2,71	4,66	38%	33%	$C_D = 0,2$	Run 2
Source 2	0,44	0,43	2,81	2,83	43%	36%		
Source 3	1,51	1,61	1,43	1,65	76%	69%		
Total	1,23	1,00	2,22	2,79	52%	46%		
Source 1	2,59	1,34	5,44	25,19	0%	19%	$C_D = 0,4$	
Source 2	0,36	0,35	5,49	5,06	31%	26%		
Source 3	1,27	1,68	1,32	2,56	88%	81%		
Total	3,65	1,16	3,40	6,89	40%	42%		

PARTIE 4 : CONCEPTION D'UN PROTOCOLE ET D'UNE MÉTHODE DE CALCUL

L'objectif de cette quatrième et dernière partie est d'évaluer la viabilité du modèle dans le cadre d'une étude réelle pour des simulations plus conséquentes en termes de dimensions du domaine de calcul, de complexité des géométries ainsi que pour la prise en compte d'intensités et de directions de vent multiples. Un protocole à suivre pour la réalisation d'études futures sera défini pour l'occasion.

4.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

➤ 4.1.1. Localisation du site d'étude

La zone d'étude correspond au jardin au sein de la place de la République dans la ville de Strasbourg. Encerclée par de nombreuses institutions de la ville de Strasbourg, la place de la République reste un espace vert agréable et une des plus célèbres de la ville de Strasbourg. À l'Ouest, le Palais du Rhin, ancien palais impérial, servant de locaux pour la commission Centrale de la Navigation du Rhin. Au Sud, on pourra apercevoir l'Opéra Municipal, la Place Broglie et l'Hôtel de Ville situé dans l'hypercentre. À l'Ouest, le Théâtre National de Strasbourg (TNS) ainsi que l'immense Bibliothèque Nationale Universitaire de Strasbourg. N'oublions pas notre chère école qui se situe à quelques blocs plus loin. Enfin, au Nord, la préfecture du Bas-Rhin occupe actuellement les anciens locaux du ministère d'Alsace-Lorraine. Il s'agit donc d'un des lieux les plus attractifs de la ville par ses nombreux établissements culturels et administratifs, ce qui justifie de devoir évaluer l'impact du pollen en termes de pollution dans ce quartier de Strasbourg.



Figure 14 : Localisation de la zone d'intérêt (image Géoportail)

➤ **4.1.2. Inventaire des polluants et pertinence de leur suivi**

Pour choisir quel pollen sera suivi dans l'étude, il faut passer par une identification des différentes espèces d'arbres qui sont présentes dans la place de la République et d'en déduire par la suite leur caractère allergène. Après avoir contacté l'Eurométropole de Strasbourg, M. Gondard a transmis un plan de l'implantation des arbres de la zone d'intérêt ainsi qu'un inventaire des différentes espèces présentes (Annexe D). Il a aussi été confirmé que les arbres présents dans la ceinture bordant le jardin sont un mélange de Tilleuls argentés et Tilleuls de Crimée. Cette étape d'identification peut très bien s'effectuer à l'extérieur pour un passionné d'arbre. Par la suite, une recherche de l'indice OPALS de chacune des espèces à l'aide de [Ogen, 2015] va permettre de caractériser le caractère allergène de chacune et d'en déduire les espèces à suivre. Le Tableau 13 synthétise les informations collectées sur cet inventaire.

Tableau 13 : Inventaire des espèces d'arbres au sein du jardin de la place de la République - Strasbourg

Nom latin	Nom commun	Famille	Genre	OPALS⁶
Ginkgo biloba	Arbre aux quarante écus	Ginkgoaceae	Ginkgo	7
Taxus baccata	If	Taxaceae	Taxus	1
Magnolia x soulangiana	Magnolia de Chine	Magnoliaceae	Magnolia	6
Magnolia grandiflora	Magnolia à grandes fleurs	Magnoliaceae	Magnolia	4,5
Chamaecyparis lawsoniana	Cyprès de Lawson	Cupressaceae	Chamaecyparis	8
Fagus sylvatica Purpurea	Hêtre pourpre	Fagaceae	Fagus	6
Calocedrus decurrens	Calocèdre	Cupressaceae	Calocedrus	7
Liriodendron tulipifera	Tulipier de Virginie	Magnoliaceae	Liriodendron	3
Taxus baccata Fastigiata	If	Taxaceae	Taxus	1
Tilia europaea	Tilleul commun	Tiliaceae	Tilia	6
Quercus castaneifolia	Chêne a feuilles de châtaignier	Fagaceae	Quercus	8,5
Catalpa bignonioides	Arbre aux haricots	Bignoniaceae	Catalpa	6
Abies pinsapo	Sapin d'Andalousie	Pinaceae	Abies	2
Carya - laciniosa	Caryer lacinié	Juglandaceae	Carya	9
Tilia euchlora	Tilleul de Crimée	Tiliaceae	Tilia	6
Tilia tomentosa	Tilleul argenté	Tiliaceae	Tilia	6

Le suivi des polluants ne se fera qu'en fonction du genre et que pour des OPALS ≥ 7 car il s'agit des espèces pour lesquelles le caractère allergisant est très fort. Seuls les Ginkgos, les Cyprès, le Calocèdre, le Chêne et le Caryer seront suivis dans la suite de l'étude. Il a aussi été décidé de suivre le pollen issu des tilleuls dont l'OPALS est de 6 puisque l'espèce est très présente et entoure l'ensemble du jardin.

⁶ Dans le cas où une espèce est évaluée comme ayant un OPALS compris entre deux valeurs, le Tableau 13 ne fait apparaître que la moyenne des deux valeurs.

➤ **4.1.3. Objectifs de l'étude**

L'objectif de l'étude est de réaliser des modélisations numériques 3D à l'échelle microscopique afin de rendre compte des phénomènes de dispersion du pollen suivant la configuration du bâti. La vérification des résultats peut soit s'effectuer à travers l'évaluation de la qualité de l'air actuelle en termes de concentrations en pollen sur site par métrologie et ce pour une campagne de mesure d'un mois au printemps où les concentrations en pollen sont les plus fortes, soit au travers de la base de données du RNSA⁷ qui propose les concentrations observées en fonction du taxon au niveau du capteur présent sur le toit de l'hôpital civil de Strasbourg qui donne une estimation.

4.2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODE NUMÉRIQUE UTILISÉE

➤ **4.2.1. Création du domaine d'étude**

La création du domaine d'étude avec l'ensemble du jardin et des bâtiments à proximité correspond à la première étape de la modélisation. La zone d'intérêt en 3D est alors importée depuis la base de données « Maquette 3D – Opendata 3D » disponible en libre accès dans la cartothèque de l'Eurométropole de Strasbourg vers l'interface de Salomé®. Le domaine d'étude est décomposé en mailles afin de permettre la résolution des équations de Navier-Stokes et de transport du pollen. Des clichés de la géométrie montrant à la fois les sources de polluants (Jardin de la place de la République) et le maillage obtenu sont proposés en Figure 15 et Figure 16.

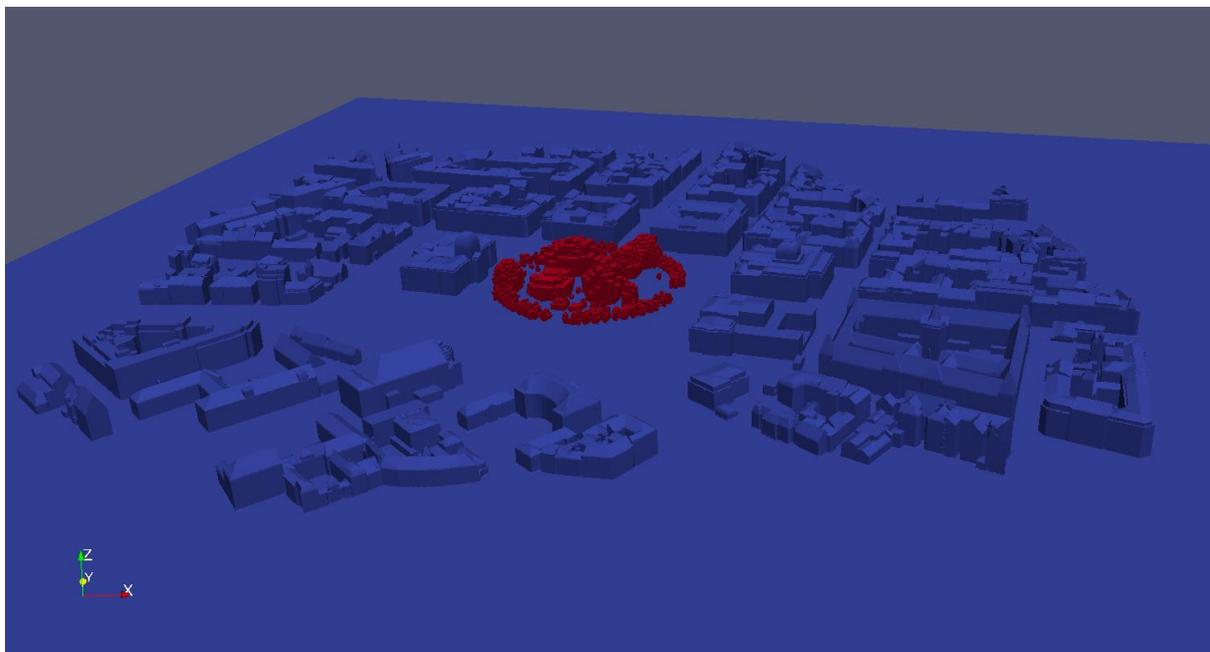


Figure 15 : Illustration de la géométrie du modèle (En rouge le jardin de la place de la République)

⁷ <https://www.pollens.fr/reports/database>

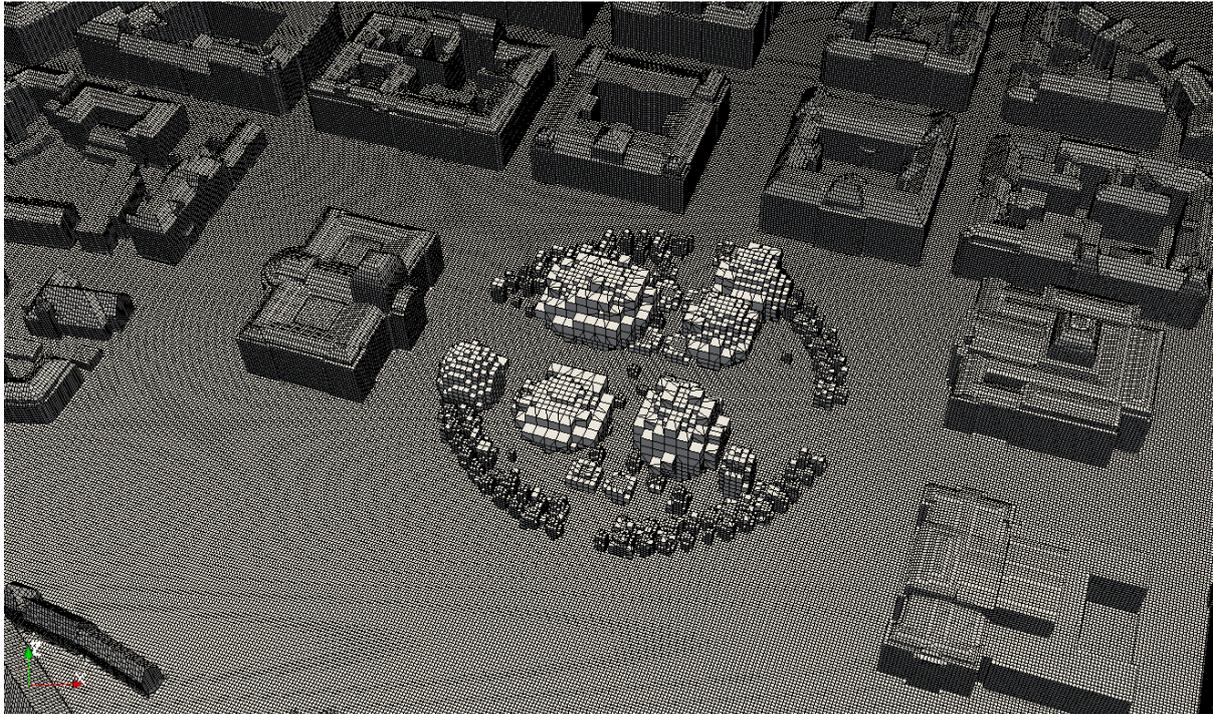


Figure 16 : Illustration du maillage du modèle

La zone d'intérêt tient dans un carré de côté égal à 700 m et dont la hauteur moyenne et la hauteur maximale des bâtiments est de l'ordre de 25 m et 40 m respectivement. Les distances minimales à appliquer aux faces latérales ainsi que les faces d'entrée et de sortie d'air sont de $5 \times H_{\text{moy}}$ avec H_{moy} considéré comme la hauteur moyenne des bâtiments aux alentours. En ce qui concerne le toit du domaine, il a été décidé de laisser une distance minimale de $5 \times H_{\text{max}}$ avec H_{max} considéré comme la hauteur maximale des bâtiments aux alentours.

➤ **4.2.2. Hypothèses de calcul**

Les conditions aux limites du modèle sont définies de la manière suivante : Les parois latérales et le toit du domaine sont assimilés à des « symmetry » alors que sol est un mur. La sortie de l'écoulement se fait à la pression atmosphérique, comme en condition réelle. Les polluants sont injectés au niveau des mailles adjacentes aux sources de polluants (Arbres du jardin de la place de la République). Enfin, le vent est simulé par l'injection d'un débit d'air en entrée du domaine et cette injection se fait par le calcul du profil de vent et de turbulence issu des équations de [Richards et Norris, 2011] :

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \\ \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa \cdot Z} \\ U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z - z_0}{z_0} \right) \end{array} \right.$$

Au cours du temps, le vent est changeant, autant en direction qu'en intensité et se limiter à un seul couple direction/intensité ne serait pas représentatif de la réalité. Pour cela, la rose des vents de Entzheim (cf. Figure 17) a été utilisée. Cette dernière propose la fréquence d'apparition des nombreux couples direction/intensité ce qui permettra par la suite de pondérer les résultats issus des modélisations en fonction des fréquences rencontrées afin d'obtenir une concentration moyenne statistique. Par manque de temps, seules les simulations pour les directions principales (20° et 200°) et dont l'intensité à 10 m est de 1,5 m/s ont été menées.

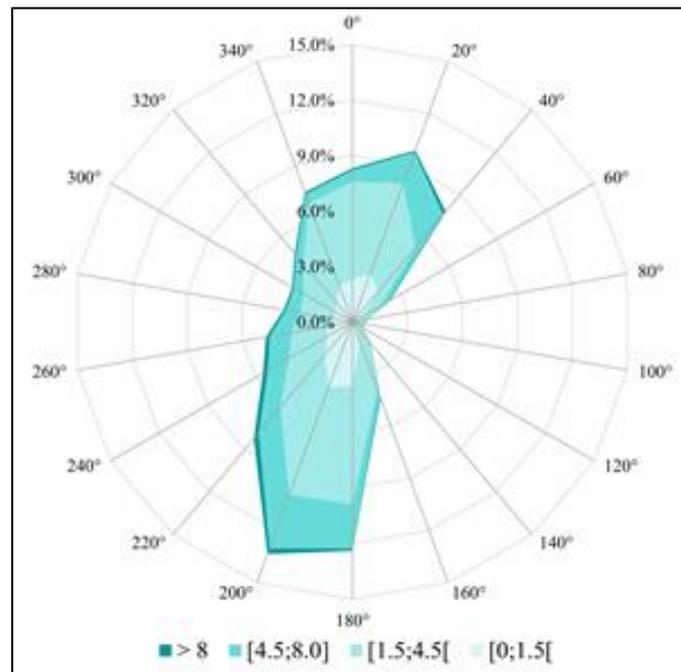


Figure 17 : Rose des vents moyennée sur 20 ans à Entzheim (Météo France)

Quant à la modélisation de la végétation en milieu urbain, il a été décidé de donner une valeur moyenne aux paramètres contrôlant le freinage par la végétation par défaut de données précises sur le feuillage de chaque espèce : $C_D = 0,2$ et $LAD = 1.0 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [Buccolieri et al., 2019]. Quant au pollen utilisé, un diamètre moyen de $35 \text{ }\mu\text{m}$ et une masse volumique moyenne de $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ont été choisis pour représenter les caractéristiques nécessaires au transport du pollen.

4.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

➤ 4.3.1. Résultats numériques de champ de Vitesse

Quelques exemples de résultats aérauliques obtenus pour une direction de 20° et une intensité de 1,5 m/s à 10 m d'altitude sont proposés dans la Figure 18. Ces résultats montrent la variabilité dans le champ de vitesse en intensité et en direction liée à la présence des bâtiments. Tout l'enjeu de l'utilisation d'un modèle numérique à l'échelle microscopique est dans l'évaluation de ces variations qui auront un impact significatif sur le déplacement du panache de pollens issu du jardin de la place de la République dans cette étude.

