

# Rapport de stage

Pour le diplôme d'ingénieur de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris

---

**Année 2024-2025**

## **Recherche sur la dispersion des polluants atmosphériques autour d'un immeuble de grande hauteur en milieu urbain**

**FARIA Quentin**

**Promotion 64**

**02/2025 - 08/2025**

Sous la direction de :

NGUYEN Dinh Duc

HERZOG Renaud, Tuteur EIVP

# Notice bibliographique

AUTEUR du mémoire			
NOM	FARIA		
Prénom	Quentin		
ORGANISME de stage			
NOM organisme	University of Civil Engineering, Ha Noi, Vietnam		
NOM, Prénom du maître de stage	NGUYEN Dinh Duc		
NOM, Prénom du tuteur EIVP	HERZOG Renaud		
ANALYSE			
TITRE du mémoire	Recherche sur la dispersion des polluants atmosphériques autour d'un immeuble de grande hauteur en milieu urbain		
TITLE	Research on the dispersion of air pollutants around a high-rise building in an urban environment		
RÉSUMÉ (15 à 20 lignes)	<p>Au cours de mon stage, j'ai étudié la qualité de l'air à Hanoï, qui est confrontée à une pollution atmosphérique croissante due à une urbanisation rapide, une industrialisation intense et un trafic motorisé dense, notamment de scooters et de véhicules. Cette problématique affecte la santé publique et la qualité de vie des habitants dans cette ville en pleine expansion. Mon travail s'est concentré sur l'impact de la Keangnam Landmark Tower, la plus haute structure de Hanoï, sur les écoulements d'air et la dispersion des polluants en milieu urbain dense. À l'aide de la méthode Lattice Boltzmann, j'ai développé une simulation numérique intégrant la géométrie urbaine pour modéliser les dynamiques turbulentes. Les résultats ont révélé des zones d'accumulation des polluants causées par des recirculations et des régions à faible vitesse, ainsi que des zones favorisant la dispersion grâce aux vents dominants. Cette étude, met donc en lumière le rôle des formes urbaines dans la gestion de la pollution atmosphérique.</p>		
ABSTRACT	<p>During my internship, I studied air quality in Hanoi, a city facing increasing air pollution due to rapid urbanization, intense industrialization, and heavy motorized traffic, particularly from scooters and vehicles. This issue affects public health and the quality of life of residents in this rapidly growing city. My work focused on the impact of the Keangnam Landmark Tower, the tallest structure in Hanoi, on airflow and pollutant dispersion in a densely built urban environment. Using the Lattice Boltzmann Method, I developed a numerical simulation that incorporates the urban geometry to model turbulent flow dynamics. The results revealed zones of pollutant accumulation caused by recirculations and low-velocity areas, as well as regions where dominant winds enhance dispersion. This study highlights the role of urban form in managing air pollution.</p>		
Mots-clés du <a href="#">thesaurus Archirès</a>	Pollution atmosphérique, Santé, Simulation, Étude d'impact, Recherche		
Keyword thesaurus (anglais, 8 maxi)	Air pollution, Health, Simulation, Impact study, Research		
Références			
	Nb de pages du mémoire	Annexes (nombre de p.)	Bibliogr. : nb de références
	33	7	15

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les professeurs et encadrants de l'EIVP qui m'ont permis de réaliser ce stage à Hanoï et de vivre cette expérience professionnelle enrichissante. Je souhaite remercier plus particulièrement Renaud Herzog, qui m'a accompagné tout au long de mon stage, a répondu à mes nombreuses questions et m'a guidé en me donnant des pistes de réflexion précieuses.

Je remercie également les professeurs de l'Université de Génie Civil de VNU, qui m'ont accueilli chaleureusement, m'ont inclus dans leur culture universitaire et ont pris le temps de répondre à mes interrogations. Une pensée particulière va à Viet Dung Viet Duong, qui a encadré ma recherche et est co-auteur de mon article scientifique : sans son soutien, je n'aurais pas pu mener à bien cette mission. Je remercie également mon maître de stage, Nguyen Dinh Duc, pour son aide précieuse et ses conseils tout au long du projet.