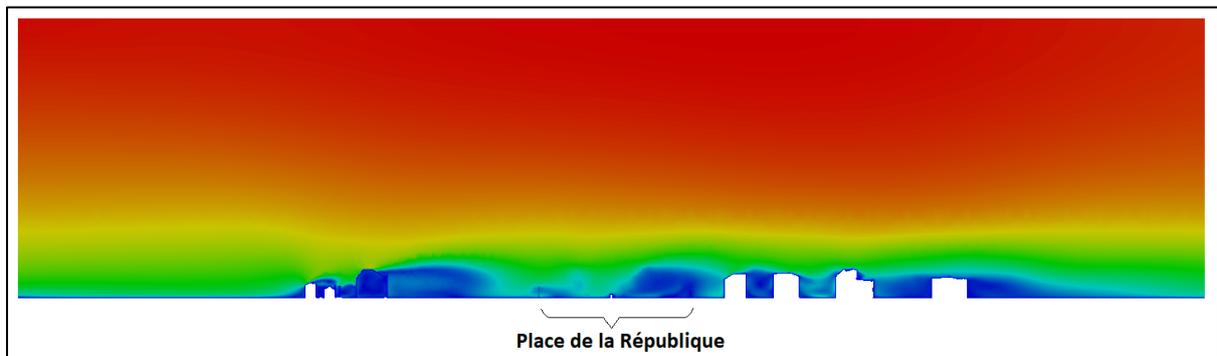
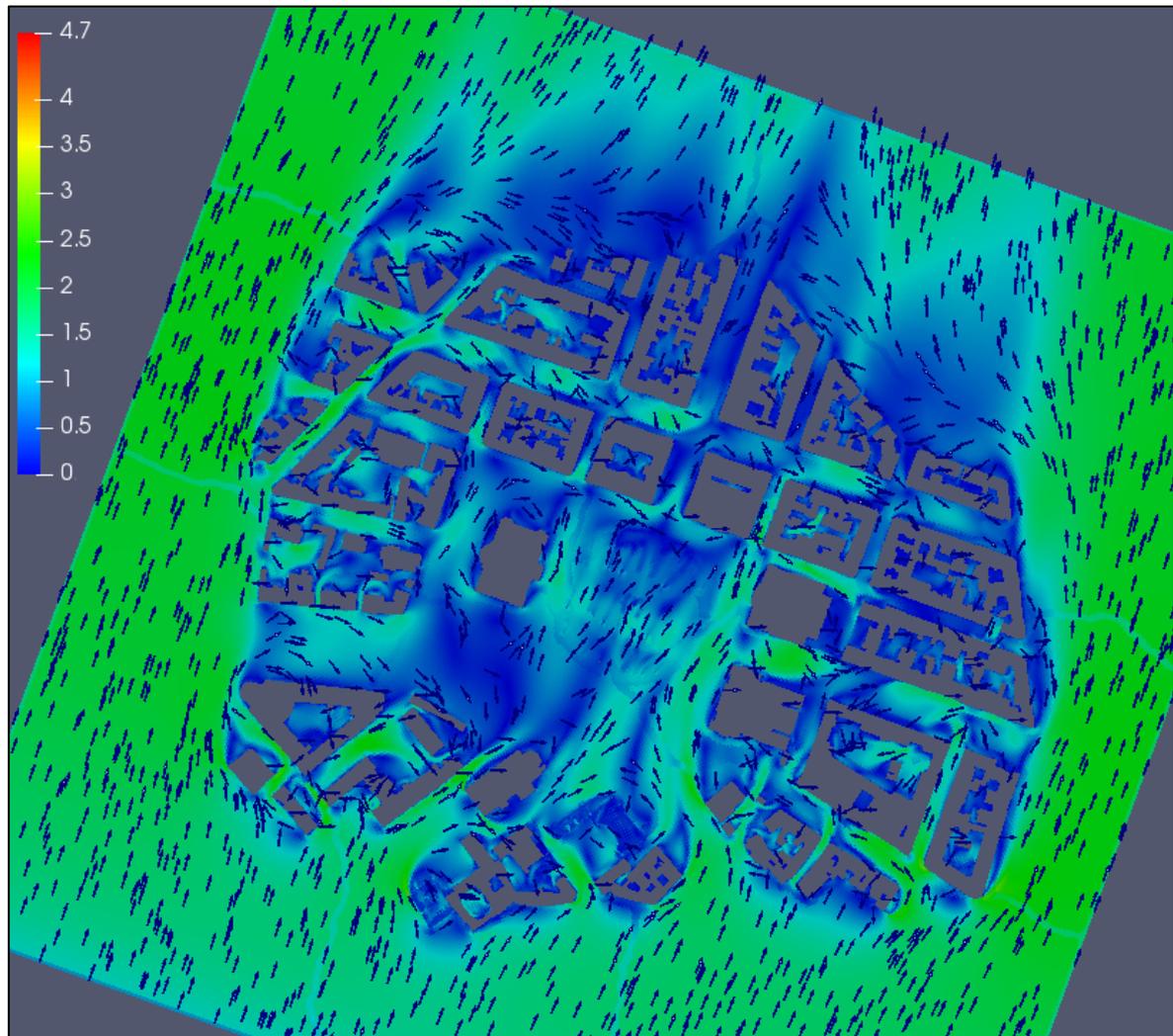


Figure 18 : Exemple de résultat aéraulique (m/s) pour un vent de direction est de 20° et d'intensité de 1,5 m/s

➤ **4.3.2. Résultats numériques de champ de concentration en pollen**

À l'issue des simulations, les cartes de concentrations des pollens à fort risque allergène au niveau de la zone d'intérêt ont été produites. Ne connaissant pas le terme d'émission, celui-ci a encore été réglé à 1 mais une analyse plus poussée est inévitable afin d'estimer ce paramètre pour s'approcher au mieux de la réalité. Ceci peut se vérifier au travers d'une campagne de mesure à proximité de la zone d'intérêt afin de compter le nombre de grains de pollen présent dans l'air. Un exemple de cartes de dispersion des différentes espèces suivies sont proposées dans

la Figure 19 (cf. Annexe E pour observer les résultats de concentration en pollen pour une direction de vent de 200°). La légende n'apparaît pas puisque les concentrations ne sont pas représentatives.

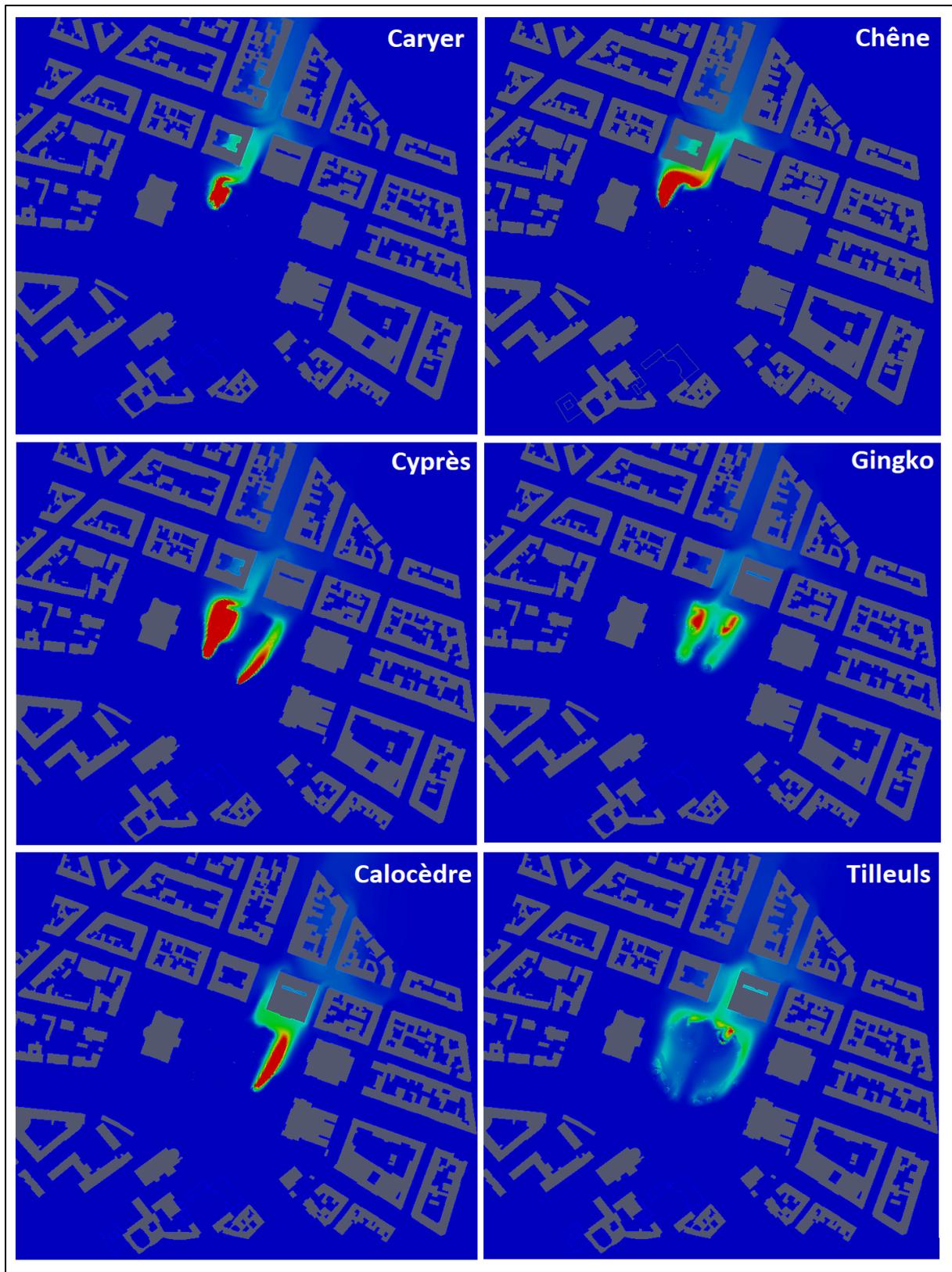


Figure 19 : Exemple de résultats de champ de concentration pour une vent de direction est de 20° et d'intensité de 1,5 m/s

SYNTHÈSE

Le travail réalisé dans le cadre de ce stage de fin d'études avait pour but de déterminer la dispersion du pollen en milieu urbain à l'aide de la modélisation 3D et de l'intégrer dans le modèle utilisé par AIR&D.

En premier lieu, les problématiques liées au contexte de la pollution atmosphérique en milieu urbain et notamment vis-à-vis du pollen ont été abordées. Étant donné que la pollution atmosphérique est en hausse et qu'elle a un impact sur l'intensité des saisons polliniques, les enjeux relatifs à la qualité de l'air et l'intérêt d'être en mesure d'estimer la dispersion du pollen par modélisation sont d'actualité. De même que le développement d'un cadre réglementaire et légal qui ne traite que de la surveillance de ce polluant pour le moment. Un rapide état de l'art a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation de la modélisation 3D dans un contexte sanitaire et agricole.

Dans un deuxième temps, l'intérêt s'est porté sur l'explication du fonctionnement du modèle créé par AIR&D pour leur expertise environnementale. Les différentes approches de modélisation existantes ont été introduites et expliquées brièvement avant de pouvoir justifier le choix d'un modèle de mécanique des fluides (CFD) de type RANS avec un schéma de fermeture des flux turbulents dit $k-\epsilon$ standard. Les différentes équations à résoudre pour décrire la dynamique des polluants atmosphériques ont été exprimées en prenant différents phénomènes en compte comme la présence de la végétation. La bibliothèque logicielle OpenFOAM dont est issu le code CFD 3D d'AIR&D ainsi que ses fonctionnalités de création de domaine d'étude par Salomé et de traitement des résultats par ParaView ont été présentées avant d'effectuer une analogie avec la modélisation de la dispersion du pollen. Il a été remarqué que l'équation de transport du pollen se distingue de celle des polluants atmosphériques par la prise en compte de la gravité et l'absence de diffusion moléculaire.

Troisièmement, le modèle ayant été adapté pour le transport du pollen a été testé sur des expériences de relâchement et recapture du pollen au sein d'un champ de maïs aux États-Unis. Après avoir réglé la sensibilité du maillage, le modèle a d'abord été validé en champ de vitesse en prenant en compte différents coefficients de traînée représentant la végétation. Par la suite, une étude de sensibilité sur le choix du nombre de Schmidt turbulent, un paramètre obligatoire à une telle modélisation a permis de montrer la variabilité du champ de concentration en pollen. Par une analyse de différents indices de performance, le nombre de Schmidt le plus adapté a été choisi en fonction de la localisation de la source de pollen. De plus, une étude de sensibilité sur la prise en compte de la gravité dans le modèle a prouvé la nécessité d'un tel paramètre dans la modélisation de la dispersion du pollen.

Enfin, un protocole à suivre pour la réalisation d'une future étude a été proposée sur la place de la République située à Strasbourg. La localisation du site d'étude permet d'introduire les enjeux derrière une étude du suivi du pollen. Par l'identification des arbres dont le pollen est à fort risque allergène et la diminution du domaine d'étude en suivant les recommandations de [Franke et al., 2007], il est possible de réduire au maximum le temps de calcul tout en restant fidèle à la réalité. Une réflexion sur les couples de direction/intensité du vent à modéliser est tout de même nécessaire. En effet, en fonction des échéances d'une étude, seuls quelques couples principaux peuvent être considérés avant de pondérer les résultats par fréquence d'apparition et d'en déduire un champ de concentration en pollen réaliste obtenu par moyenne statistique. Une analyse plus poussée sur la définition du terme d'émission compris dans l'équation de transport du pollen est encore à développer : soit en considérant des données de comptages pour définir un débit de pollen en grain/s par maille d'arbre, soit par l'intermédiaire de campagne de mesure afin de caler le modèle.

RÉFÉRENCES

- S. Amiroudine et J.-L. Battaglia, « Mécanique des fluides, cours et exercices », Dunod, 3^{ème} édition, p. 314, 2017.
- J. H. Amorim, V. Rodrigues, R. Tavares, J. Valente, et C. Borrego, « CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion », *Science of The Total Environment*, vol. 461-462, p. 541-551, sept. 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.031.
- J. – P. Besancenot, « Notre santé à l'épreuve du changement climatique », Paris, Delachaux et Niestlé, p. 221, 2007.
- R. Buccolieri, J.-L. Santiago, E. Rivas, et B. Sáanchez, « Reprint of: Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects », *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 37, p. 56-64, janv. 2019, doi: 10.1016/j.ufug.2018.07.004.
- P. Cariñanos, C. Galán, P. Alcázar, et E. Domínguez, « Analysis of the Particles Transported with Dust-Clouds Reaching Cordoba, Southwestern Spain », *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 46, n° 2, p. 141-146, févr. 2004, doi: 10.1007/s00244-003-2273-9.
- J. C. Chang et S. R. Hanna, « Air quality model performance evaluation », *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 87, n° 1-3, sept. 2004, doi: 10.1007/s00703-003-0070-7.
- S. Dupont, Y. Brunet, et N. Jarosz, « Eulerian modelling of pollen dispersal over heterogeneous vegetation canopies », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 141, n° 2-4, p. 82-104, déc. 2006, doi: 10.1016/j.agrformet.2006.09.004.
- C. Efstathiou, S. Isukapalli, et P. Georgopoulos, « A mechanistic modeling system for estimating large-scale emissions and transport of pollen and co-allergens », *Atmospheric Environment*, vol. 45, n° 13, p. 2260-2276, avr. 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.12.008.
- European Environment Agency, « EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016: technical guidance to prepare national emission inventories », 2016.
- F. J. Ferrandino et D. E. Aylor, « Deposition of particles to a wheat canopy: The importance of inertial impaction », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 34, n° 2-3, p. 195-204, avr. 1985, doi: 10.1016/0168-1923(85)90019-X.
- J. Fiates et S. S. V. Vianna, « Numerical modelling of gas dispersion using OpenFOAM », *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 104, p. 277-293, nov. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.09.011.
- J. Franke, C. Hirsch, A. G. Jensen, H. Krus, P. Westbury, « Recommendations on the use of CFD in wind engineering », *COST Action C 14, C1*, p. 11, 2004.
- J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen, B. Carissimo, « Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment », *COST Action 732*, p. 52, 2007.
- S. C. Gleicher, M. Chamecki, S. A. Isard, Y. Pan, et G. G. Katul, « Interpreting three-dimensional spore concentration measurements and escape fraction in a crop canopy using a coupled Eulerian-Lagrangian stochastic model », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 194, p. 118-131, août 2014, doi: 10.1016/j.agrformet.2014.03.020.
- C. Gromke et B. Blocken, « Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part I: Quality assurance studies and turbulent Schmidt number analysis for RANS CFD simulations », *Environmental Pollution*, vol. 196, p. 214-223, janv. 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2014.10.016.

- N. Helbig, B. Vogel, H. Vogel, et F. Fiedler, « Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale », *Aerobiologia*, vol. 20, n° 1, p. 3-19, mars 2004, doi: 10.1023/B:AERO.0000022984.51588.30.
- N. Jarosz, B. Loubet, et L. Huber, « Modelling airborne concentration and deposition rate of maize pollen », *Atmospheric Environment*, vol. 38, n° 33, p. 5555-5566, oct. 2004, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.027.
- S. Kawashima et Y. Takahashi, « An improved simulation of mesoscale dispersion of airborne cedar pollen using a flowering-time map », *Grana*, vol. 38, n° 5, p. 316-324, oct. 1999, doi: 10.1080/001731300750044555.
- R. Maynard, M. Krzyzanowski, N. Vilahur, M.-E. Héroux, Weltgesundheitsorganisation, et Regionalbüro für Europa, *Evolution of WHO air quality guidelines past, present and future*. 2017.
- T. L. Ogren, « The allergy-fighting garden: stop asthma and allergies with smart landscaping », First edition. Berkeley: Ten Speed Press, 2015.
- Y. Pan, M. Chamecki, et S. A. Isard, « Large-eddy simulation of turbulence and particle dispersion inside the canopy roughness sublayer », *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 753, p. 499-534, août 2014, doi: 10.1017/jfm.2014.379.
- A. Petroff, « Mechanistic study of aerosol dry deposition on vegetated canopies », *Radioprotection*, vol. 40, p. S443-S450, mai 2005, doi: 10.1051/radiopro:2005s1-065.
- N. Reiminger, « Conception et utilisation d'un modèle 3D de la pollution atmosphérique en milieu urbain », Mémoire de fin d'étude pour le diplôme d'ingénieur, ENGEES, Strasbourg, p. 84, 2017.
- P. J. Richards et S. E. Norris, « Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited », *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 99, n° 4, p. 257-266, avr. 2011, doi: 10.1016/j.jweia.2010.12.008.
- P. J. Roache, « Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies », *Journal of Fluids Engineering*, vol. 116, n° 3, p. 405-413, sept. 1994, doi: 10.1115/1.2910291.
- S. Saarikoski et al., « Chemical composition of aerosols during a major biomass burning episode over northern Europe in spring 2006: Experimental and modelling assessments », *Atmospheric Environment*, vol. 41, n° 17, p. 3577-3589, juin 2007, doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.12.053.
- S. T. Salesky, M. G. Giometto, M. Chamecki, et M. Lehning, « The transport and deposition of heavy particles in complex terrain: insights from an Eulerian model for large eddy simulation », p. 21, 2019.
- M. H. Salim, K. H. Schlünzen, et D. Grawe, « Including trees in the numerical simulations of the wind flow in urban areas: Should we care? », *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 144, p. 84-95, sept. 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.05.004.
- S. Schueler et K. H. Schlünzen, « Modeling of oak pollen dispersal on the landscape level with a mesoscale atmospheric model », *Environmental Modeling & Assessment*, vol. 11, n° 3, p. 179-194, août 2006, doi: 10.1007/s10666-006-9044-8.
- L. M. Sosnoskie, T. M. Webster, D. Dales, G. C. Rains, T. L. Grey, et A. S. Culpepper, « Pollen Grain Size, Density, and Settling Velocity for Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) », *Weed Science*, vol. 57, n° 4, p. 404-409, août 2009, doi: 10.1614/WS-08-157.1.
- Y. Tominaga et al., « AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings », *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no 10-11, p. 1749-1761, oct. 2008, doi: 10.1016/j.jweia.2008.02.058.

R. van Hout et J. Katz, « A method for measuring the density of irregularly shaped biological aerosols such as pollen », *Journal of Aerosol Science*, vol. 35, n° 11, p. 1369-1384, nov. 2004, doi: 10.1016/j.jaerosci.2004.05.008.

C. Vitteau, « Mise en évidence des sources d'apports et de pertes de polluants atmosphériques et intégration dans un code de calcul 3D de qualité de l'air », Mémoire de fin d'étude pour le diplôme d'ingénieur, ENGEES, Strasbourg, p. 78, 2019.

P. Zeng et H. Takahashi, « A first-order closure model for the wind flow within and above vegetation canopies », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 103, n° 3, p. 301-313, juin 2000, doi: 10.1016/S0168-1923(00)00133-7.

ANNEXE

SOMMAIRE DES ANNEXES

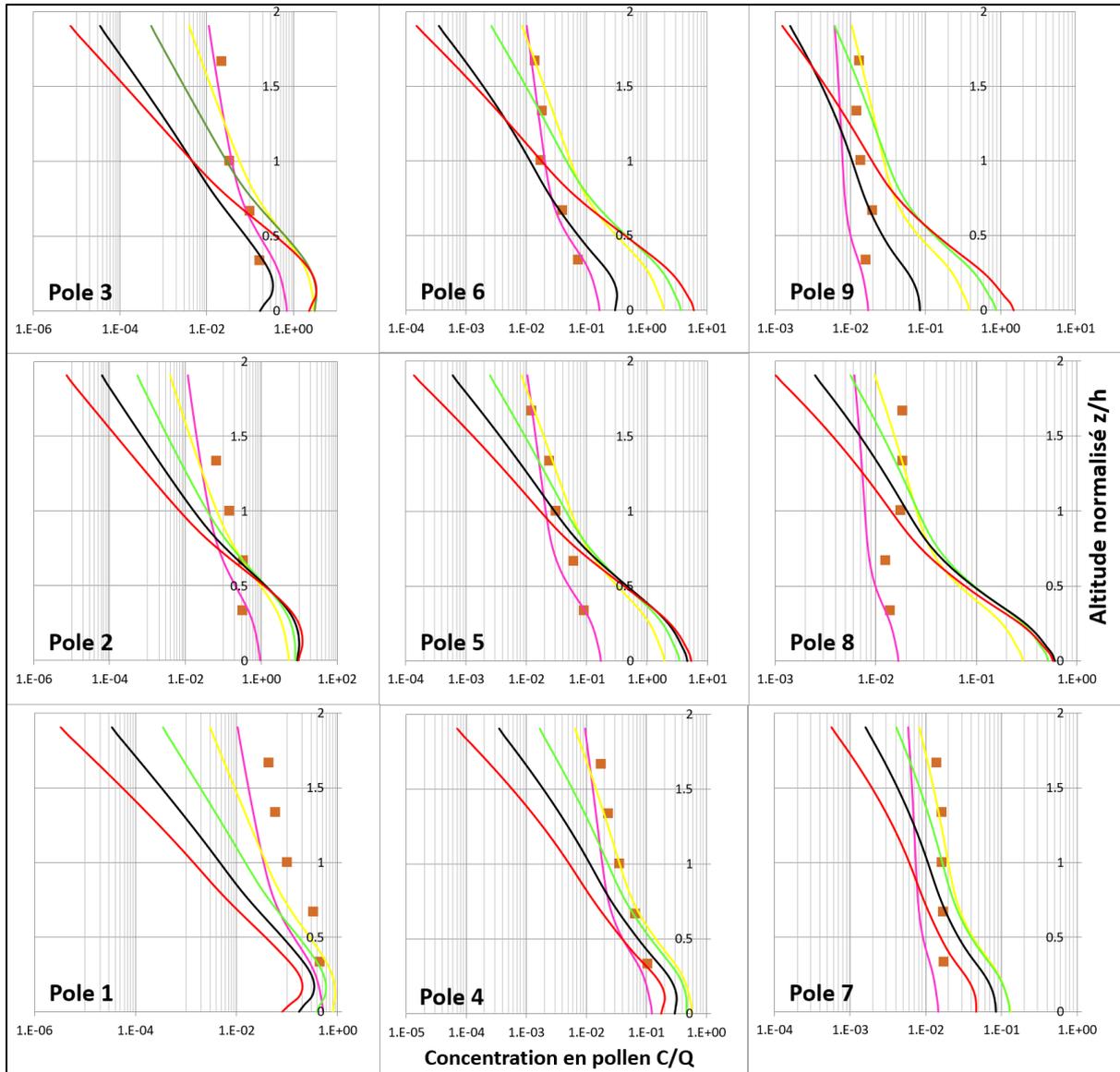
ANNEXE A : INFLUENCE DU NOMBRE DE SCHMIDT AVEC $C_D = 0,2$	58
ANNEXE B : INFLUENCE DU NOMBRE DE SCHMIDT AVEC $C_D = 0,4$	64
ANNEXE C : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ	70
ANNEXE D : INVENTAIRE DES ESPÈCES D'ARBRES DE LA PLACE DE LA RÉPUBLIQUE	76
ANNEXE E : SUIVI DES POLLENS POUR UNE DIRECTION DE VENT DE 200° ET UNE INTENSITÉ DE $1,5$ M/S.....	78

Liste des illustrations

FIGURE A1 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S1 POUR $C_D = 0,2$ – RUN 1	58
FIGURE A2 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S2 POUR $C_D = 0,2$ – RUN 1	59
FIGURE A3 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S3 POUR $C_D = 0,2$ – RUN 1	60
FIGURE A4 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S1 POUR $C_D = 0,2$ – RUN 2	61
FIGURE A5 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S2 POUR $C_D = 0,2$ – RUN 2	62
FIGURE A6 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S3 POUR $C_D = 0,2$ – RUN 2	63
FIGURE B1 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S1 POUR $C_D = 0,4$ – RUN 1	64
FIGURE B2 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S2 POUR $C_D = 0,4$ – RUN 1	65
FIGURE B3 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S3 POUR $C_D = 0,4$ – RUN 1	66
FIGURE B4 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S1 POUR $C_D = 0,4$ – RUN 2	67
FIGURE B5 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S2 POUR $C_D = 0,4$ – RUN 2	68
FIGURE B6 : INFLUENCE DE SCT SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS DEPUIS S3 POUR $C_D = 0,4$ – RUN 2	69
FIGURE C1 : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 1 – RUN 1	70
FIGURE C2 : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 2 – RUN 1	71
FIGURE C3 : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 3 – RUN 1	72
FIGURE C4 : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 1 – RUN 2	73
FIGURE C5 : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 2 – RUN 2	74
FIGURE C6 : INFLUENCE DE LA GRAVITÉ SUR LES CONCENTRATIONS EN POLLENS ISSUS DE LA SOURCE 3 – RUN 2	75
FIGURE D1 : PLAN DE LA PLACE DE LA RÉPUBLIQUE AVEC L'EMPLACEMENT DES DIFFÉRENTES ESPÈCES D'ARBRES.....	76
TABLEAU D2 : INVENTAIRE DÉTAILLÉ DES ESPÈCES D'ARBRES PRÉSENTES DANS LA PLACE DE LA RÉPUBLIQUE	77
FIGURE E1 : RÉSULTATS AÉRAULIQUES POUR UN DIRECTION DE VENT DE 200° ET UNE INTENSITÉ DE 1.5 M/S	78
FIGURE E2 : RÉSULTATS DE CHAMPS DE CONCENTRATION À 1.8 M POUR UNE DIRECTION DE VENT DE 200° ET UNE INTENSITÉ DE 1.5 M/S.....	79

Annexe A : Influence du nombre de Schmidt avec $C_D = 0.2$

Figure A1 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 1 pour $C_D = 0.2$ – Run 1



Légende :

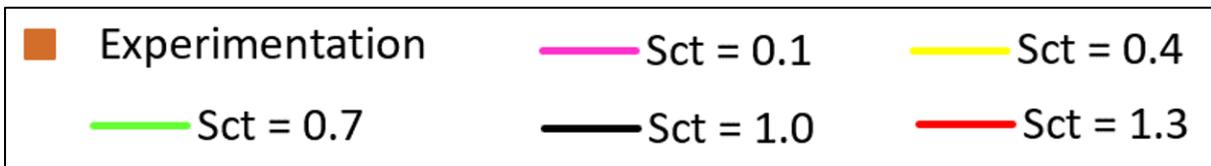
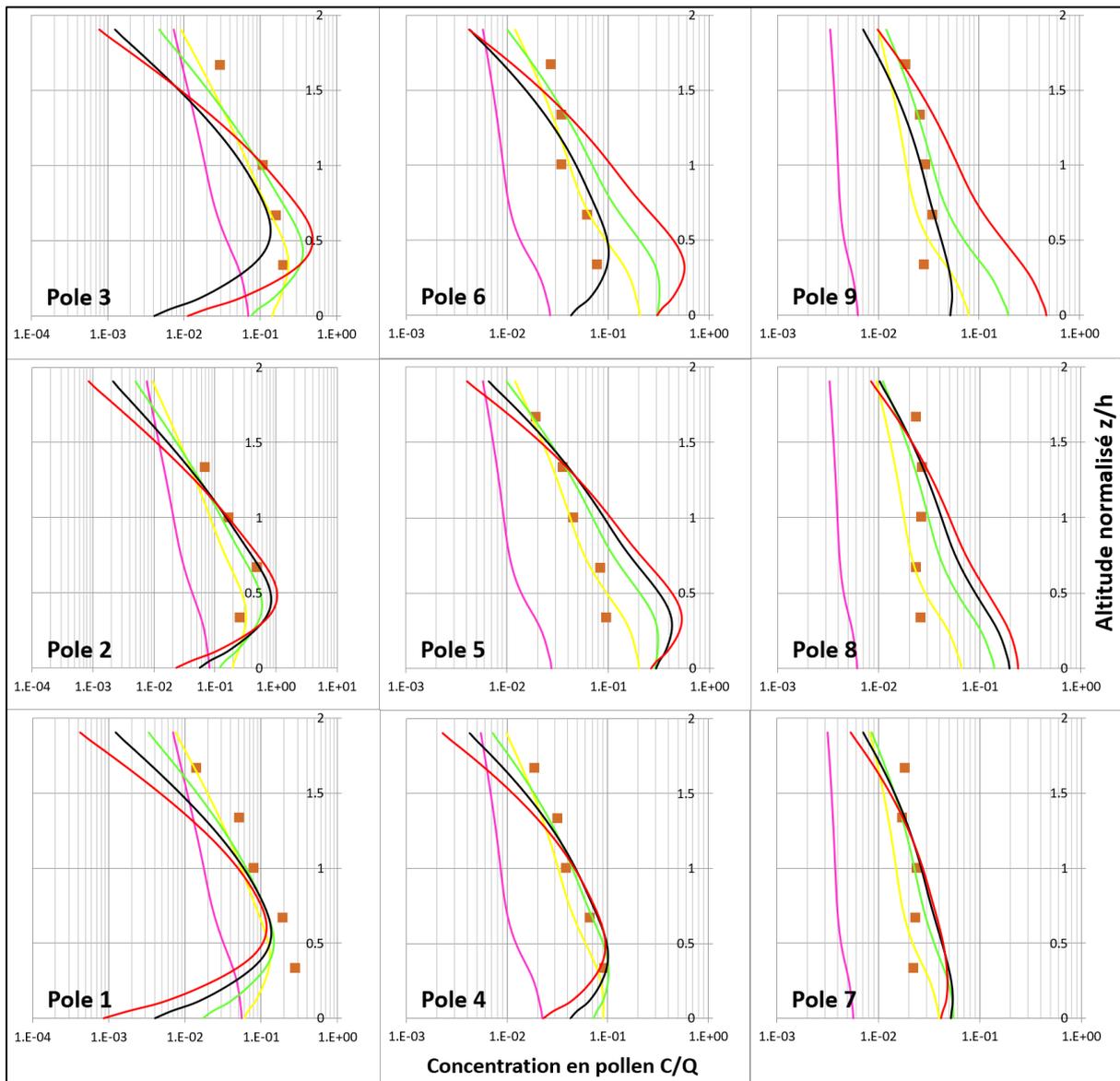


Figure A2 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 2 pour $C_D = 0,2$ - Run 1



Légende :

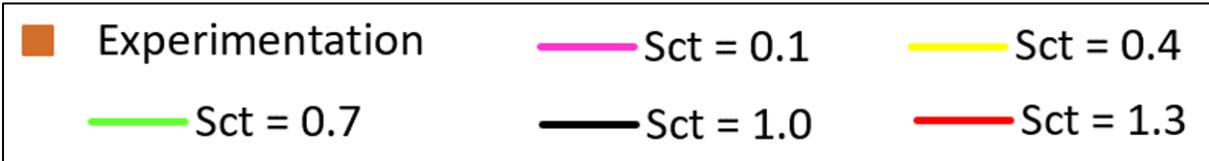
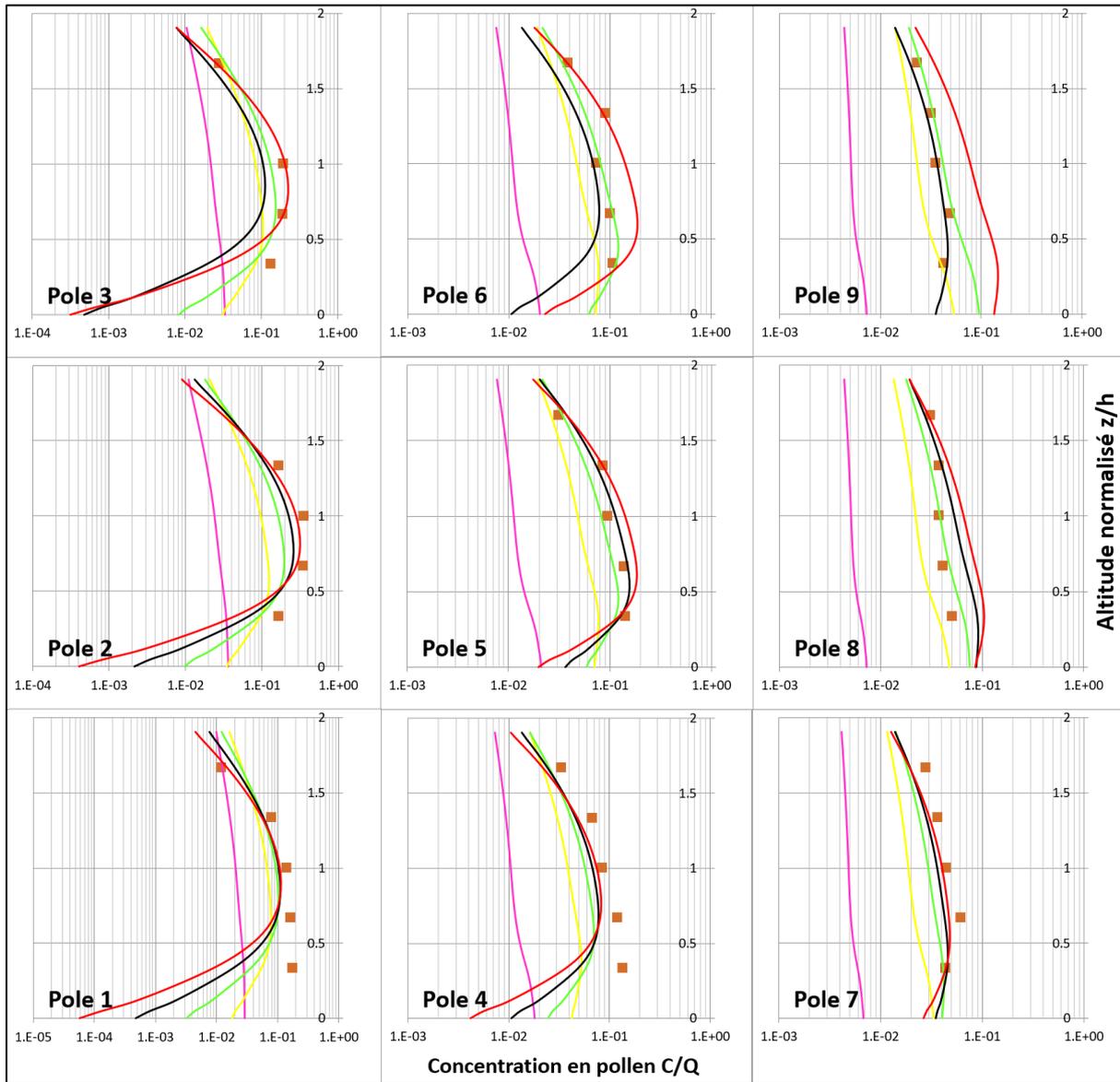