Enfin, je tiens à remercier mes proches pour leur soutien constant et leur aide dans la relecture et la correction de ce rapport.

# Sommaire

Remerciements .....	1
Liste des illustrations .....	4
Liste des tableaux .....	5
Liste des abréviations .....	6
Introduction .....	7
Contexte du stage .....	8
1. Vietnam National University.....	8
2. Les missions du stage .....	8
Etude.....	10
1. Contexte de recherche et enjeux du sujet .....	10
1.1. Contexte environnemental d'Hanoï .....	10
1.2. Choix de l'environnement de recherche .....	11
1.3. Etudes sur le sujet .....	12
2. Méthodologie de l'étude.....	13
2.1. La Dynamique des fluides .....	13
2.2. Équation de Lattice Boltzmann à temps de relaxation multiple .....	13
2.3. Condition aux limites de la simulation .....	15
3. Paramétrage numérique .....	16
3.1. Domaine computationnel .....	16
3.2. Conditions aux limites de la simulation.....	18
3.3. Distribution des blocks .....	19
3.4. Vérification de la simulation avec l'échelle de Kolmogorov .....	20
4. Résultats .....	23
4.1. Le champs de vitesse .....	23
4.2. Le champ de pression.....	27
5. Conclusion de l'étude.....	28
Remarques personnelles .....	29
6. Les difficultés rencontrées .....	29
7. Apports personnels .....	30
7.1. Apports professionnels.....	30
7.2. Apports Culturel.....	30
8. Perspectives d'évolutions .....	31
Conclusion.....	32
Références .....	33

## **Annexes**

<i>Annexe I : Référence de l'article scientifique .....</i>	<i>34</i>
<i>Annexe II : Equation de la méthodologie .....</i>	<i>38</i>
<i>Annexe III : Visualisation Paraview .....</i>	<i>39</i>

## Liste des illustrations

<b>Figure 1</b> : a) Plan architectural AutoCAD de la Keangnam Tower b) Extrait OpenStreetMap montrant les environs de la Keangnam Tower.....	12
<b>Figure 2</b> : Représentation des 27 directions du D3Q27.....	14
<b>Figure 3</b> Représentation du fonctionnement du maillage de la simulation (tiré du travail de mon professeur).....	16
<b>Figure 4</b> : a) Piece à découper b) l'outil de découpe c) pièce coupée .....	17
<b>Figure 5</b> : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan Y-Z à $X=22DX = 22DX=22D$ , d) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Z à $Y=0DY = 0DY=0D$ , e) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Y à $Z=10DZ = 10DZ=10D$ . .....	18
<b>Figure 6</b> : Visualisation dans ParaView des trois niveaux de raffinement .....	20
<b>Figure 7</b> : Exemple d'un tourbillon plus petit qu'une cellule a) Exemple d'un tourbillon contenu dans 4 cellules b).....	21
<b>Figure 8</b> : a) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe X, b) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe Y, c) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe Z.....	22
<b>Figure 9</b> : a) Paraview valeurs de $(\Delta x / \eta)$ sur le plan X2 ; b) Paraview valeurs de $(\Delta x / \eta)$ sur le plan Y4 ; c) Paraview valeurs de $(\Delta x / \eta)$ sur le plan Z3 ; d) Paraview valeurs de $(\Delta t / \tau)$ sur le plan X2 ; e) Paraview valeurs de $(\Delta t / \tau)$ sur le plan Y4 ; f) Paraview valeurs de $(\Delta t / \tau)$ sur le plan Z3.....	23
<b>Figure 10</b> : champs de vitesse du plan Y4 .....	24
<b>Figure 11</b> : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z1 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z3 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z5 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z1 e) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z3 f) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z5.....	25
<b>Figure 12</b> : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y4 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y5 c) Visualisation	

Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Y4 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Y5 ..... 26

**Figure 13 :** a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan X2 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan X4 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan X2 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan X4 ..... 26

**Figure 14 :** a) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan X3 b) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan X4 c) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Y2 d) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Y4 e) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Z1 f) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Z3 g) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Z5 ..... 27

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition entre étude et recherche dans le cadre de l'article ..... 9  
Tableau 2 : Tableau des tailles de grille indiquant les niveaux de grille utilisés et le nombre de cellules correspondant à chaque niveau ..... 19  
Tableau 3 : Vérification du rapport  $\Delta x/\eta < 5$  et  $\Delta t/\tau < 1$  pour chaque plan. .... 22

## Liste des abréviations

VNU – Vietnam National University

UET – University of Engineering and Technology

OMS – Organisation Mondial de la Santé

OCDE – Organisation de Coopération et de Développement Economiques

CFD – Computational Fluid Dynamics = Dynamique des Fluides Numérique.

BGK – Bhatnagar-Gross-Krook

MRT – Multiple Relaxation Time

IBB – Interpolated Bounce-Back

DNS – Direct Numerical Simulation

RANS – Reynolds-Averaged Navier-Stokes

# Introduction

Nous sommes aujourd'hui tous au courant des défis environnementaux actuels, parmi ces enjeux, la pollution de l'air se démarque par son caractère omniprésent et ses conséquences immédiates, tant sur la santé humaine que sur l'environnement.

En milieu urbain, la pollution de l'air est exacerbée par la densité des activités humaines. Les particules fines et autres polluants provoquent des maladies respiratoires et cardiovasculaires, tandis que la forme urbaine tend à piéger ces substances, aggravant ainsi leur impact.

Hanoï, capitale du Vietnam, illustre une situation alarmante en matière de qualité de l'air. L'urbanisation effrénée, l'explosion du trafic motorisé dominé par des millions de scooters et une industrialisation galopante entraînent des niveaux de PM2.5 et de polluants gazeux souvent plusieurs fois supérieurs aux seuils recommandés par l'OMS. Cette pollution endémique réduit l'espérance de vie des habitants et détériore la qualité de l'environnement urbain. Les immeubles de grande hauteur, comme la Keangnam Landmark Tower, jouent quant à eux un rôle clé dans la dispersion des polluants en perturbant les flux d'air qui les transportent.

Au cours de mon stage de fin d'études de six mois, j'ai eu l'opportunité d'intégrer la faculté de génie civil au sein de VNU, où j'ai conduit des recherches sur la dynamique des fluides pour étudier les écoulements d'air en milieu urbain. Cette expérience m'a permis de me former aux méthodes scientifiques dédiées à l'amélioration de la qualité de l'air, un enjeu crucial pour les métropoles modernes. Mon travail, centré sur la dispersion des polluants atmosphériques autour de la Keangnam Tower, m'a conduit à analyser l'impact des structures urbaines sur les flux d'air à l'aide de simulations numériques. Ces recherches ont abouti à la rédaction d'un article scientifique détaillant mes résultats et leurs implications pour la gestion de la pollution en milieu urbain.

La problématique de ce rapport, identique à celle de mon article scientifique, s'articule autour de la question suivante :

Comment la modélisation numérique des écoulements turbulents autour de la Keangnam Landmark Tower peut-elle contribuer à comprendre la dispersion des polluants atmosphériques et à proposer des solutions pour améliorer la qualité de l'air à Hanoï ?