Figure A3 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour $C_D = 0,2$ - Run 1



Légende :

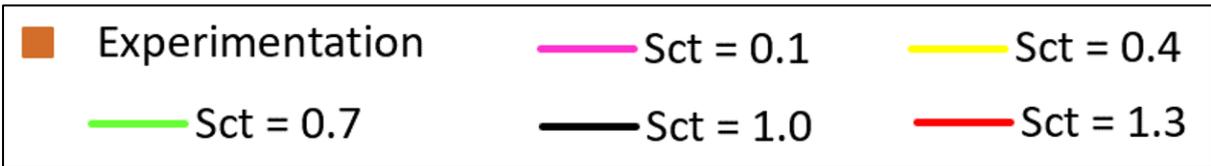
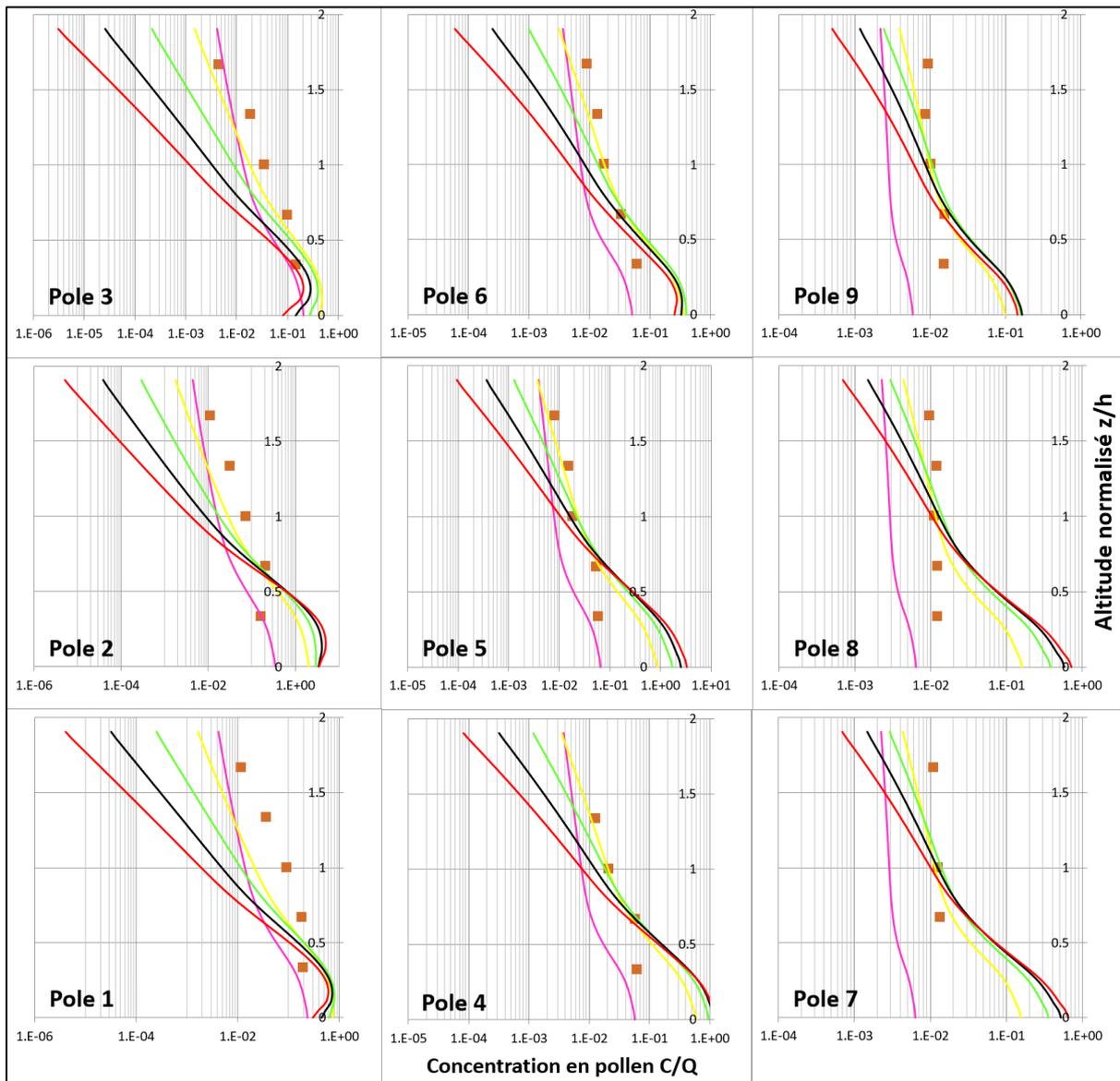


Figure A4 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 1 pour $C_D = 0,2$ - Run 2



Légende :

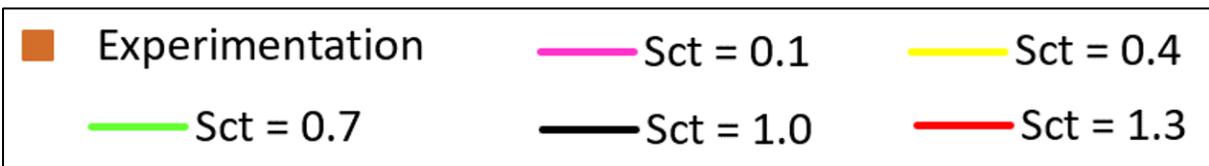
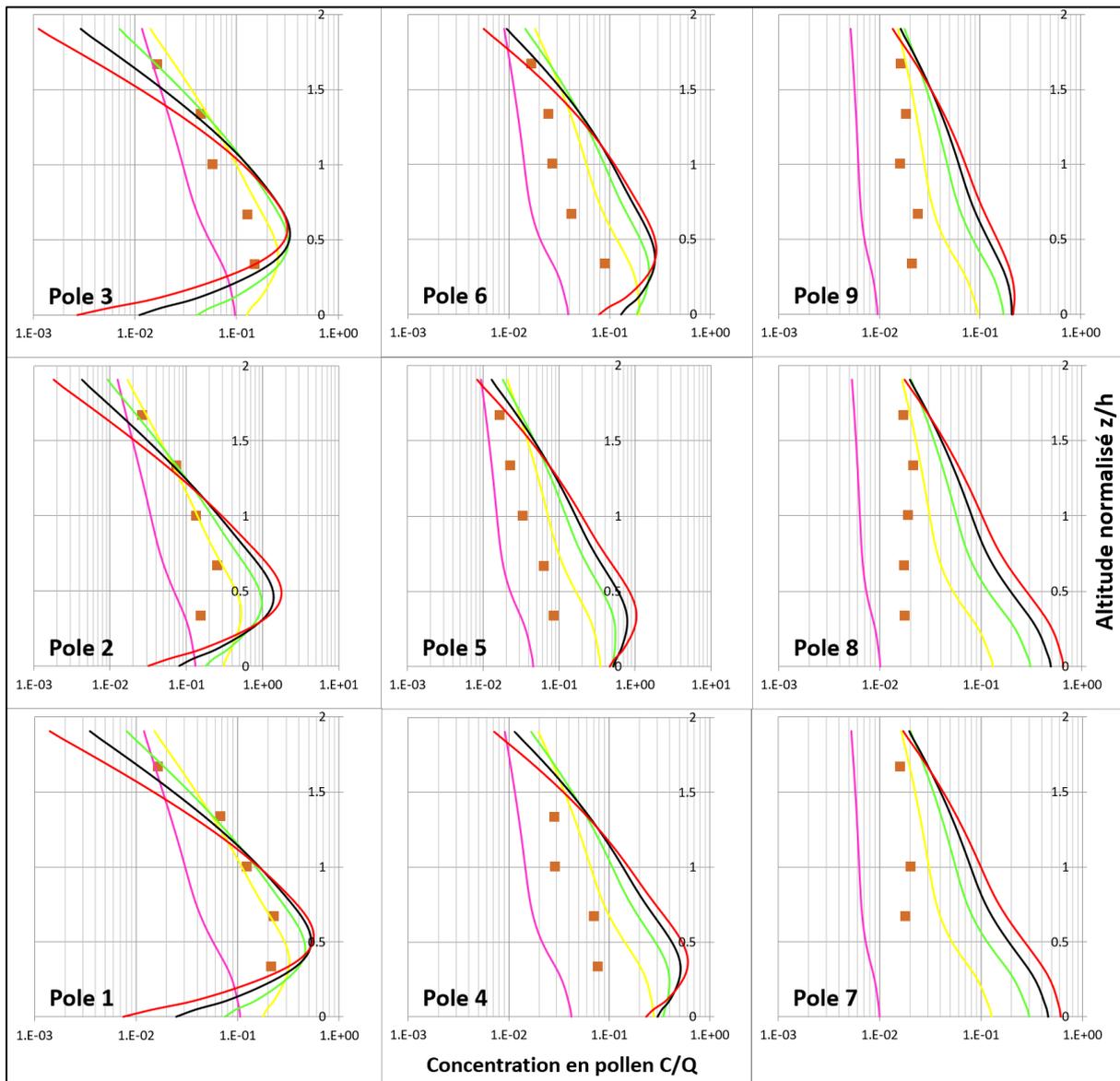


Figure A5 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 2 pour $C_D = 0,2$ - Run 2



Légende :

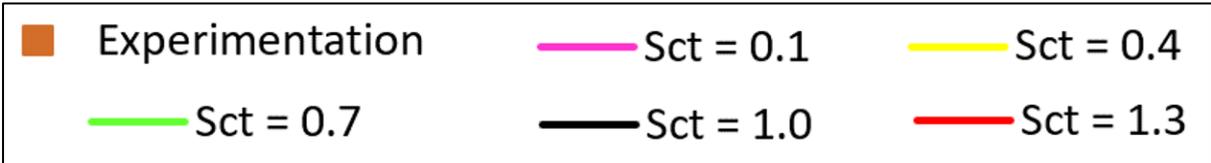
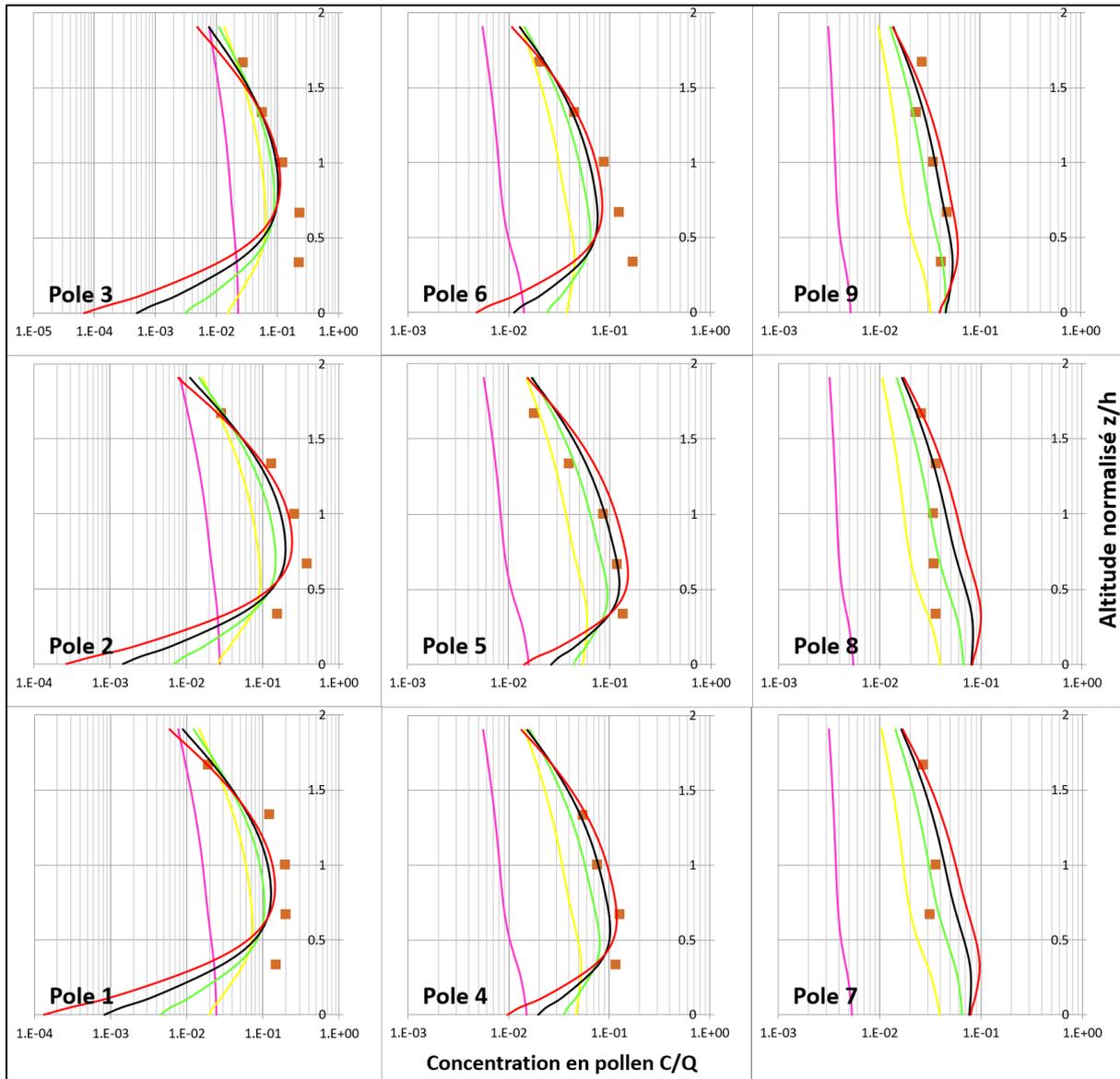
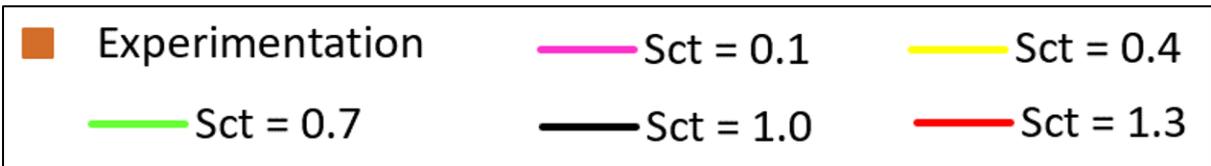


Figure A6 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour $C_D = 0,2$ - Run 2

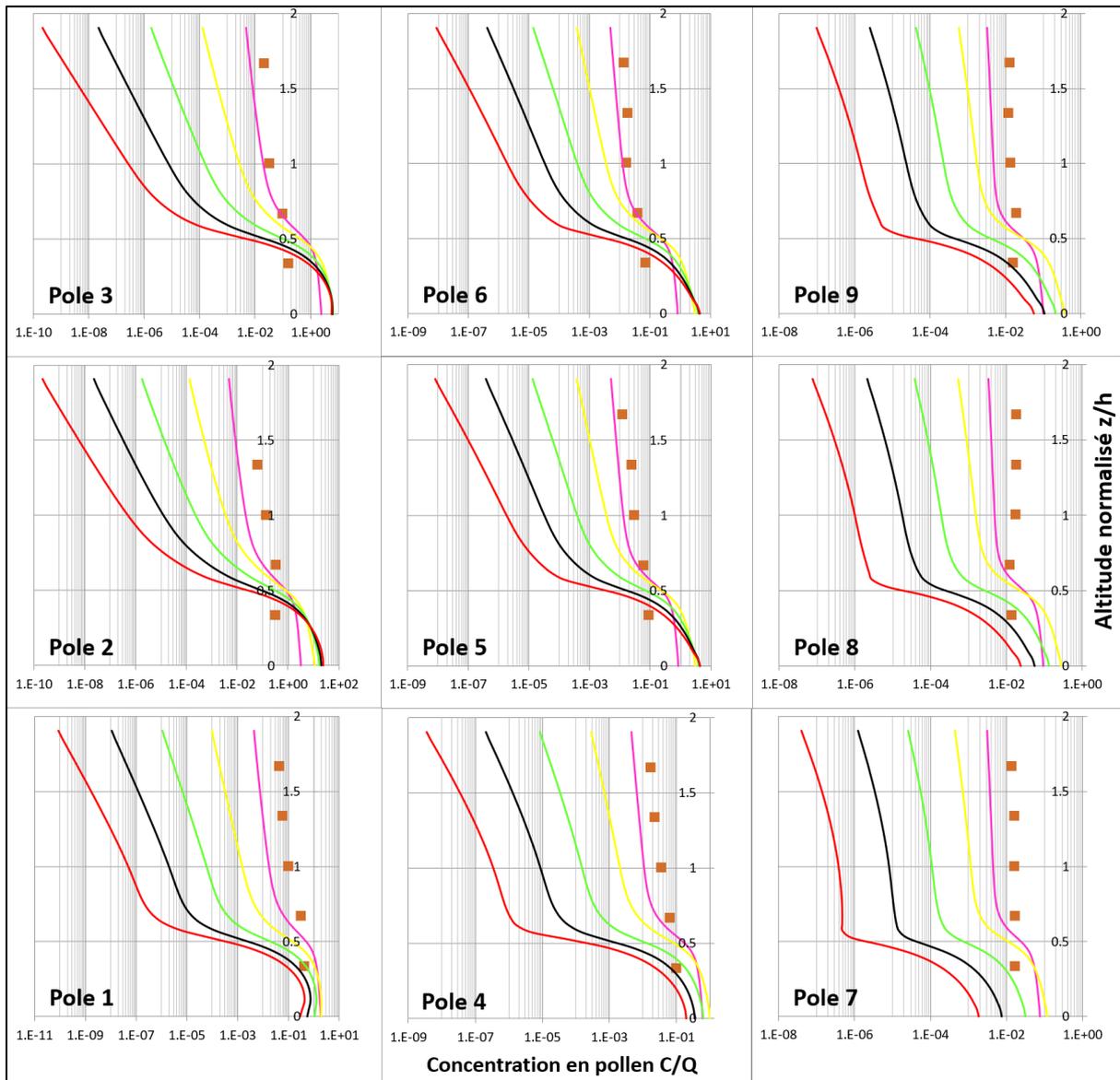


Légende :



Annexe B : Influence du nombre de Schmidt avec $C_D = 0.4$

Figure B1 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 1 pour $C_D = 0.4$ – Run 1



Légende :

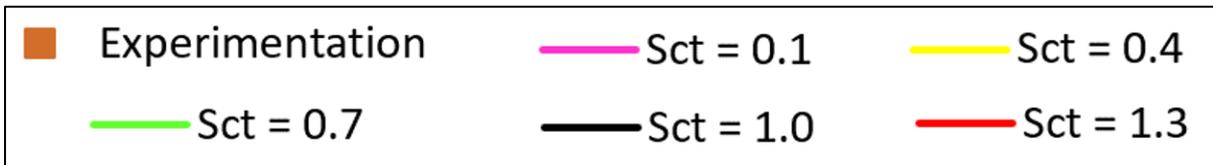
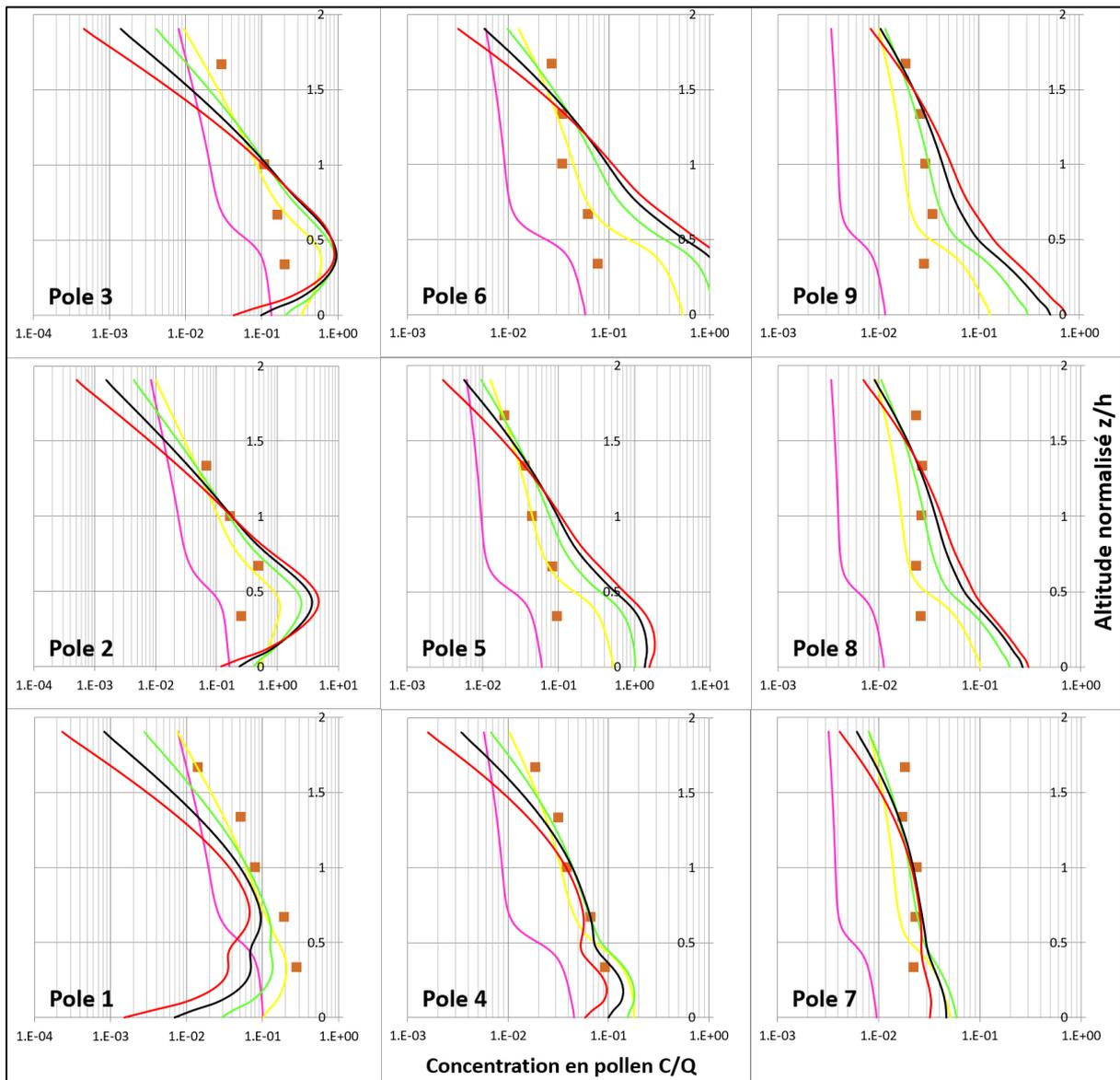


Figure B2 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 2 pour $C_D = 0,4$ - Run 1



Légende :

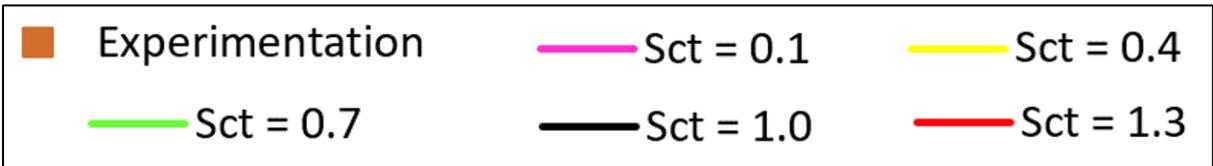
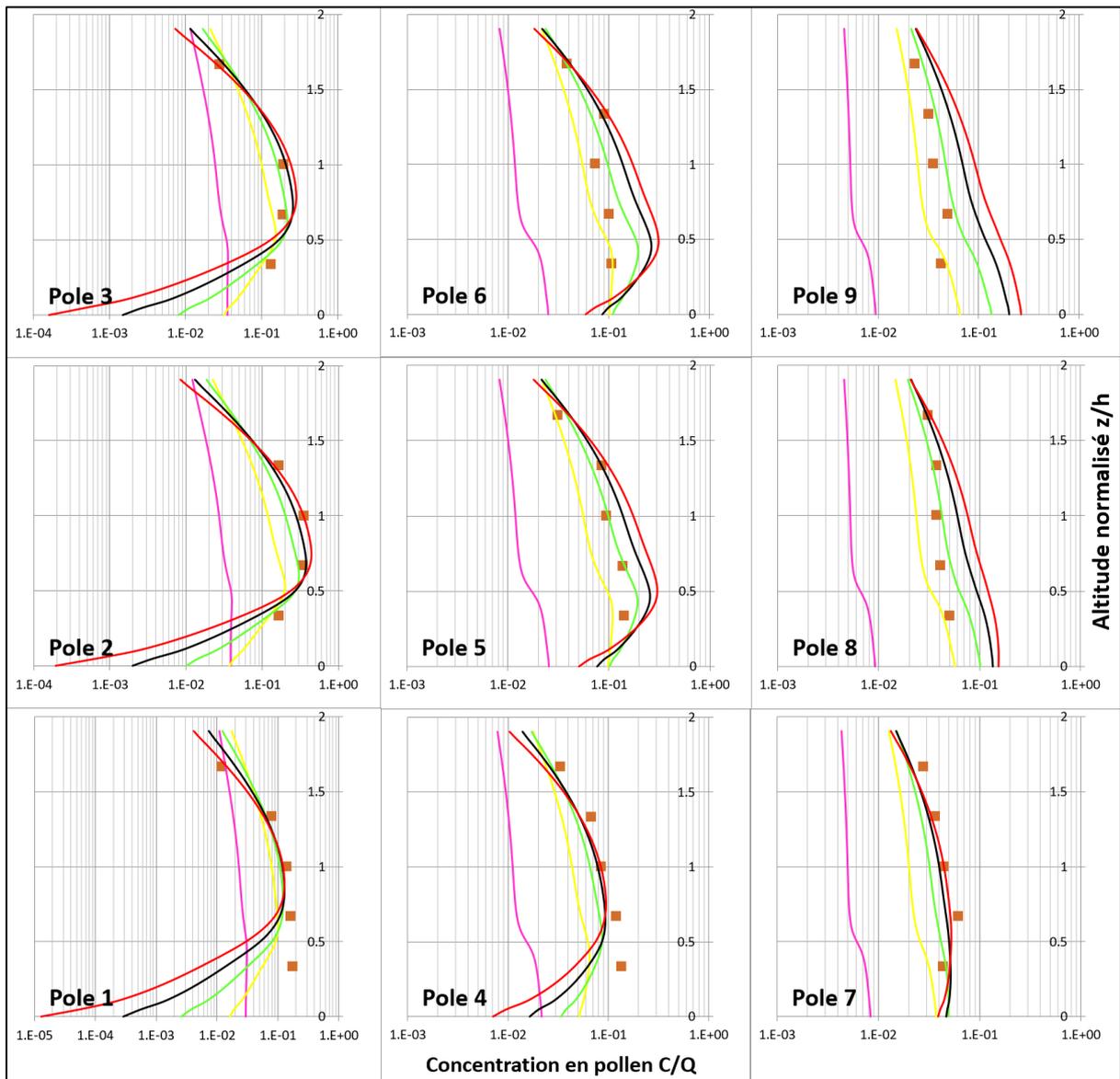


Figure B3 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour $C_D = 0,4$ - Run 1



Légende :

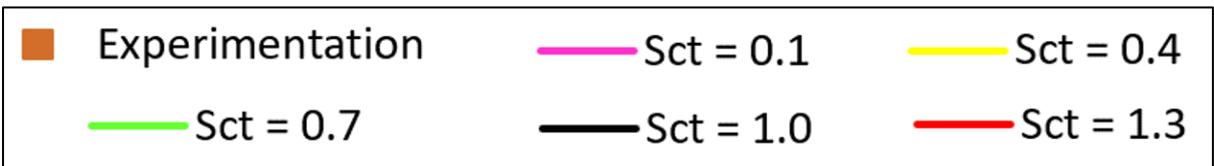
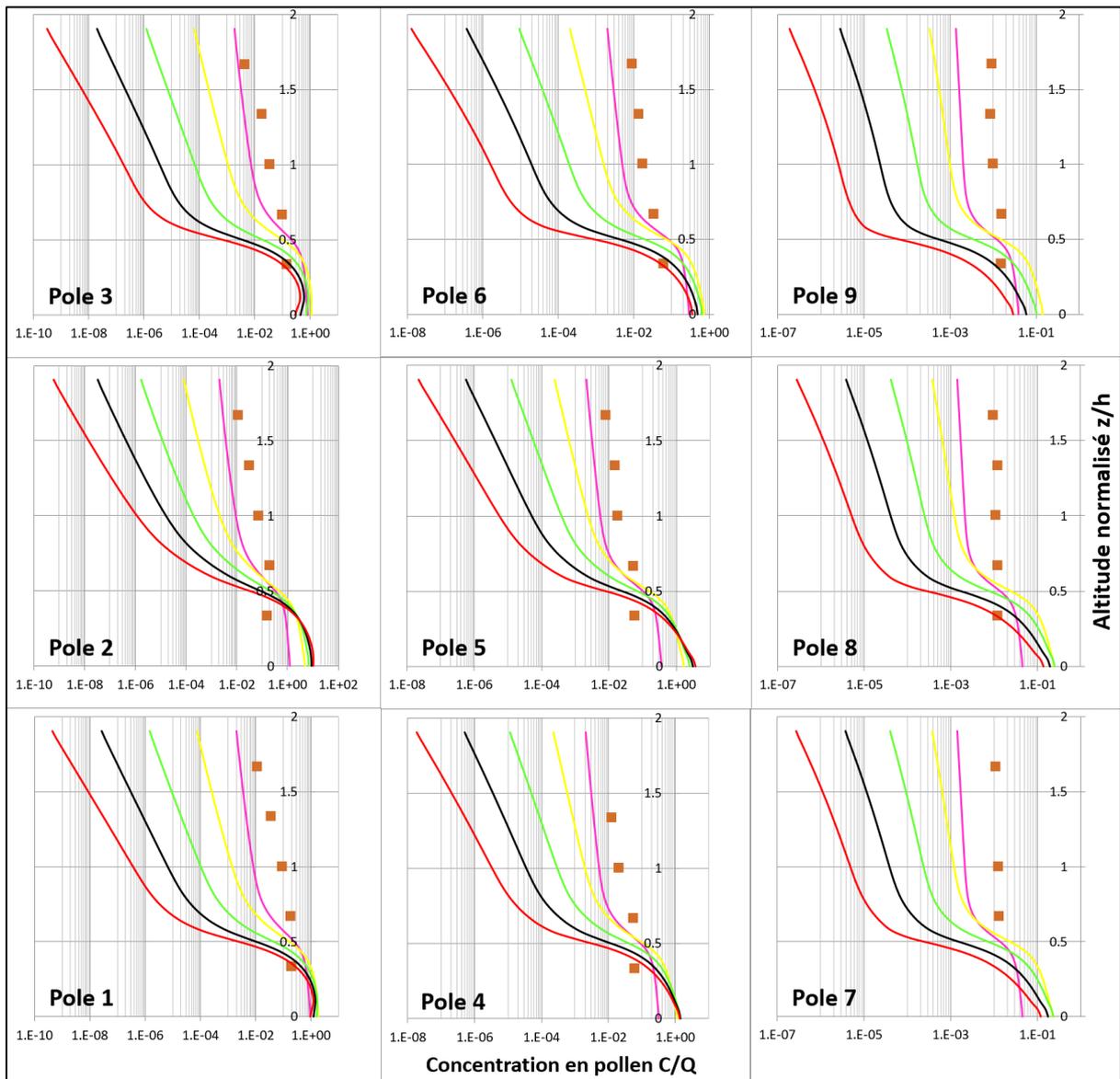


Figure B4 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 1 pour $C_D = 0,4$ - Run 2



Légende :