Dans ce rapport, nous allons d'abord présenter le contexte du stage, avec une introduction à l'université d'accueil et aux missions qui m'ont été confiées à Hanoï. Nous aborderons ensuite l'étude scientifique menée, en présentant le contexte de recherche, la méthodologie de la simulation, les paramètres utilisés, puis les résultats obtenus et leur vérification, avant de conclure cette partie. Une section plus personnelle suivra, dans laquelle je décrirai les difficultés rencontrées, les apports professionnels et culturels de ce stage, ainsi que les perspectives d'évolution pour prolonger ce travail. Enfin, le rapport se terminera par une conclusion générale résumant les principaux enseignements et mon expérience personnelle.

# Contexte du stage

## 1. Vietnam National University

Mon stage de fin d'étude est particulier sur deux points. Tout d'abord, il s'est déroulé à Hanoï, au Vietnam, car je voulais vivre une expérience professionnelle à l'international. Ensuite, contrairement à la majorité des étudiants optant pour des stages en entreprise, j'ai intégré un cadre de recherche universitaire à la faculté de génie civil de VNU. Bien que la spécialité de la faculté soit un peu éloignée de mon sujet, qui est centré sur la dynamique des fluides, leurs outils de simulation numérique m'ont été d'une grande aide pour mener à bien les simulations nécessaires à mes recherches sur la dispersion des polluants atmosphériques autour de la Keangnam Tower.

Fondée en 1906 sous le nom d'Université d'Indochine, l'Université nationale du Vietnam (VNU) à Hanoï est l'une des institutions académiques les plus prestigieuses du pays. Après plusieurs réorganisations au cours de son histoire, elle a fusionné diverses institutions pour devenir un centre majeur d'enseignement et de recherche, couvrant des domaines comme l'ingénierie, l'économie, les langues et le juridique.

L'Université de technologie et d'ingénierie (UET) de la VNU s'investit activement dans la recherche appliquée, avec un focus sur l'innovation et le développement durable. Elle explore les matériaux avancés, notamment les composites intelligents et durables. La modélisation mécanique en se concentrant sur l'analyse des structures. L'intelligence artificielle appliquée à l'ingénierie, tout comme la robotique, pour développer des solutions technologiques novatrices. Enfin, les énergies renouvelables sont au cœur des recherches pour répondre aux défis environnementaux contemporains. L'ensemble de ses travaux sont disponibles sur le site de l'UET<sup>1</sup>.

Ces recherches sont menées sous la direction de professeurs expérimentés, dont le Professeur Nguyen Dinh Duc, chercheur influent au sein de l'UET et mon maître de stage. Il encadre de nombreux doctorants et participe activement aux publications scientifiques de l'université.

C'est au sein de la Faculté de génie civil que j'ai effectué l'entièreté de mon stage, un choix opéré par mon maître de stage principalement pour des raisons pratiques. Cette affectation m'a permis d'échanger avec la quasi-totalité des enseignants de la faculté, qui m'ont apporté leur aide sur différents aspects techniques de mon travail, mais aussi et surtout sur les questions d'adaptation culturelle et de la vie du campus, que j'aborderai plus loin.

## 2. Les missions du stage

La mission de mon stage de six mois a été décidée avec mon maître de stage, le professeur Nguyen Dinh Duc. Je lui ai demandé de travailler sur la simulation de la dynamique des fluides en milieu urbain, un sujet que j'avais déjà abordé dans mon stage précédent en études et recherche, et que je voulais approfondir. Nous avons exploré plusieurs idées et, d'un commun accord, nous avons choisi de me concentrer sur les écoulements turbulents créés par les immeubles de grande hauteur et leur impact sur la pollution urbaine. Les 6 mois de stage avaient

---

<sup>1</sup> Page internet du site de l'UET recensant tous les travaux de recherche de l'université <https://cte.uet.vnu.edu.vn/cac-cong-bo/>.

pour but d’aboutir à la rédaction d’un article scientifique intitulé « Modélisation numérique d’écoulements turbulents influençant la dispersion des polluants atmosphériques autour d’un immeuble de grande hauteur en milieu urbain », qui sera bientôt publié dans le *VNU Journal of Science*<sup>2</sup>.