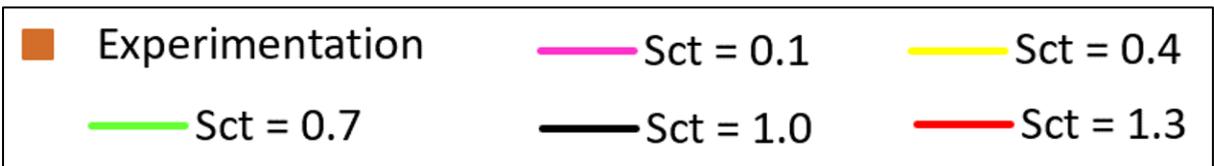
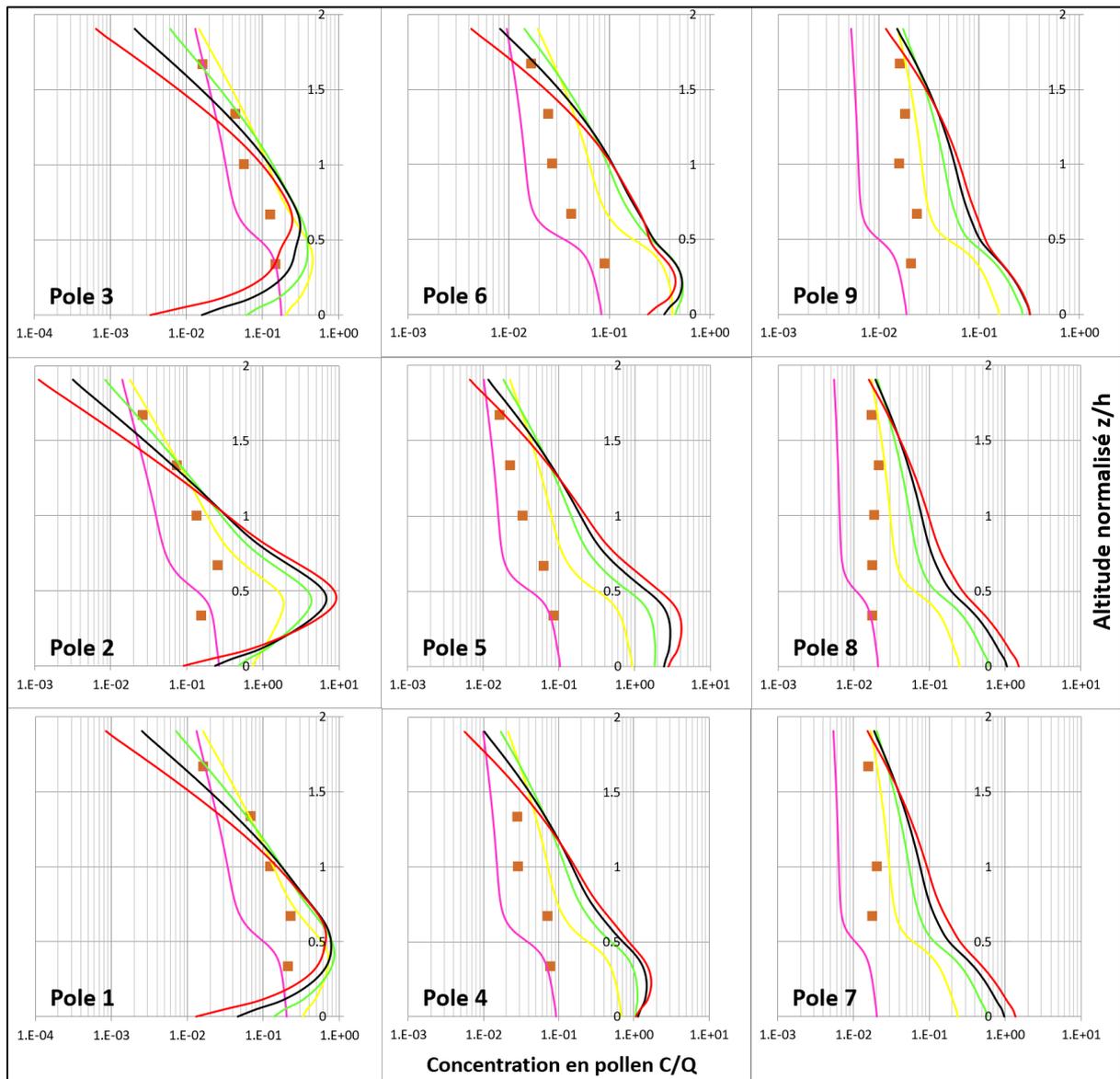


Figure B5 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 2 pour $C_D = 0,4$ - Run 2



Légende :

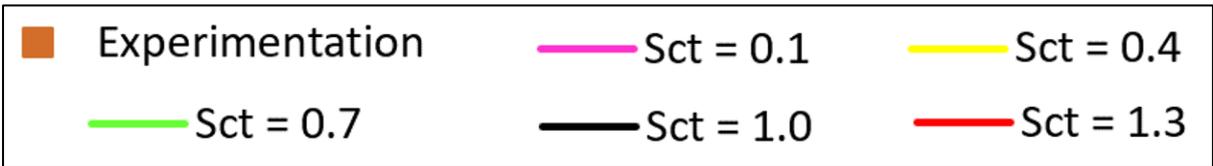
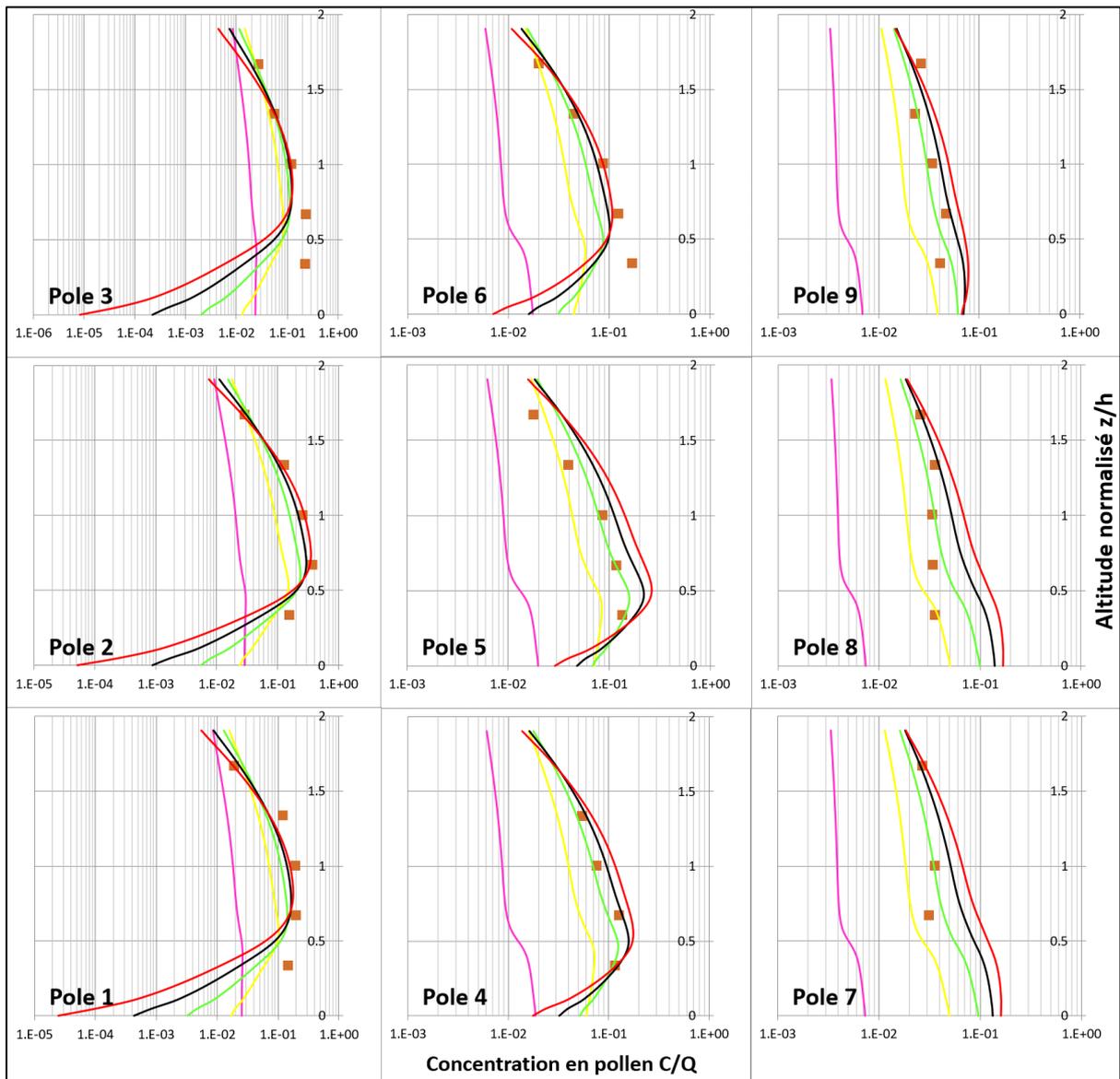
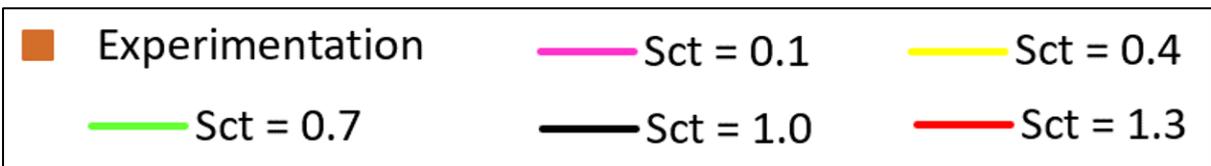


Figure B6 : Influence du nombre de Schmidt sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour $C_D=0.4$ - Run 2

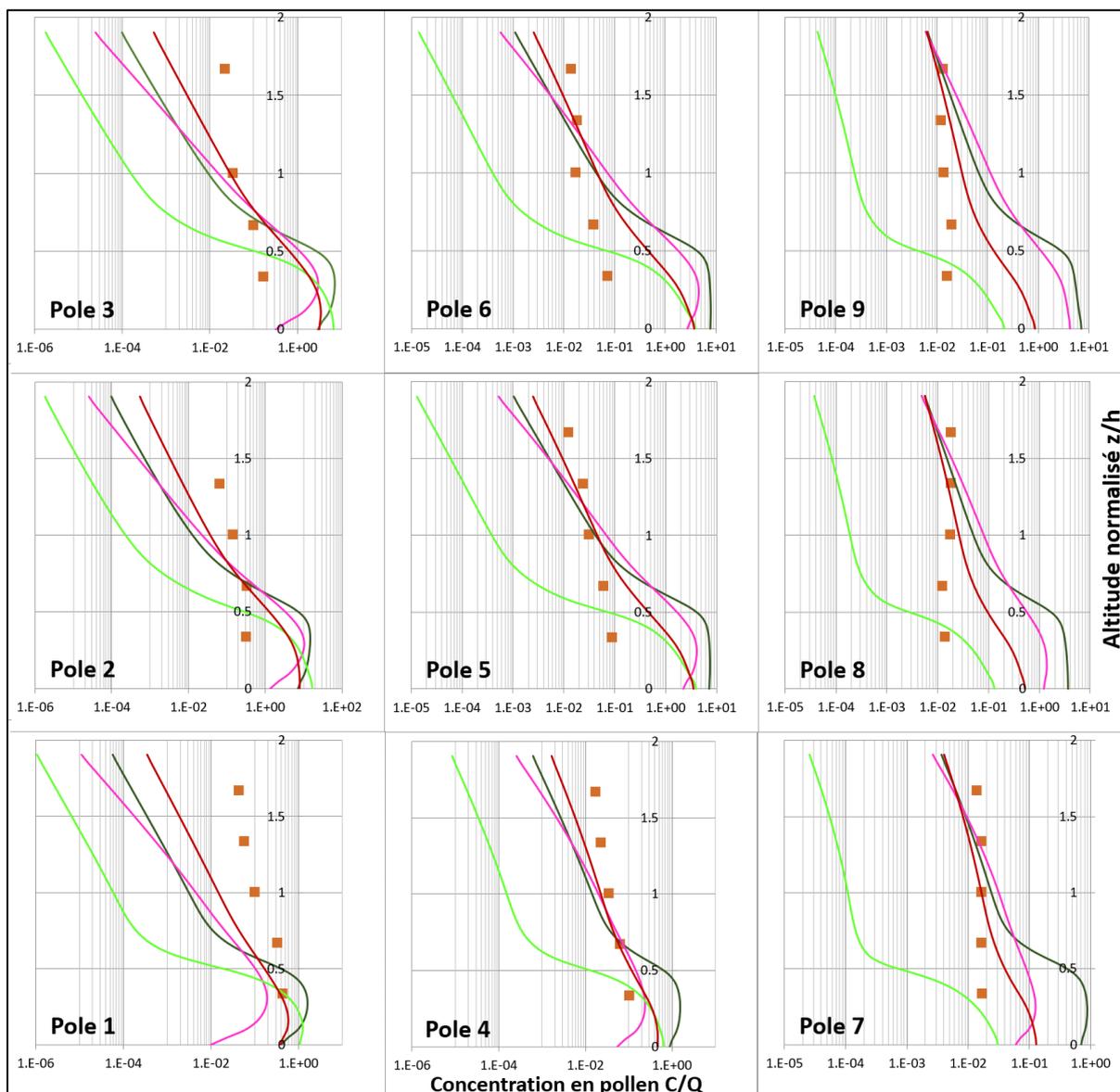


Légende :



Annexe C : Influence de la gravité

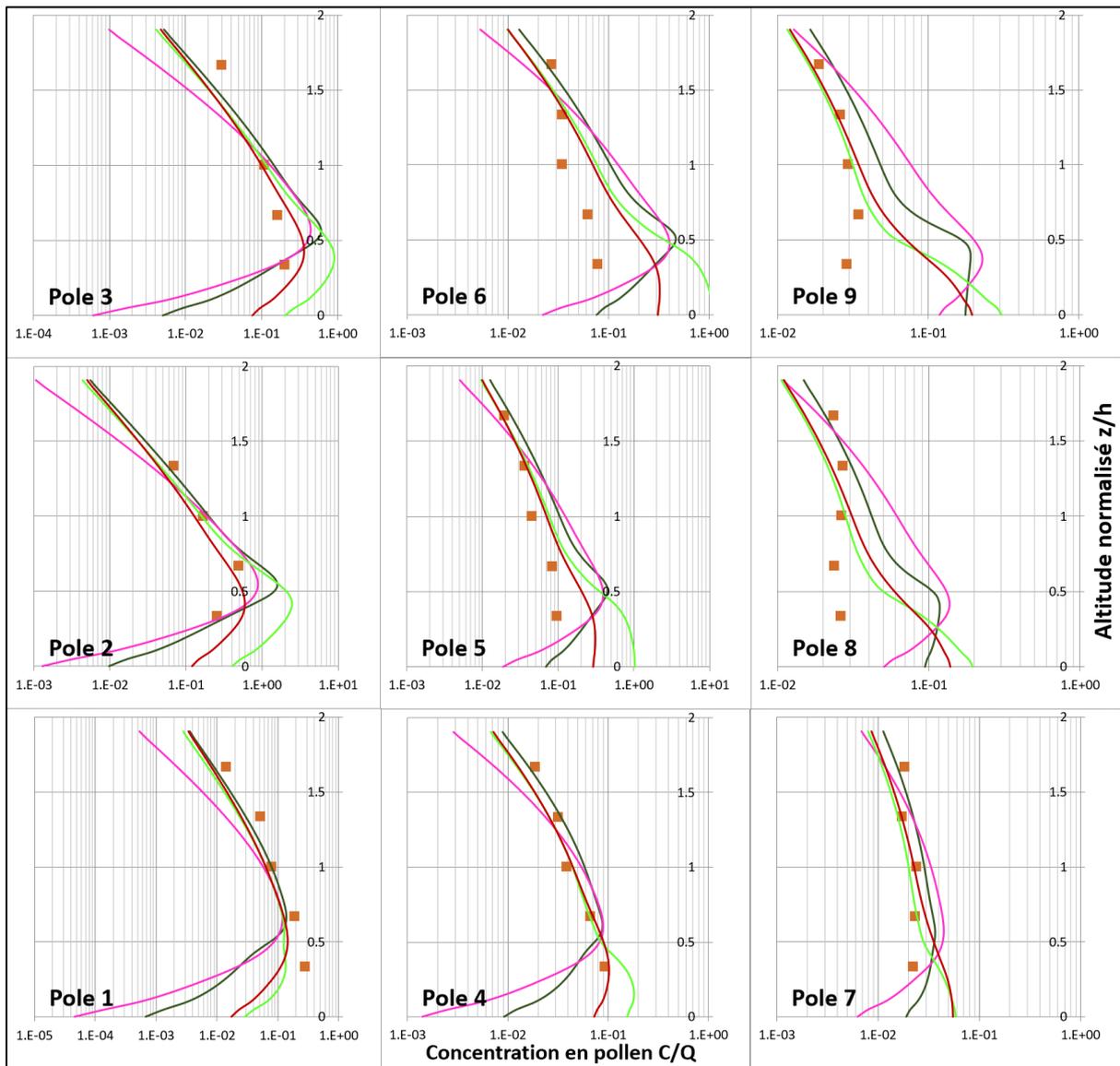
Figure C1 : Influence de la gravité sur les concentrations en pollens issus de la source 1 pour C_D différent - Run 1



Légende :



Figure C2 : Influence de la gravité sur les concentrations en pollens issus de la source 2 pour C_0 différent - Run 1



Légende :