Pour écrire cet article, mon travail s’est structuré autour de deux grandes dimensions : une partie d’étude, centrée sur la mise en place et l’exploitation d’une simulation numérique, et une partie de recherche, visant à appuyer scientifiquement les choix effectués.

Dans la partie étude, il a d’abord fallu définir un cadre précis, c’est ici que j’ai choisis d’étudier la Keangnam Tower. J’ai ensuite formulé des hypothèses physiques permettant de rendre le problème modélisable numériquement, tout en simplifiant certains aspects de la simulation afin de la rendre techniquement réalisable. Il a également été nécessaire de fixer les paramètres d’entrée de la simulation, de mener les calculs, puis d’en analyser les résultats pour comprendre l’influence des formes urbaines sur la répartition des polluants.

En parallèle, la partie recherche a consisté à mener un important travail de revue bibliographique. Il s’agissait de contextualiser et d’appuyer les choix méthodologiques, les hypothèses et les interprétations des résultats en s’appuyant sur les travaux existants dans la littérature scientifique. Cela m’a permis de m’inscrire dans une démarche de recherche rigoureuse, en confrontant mes analyses à celles déjà établies dans le domaine. Malheureusement le travail de recherche ne se retranscrit pas très bien dans un rapport de stage, cependant vous retrouverez à la fin du rapport, en plus de la bibliographie, une annexe présentant tous les références de mon article scientifiques.

<b>Étude</b>	<b>Recherche</b>
Choix du site d’étude (Tour et contexte urbain)	Identification d’un « <i>research gap</i> <sup>3</sup> »
Formulation des hypothèses de travail	Appui sur des travaux existants pour orienter la modélisation et la méthodologie
Définition des paramètres d’entrée	Mise en perspective des résultats avec ceux de la littérature
Simulation numérique (calcul)	Mise en évidence de l’apport original du travail
Analyse et interprétation des résultats (post-traitement)	—

Tableau 1 : Répartition entre étude et recherche dans le cadre de l’article

<sup>2</sup> Cite internet du *VNU Journal of Science* <https://js.vnu.edu.vn/>.

<sup>3</sup> Désigne une zone encore peu explorée, mal comprise dans la littérature scientifique existante, qui justifie donc la conduite de nouvelles recherches pour combler ce manque de connaissances

# Etude

Pour rappel, l'ensemble de mon stage a été centré sur la réalisation d'un article scientifique portant sur « la modélisation numérique d'écoulements turbulents influençant la dispersion des polluants atmosphériques autour d'un immeuble de grande hauteur en milieu urbain. » Dans ce cadre, j'ai mené à la fois un travail d'étude, visant à construire et exploiter une simulation numérique réaliste, et un travail de recherche, destiné à appuyer cette étude sur des bases scientifiques solides et à inscrire mes résultats dans la littérature existante.

La suite de ce rapport présentera donc de manière structurée les différentes étapes de ce double travail, en distinguant à chaque fois les volets techniques (étude) et scientifiques (recherche) réalisés dans le cadre de la production de l'article.

## 1. Contexte de recherche et enjeux du sujet

### 1.1. Contexte environnemental d'Hanoï

La pollution de l'air représente un enjeu majeur de santé publique, responsable de plus de 7 millions de décès chaque année selon l'OMS<sup>4</sup> et les zones urbaines sont particulièrement vulnérables du fait de leur forte densité de population et des émissions associées. À Hanoï, la croissance urbaine rapide et la prépondérance des deux-roues motorisés renforcent les niveaux de polluants, tandis que la hauteur et la configuration mixte des immeubles créent des schémas complexes de circulation d'air. La qualité de l'air y est gravement dégradée : les concentrations de PM<sub>2.5</sub> dépassent régulièrement 50 µg/m<sup>3</sup> (contre 10 µg/m<sup>3</sup> recommandés par l'OMS) et peuvent atteindre plus de 150 µg/m<sup>3</sup> en hiver, lors des inversions thermiques. Par ailleurs, le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) émis par les quelque 5 millions de motos, qui constituent 80 % du parc automobile, accentue encore la pollution, dans un contexte de transports publics limités depuis les réformes de Đôì Mói des années 1990. Les PM<sub>2.5</sub> sont associées à une hausse de 20 % des hospitalisations pédiatriques pour asthme lors des épisodes de pollution intense. Sur le plan économique, l'OCDE<sup>5</sup> souligne que la pollution engendre des coûts sanitaires élevés, pèse sur la productivité et pénalise le tourisme.