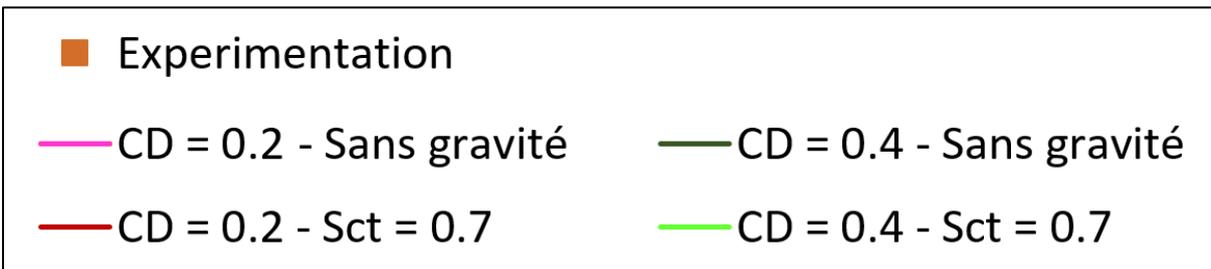
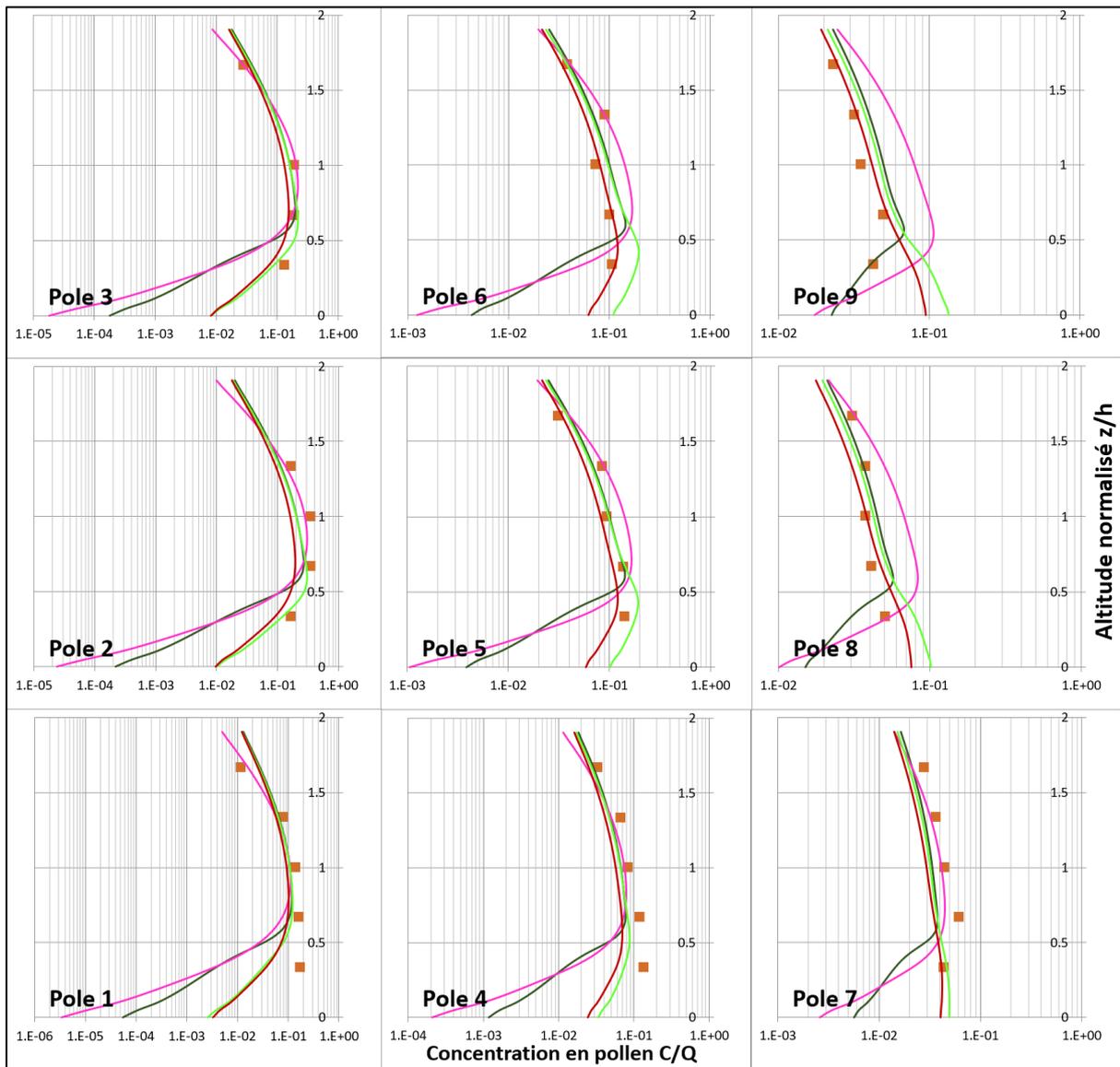


Figure C3 : Influence de la gravité sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour C_0 différent - Run 1



Légende :

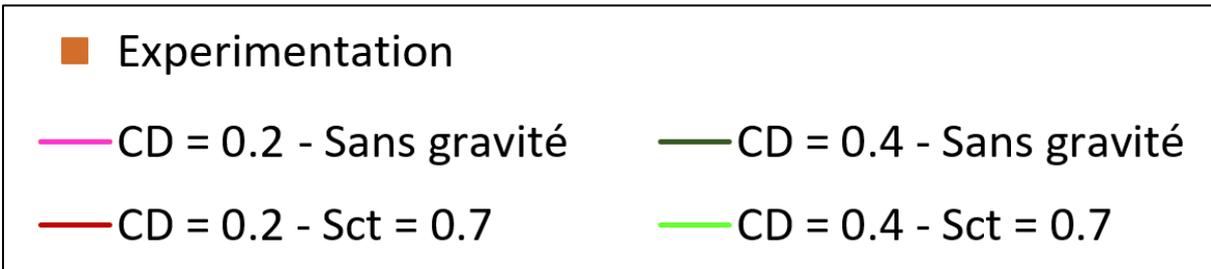


Figure C4 : Influence de la gravité sur les concentrations en pollens issus de la source 1 pour C_0 différent - Run 2

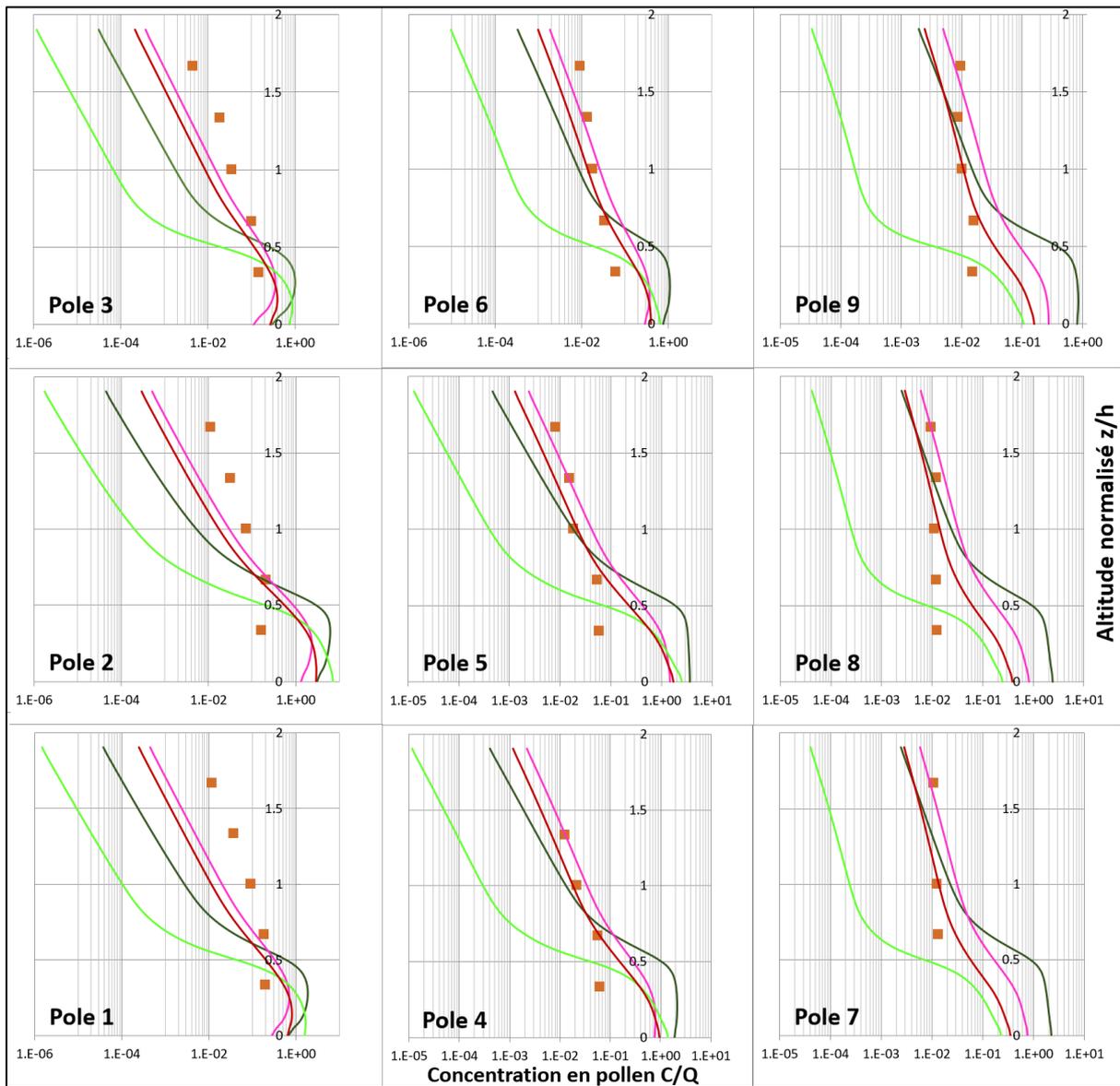
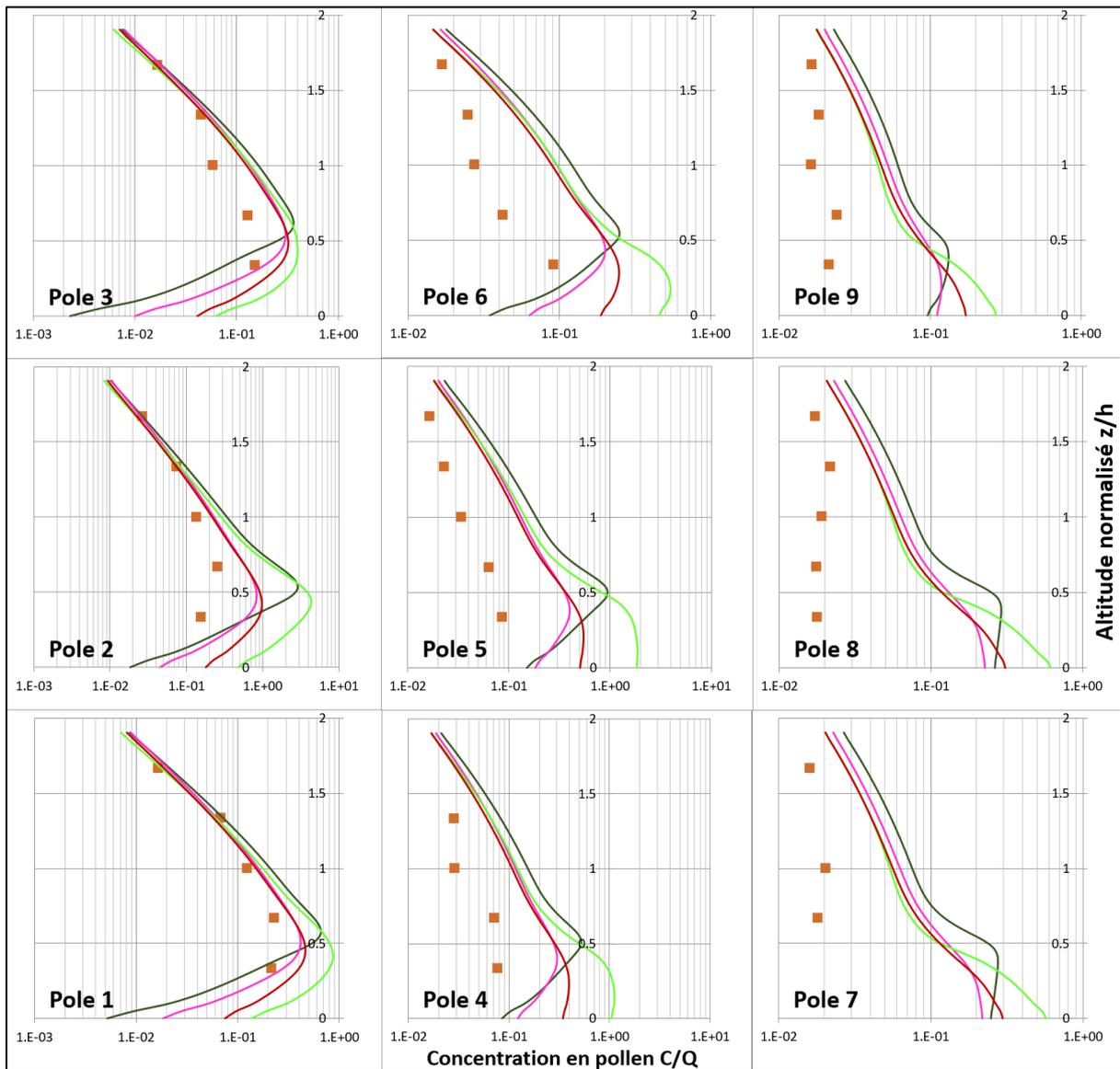


Figure C5 : Influence de la gravité sur les concentrations en pollens issus de la source 2 pour C_0 différent - Run 2



Légende :

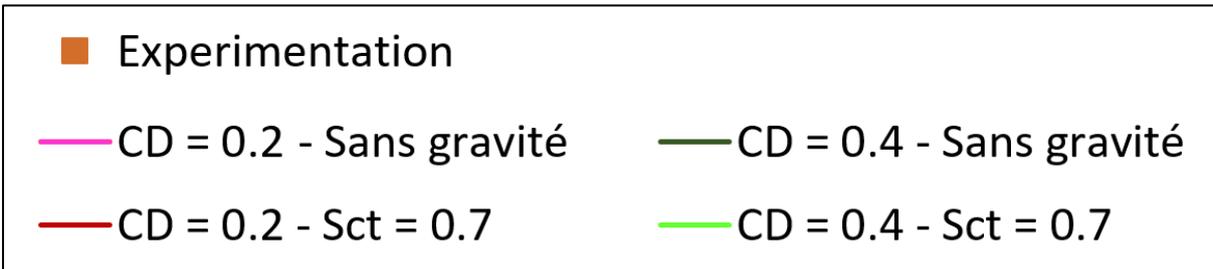
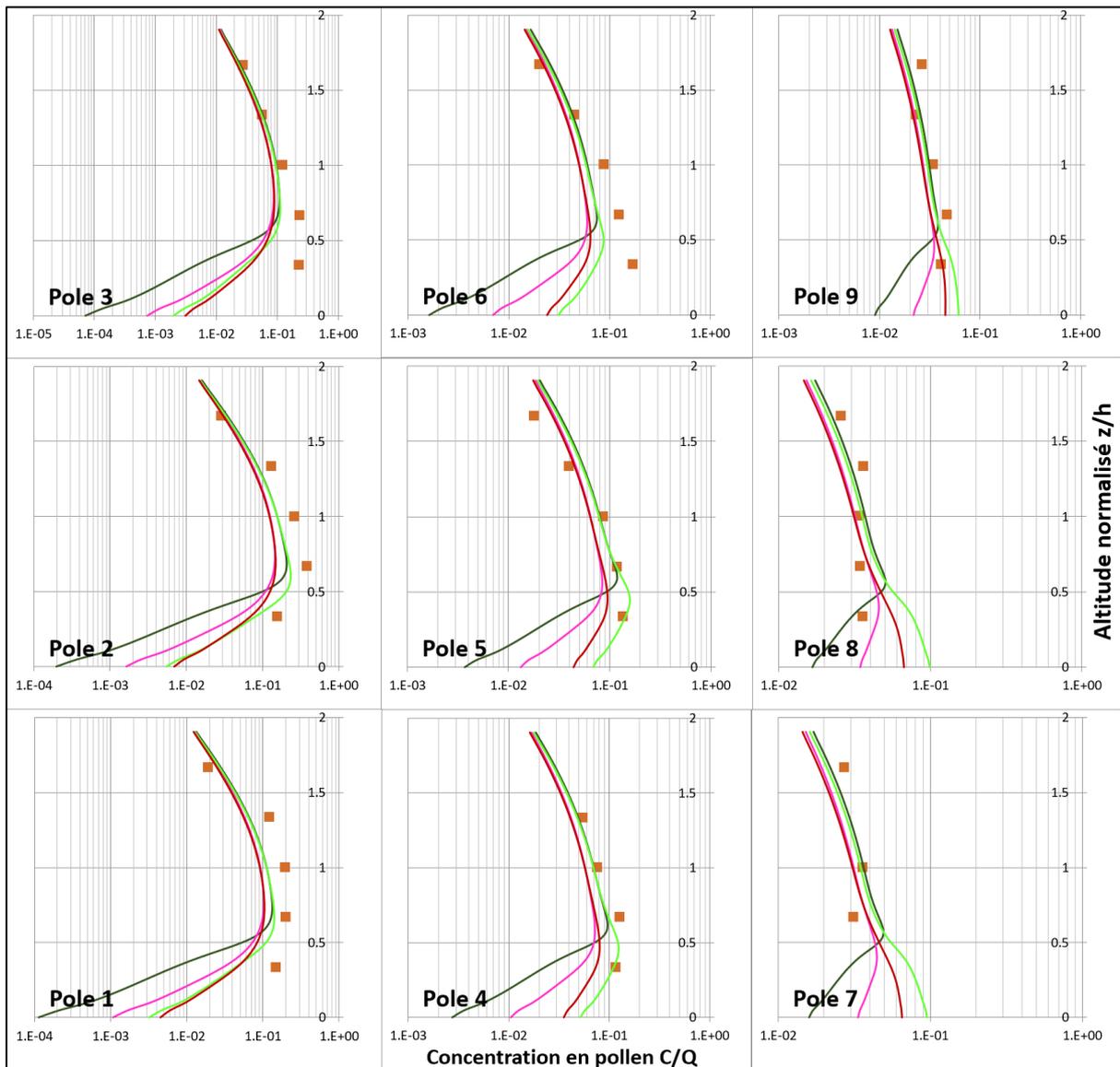
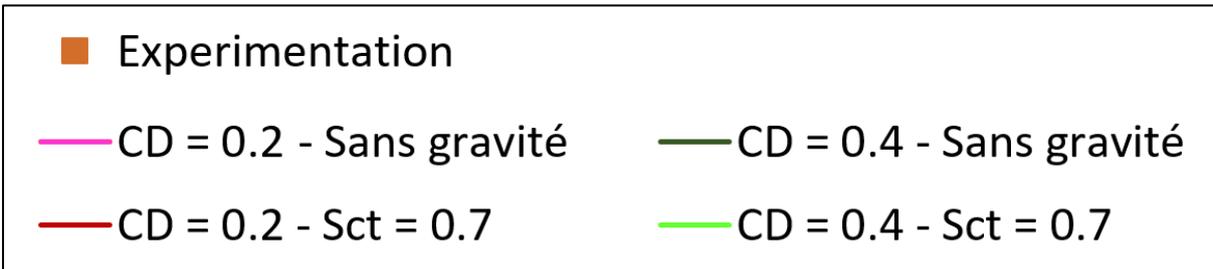