Au-delà des conséquences humaines, la pollution atmosphérique a également un impact préoccupant sur la biodiversité locale. Les zones humides, les arbres urbains et les espèces animales des environs de Hanoï subissent les effets combinés des dépôts polluants, de l'acidification des sols et de la dégradation de la qualité de l'air. Face à ces défis, les autorités vietnamiennes ont notamment planifié la suppression progressive des motos à essence d'ici 2030, ce qui souligne la nécessité d'une compréhension fine de la dynamique de dispersion des polluants en milieu urbain.

Si la pollution de l'air en ville est un sujet bien connu, on parle rarement de la façon dont elle se déplace. On sait qu'il y a de la pollution, mais on ne sait pas vraiment où elle va, comment elle se disperse, ou s'il y a des endroits plus touchés que d'autres. Ces questions viennent

---

<sup>4</sup> Tiré de "WHO global air quality guidelines"

<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>

<sup>5</sup> Tiré de "The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution"

[https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/06/the-economic-consequences-of-outdoor-air-pollution\\_g1g68583/9789264257474-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/06/the-economic-consequences-of-outdoor-air-pollution_g1g68583/9789264257474-en.pdf)

d'abord de mes propres réflexions, puis d'une petite enquête que j'ai menée auprès de passants près de la Keangnam Tower. En discutant avec eux, j'ai compris que même si beaucoup savent que l'air est pollué, personne ne sait vraiment comment cette pollution se comporte dans l'environnement urbain.

Plusieurs questions sont revenues :

- Est-ce que la pollution est répartie de manière égale partout ?
- Est-ce qu'il existe des zones où elle se concentre, comme des poches de pollution ?
- Est-ce que c'est plus pollué au niveau des piétons ou plus en hauteur ?
- Quel est le rôle du vent ?

C'est pour toutes ces raisons que le sujet m'a semblé vraiment intéressant. Mieux comprendre la dispersion des polluants autour des immeubles peut aider à améliorer la qualité de l'air et à mieux penser la ville de demain.

## **1.2.Choix de l'environnement de recherche**

Hanoï est une ville assez typique dans sa manière de s'étendre en hauteur. On y trouve majoritairement des immeubles de 4 ou 5 étages, avec quelques quartiers plus récents où des bâtiments plus imposants commencent à apparaître. Pour mener cette étude, il fallait d'abord choisir un bâtiment qui réponde à deux critères importants.

Le premier, c'est qu'il soit relativement isolé de son environnement proche. Cela permet de limiter les interférences avec d'autres immeubles lors de la simulation, et d'avoir des résultats plus clairs sur l'effet direct du bâtiment étudié.

Le deuxième critère, c'est que le bâtiment soit de grande hauteur. Plus un immeuble est imposant, plus son influence sur les écoulements d'air et la dispersion des polluants est significative, ce qui est essentiel pour bien observer le phénomène.

La Keangnam Landmark Tower répond parfaitement à ces deux exigences. C'est un bâtiment relativement isolé dans son quartier, et c'est aussi la plus haute tour de Hanoï. Ces caractéristiques en font un cas idéal pour cette recherche.

La tour est située sur la route Phạm Hùng, dans le quartier de Nam Từ Liêm, à environ 7 km à l'ouest du centre de Hanoï. Ce bâtiment est le plus haut de la ville, avec 350 mètres de hauteur, ce qui en fait un point de repère important dans ce quartier d'affaires en pleine expansion.

La tour principale est une structure rectangulaire de 72 étages, construite en béton armé et entourée de deux tours résidentielles de 48 étages, disposées de manière symétrique. Même si les trois bâtiments sont proches, l'ensemble reste suffisamment ouvert pour permettre une étude claire de l'impact de la tour sur les flux d'air. Le Plan architectural AutoCAD (Figure 1 : a) Plan architectural AutoCAD de la Keangnam Tower b) Extrait OpenStreetMap montrant les environs de la Keangnam Tower (a)) présente plus précisément la tour

Le complexe accueille des logements, des bureaux, un hôtel et un centre commercial, mais les émissions polluantes autour du site sont dues en grande majorité à la circulation routière. Les routes voisines, comme Phạm Hùng ou Đường Mê Trì (voir Figure 1 : a) Plan architectural AutoCAD de la Keangnam Tower b) Extrait OpenStreetMap montrant les environs de la Keangnam Tower (b)), sont très fréquentées, avec jusqu'à 15 000 motos et 2 000 voitures par heure. Ce trafic intense, souvent ralenti par des embouteillages, génère une quantité importante

de particules fines (PM2.5 et PM10), issues de la combustion du carburant, de l'usure des pneus et des freins.

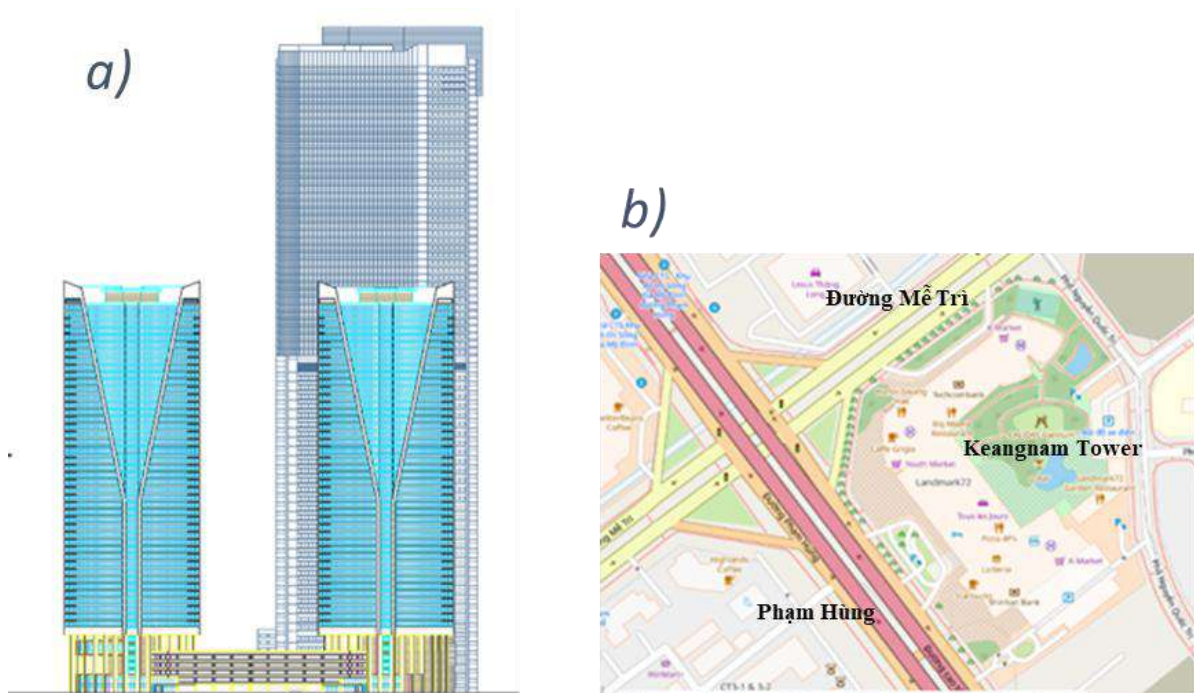


Figure 1 : a) Plan architectural AutoCAD de la Keangnam Tower b) Extrait OpenStreetMap montrant les environs de la Keangnam Tower