Figure C6 : Influence de la gravité sur les concentrations en pollens issus de la source 3 pour C_0 différent - Run 2



Légende :



Annexe D : Inventaire des espèces d'arbres de la place de la République

Figure D1 : Plan de la place de la République avec l'emplacement des différentes espèces d'arbres

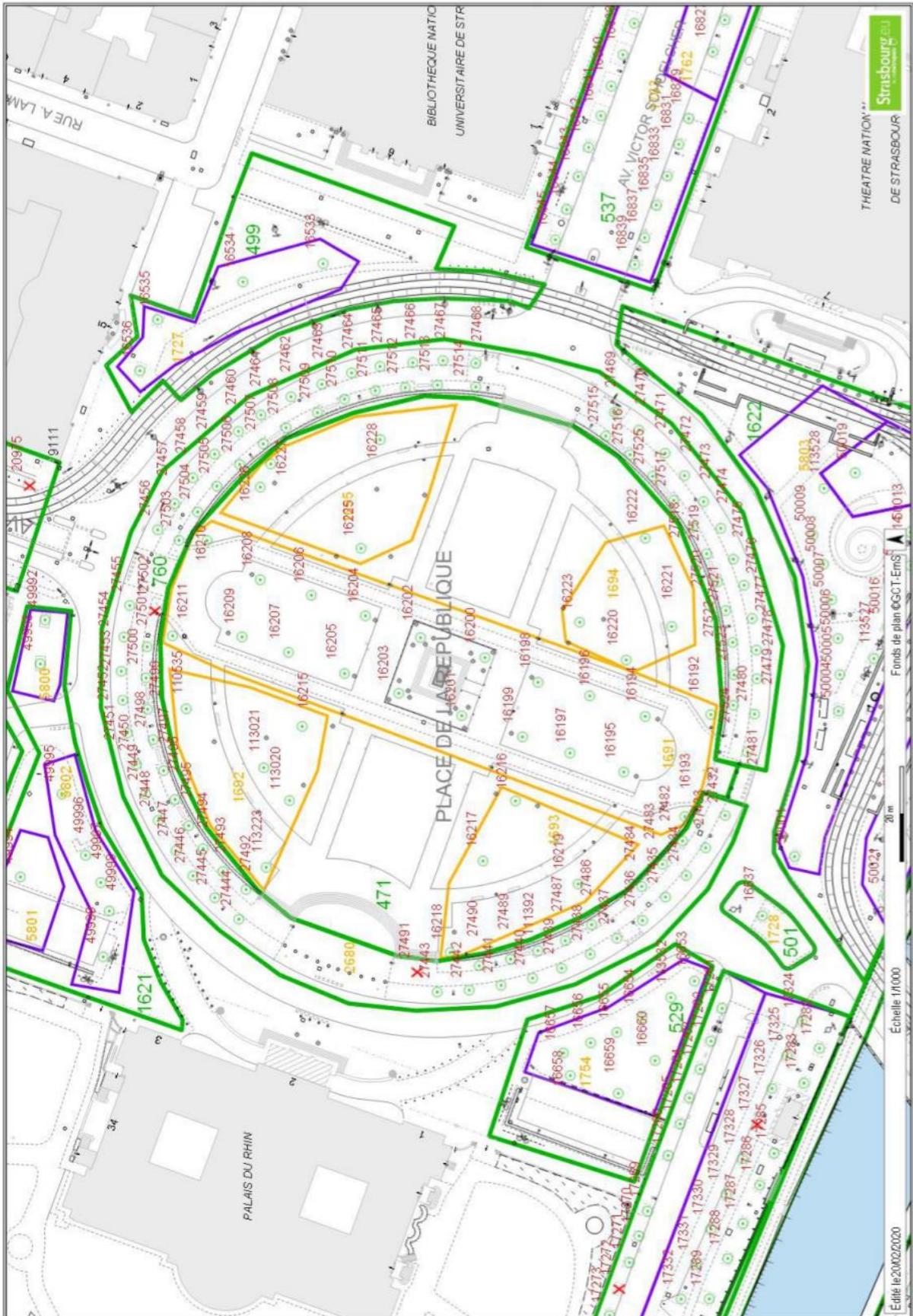


Tableau D2 : Inventaire détaillé des espèces d'arbres présentes dans la place de la République

INTERVENTIONS ARBRE PAR ARBRE				
N° point vert : 471 Libellé : Jardin - Place de la République Adresse : PCE DE LA REPUBLIQUE 67000 STRASBOURG				
Prestation libellé : PA000 PA-Entretien patrimoine arbres				
Code arbre	Libellé essence	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Port arbre
16192	Taxus baccata	60	7	Architecturé autre
16193	Taxus baccata	70	7	Architecturé autre
16194	Magnolia x soulangiana	52	7	Libre
16195	Magnolia x soulangiana	43	8	Libre
16196	Taxus baccata	54	6	Architecturé autre
16197	Taxus baccata	40	6	Architecturé autre
16198	Magnolia x soulangiana	2	2	Libre
16199	Magnolia x soulangiana	40	3	Libre
16200	Taxus baccata	36	4	Architecturé autre
16201	Taxus baccata	29	4	Architecturé autre
16202	Taxus baccata	50	4	Architecturé autre
16203	Taxus baccata	40	4	Architecturé autre
16204	Magnolia x soulangiana	38	7	Libre
16205	Magnolia x soulangiana	43	7	Libre
16206	Taxus baccata	50	7	Architecturé autre
16207	Taxus baccata	37	7	Architecturé autre
16208	Magnolia x soulangiana	39	7	Libre
16209	Magnolia x soulangiana	46	7	Libre
16210	Taxus baccata	52	6	Architecturé autre
16211	Taxus baccata	54	6	Architecturé autre
16215	Ginkgo biloba	180	29	Libre
16216	Ginkgo biloba	136	21	Libre
16217	Chamaecyparis lawsoniana	87	17	Libre
16218	Fagus sylvatica Purpurea	115	25	Libre
16219	Liriodendron tulipifera	21	7	Libre
16220	Taxus baccata Fastigiata	20	6	Libre
16221	Chamaecyparis lawsoniana	36	12	Libre
16222	Calocedrus decurrens	64	22	Libre
16223	Ginkgo biloba	210	33	Libre
16225	Ginkgo biloba	167	25	Libre
16226	Tilia europaea	85	26	Libre
16227	Catalpa bignonioides	78	21	Libre
16228	Liriodendron tulipifera	17	13	Libre
110535	Magnolia grandiflora	5	3	Libre
113020	Abies pinsapo	8	6	Libre
113021	Carya - laciniosa	8	6	Libre
113223	Quercus castaneifolia	8	6	Libre

Annexe E : Suivi des pollens pour une direction de vent de 200° et une intensité de 1,5 m/s

Figure E1 : Résultats aérauliques pour une direction de vent de 200° et une intensité de 1,5 m/s

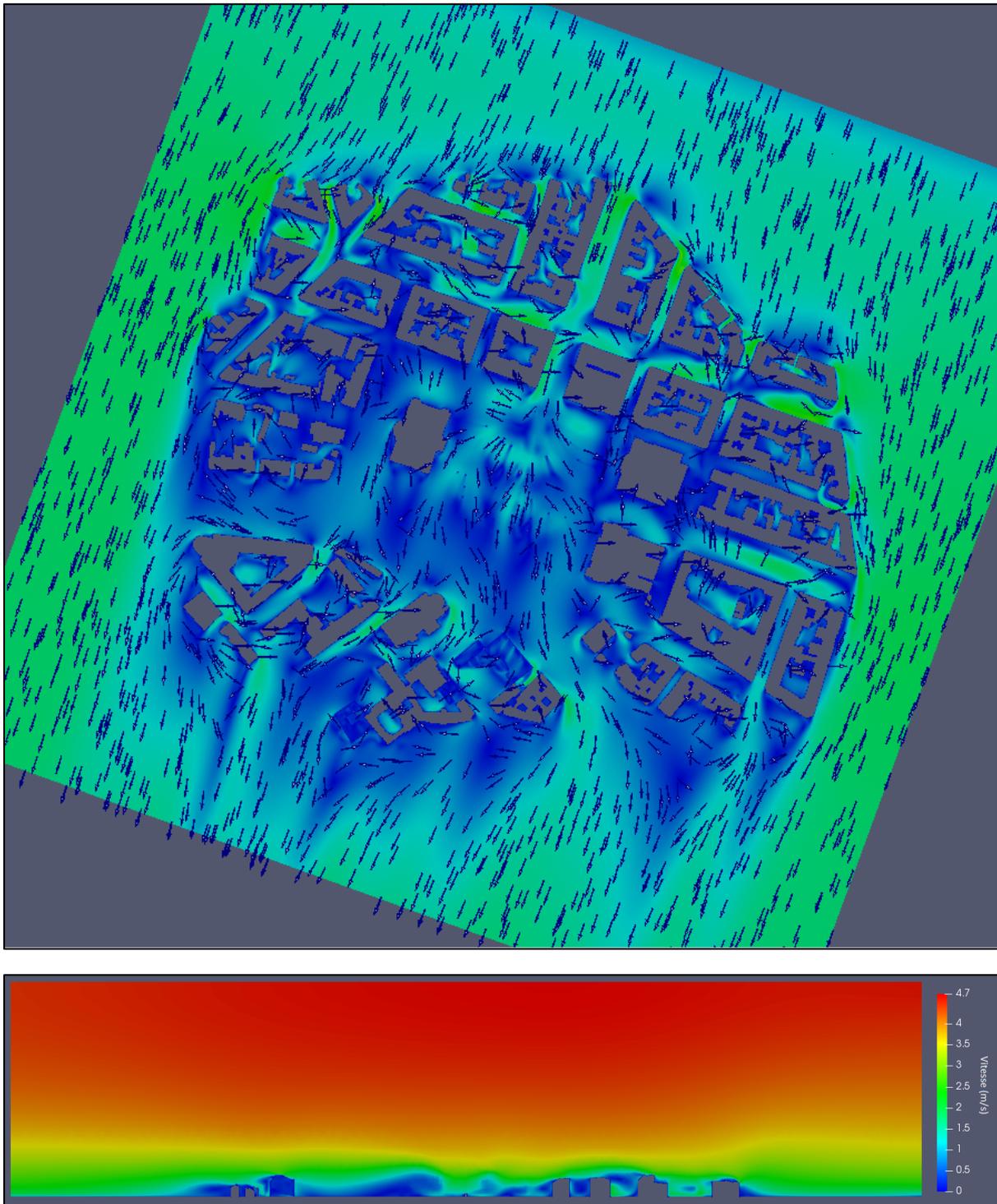
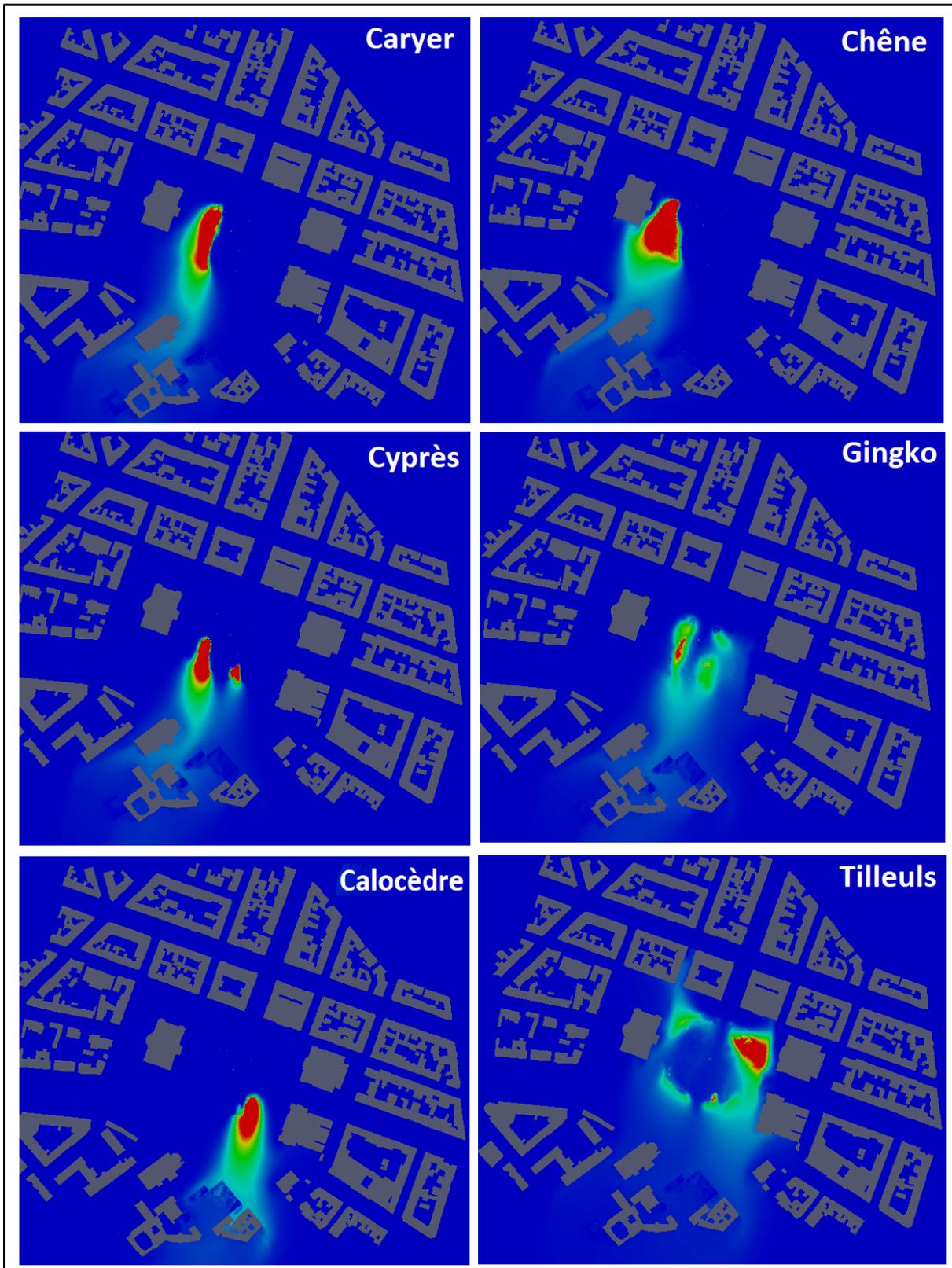


Figure E2 : Résultats de champs de concentration à 1.8 m pour une direction de vent de 200° et une intensité de 1.5 m/s



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Diplôme : Ingénieur ENGEES

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Auteur :

LEVY Raiarii

Année : 2020

Titre :

Modélisation de la dispersion du pollen en milieu urbain

Nombre de pages : Texte : 56 pages Annexes : 23 pages

Nombre de références bibliographiques : 34 références

Structure d'accueil :

AIR&D (32 Rue Wimpheling, 67000 Strasbourg, France)

Maître de stage :

Nicolas REIMINGER, Ingénieur de projets et doctorant

Résumé :

Ce mémoire traite de la modélisation 3D de la dispersion du pollen en milieu urbain et à une échelle locale. Le lecteur pourra :

- Prendre connaissance des enjeux et du contexte normatif et légal lié à la pollution atmosphérique à l'échelle urbaine et en particulier sur celui du pollen.
- Comprendre le fonctionnement du modèle numérique 3D utilisé par AIR&D pour les polluants atmosphériques avant de l'adapter au cas de la dispersion du pollen.
- Retrouver les détails qui ont permis l'obtention du modèle final ainsi que son application à différents cas tests aux États-Unis et sur la place de la République à Strasbourg afin de prouver sa fiabilité et son opérationnalité.

Mots-clés :

Dispersion du pollen, modélisation 3D, CFD, RANS, milieu urbain