### 1.3. Etudes sur le sujet

Pour affiner notre sujet de recherche, il faut d'abord se pencher sur les travaux déjà réalisés dans ce domaine. De nombreuses études ont montré que la forme des bâtiments et l'organisation des rues ont un impact direct sur la manière dont les polluants se déplacent et se dispersent en ville. Par exemple, (Hang, 2012) explique que les canyons urbains peuvent créer des zones de recirculation où les polluants restent piégés, ce qui augmente les risques pour la santé. (Blocken, 2015) utilise la simulation numérique pour montrer que la géométrie urbaine joue un rôle central dans la ventilation et la dispersion. (Tominaga & Stathopoulos, 2013) quant à eux modélisent les écoulements dans des environnements urbains denses en simplifiant la forme des bâtiments pour mieux comprendre les dynamiques d'air. De plus (Lateb et al., 2016) mettent en évidence, la formation de poches de pollution autour des bâtiments et (Mei et al., 2019) s'intéressent aux structures turbulentes et au piégeage des particules dans les sillages urbains

Tous ces travaux nous servent de base. Ils nous apportent une méthode, des hypothèses, et des résultats avec lesquels nous pourrions comparer les nôtres. Par exemple, comme (Blocken, 2015), nous allons utiliser une simulation numérique, et comme (Tominaga & Stathopoulos, 2013), nous allons simplifier la géométrie des bâtiments. De plus, les études de (Lateb et al., 2016) et (Mei et al., 2019) nous donnent une première idée des résultats que l'on peut attendre. Cela permet à la fois de construire une base scientifique solide, et de situer notre recherche dans la continuité des études déjà menées sur le sujet.

La subtilité de notre étude est que nous choisissons d'étudier un immeuble de grande hauteur dans un environnement urbain dense, avec une forte activité humaine. Des milliers de personnes vivent, travaillent ou circulent chaque jour autour de la Keangnam Tower.

C'est à partir de tout ce travail de recherche, à la fois sur les études scientifiques existantes et sur l'environnement spécifique autour de la tour, que nous avons construit notre problématique :

Comment la modélisation numérique des écoulements turbulents autour de la Keangnam Landmark Tower peut-elle contribuer à comprendre la dispersion des polluants atmosphériques et à proposer des solutions pour améliorer la qualité de l'air à Hanoï ?

## **2. Méthodologie de l'étude**

### **2.1. La Dynamique des fluides**

Avant de présenter la méthodologie utilisée, il est utile de rappeler brièvement le principe de base de la dynamique des fluides. Quand l'air circule librement dans un environnement ouvert, il suit normalement un mouvement régulier et ordonné, appelé écoulement laminaire. Mais dès qu'il rencontre un obstacle important, comme une tour par exemple, ce flux est perturbé. Il devient turbulent, La vitesse et la pression du fluide ne sont plus uniformes, formant alors des tourbillons, des zones de recirculations des

Pour analyser ce type de phénomène, on utilise les équations de Navier-Stokes, qui permettent de décrire le mouvement de l'air en fonction de sa vitesse, de sa pression et de sa viscosité. Cependant, dans un environnement urbain aussi complexe que celui de Hanoï, ces équations sont trop difficiles à résoudre directement. C'est pourquoi on utilise la CFD. Cette méthode permet de diviser numériquement l'espace autour du bâtiment en petits volumes, puis de simuler le comportement de l'air dans chacun de ces éléments. On peut ainsi observer plus précisément comment se forment les turbulences et comment les polluants se déplacent ou s'accumulent.

Dans ce rapport, nous n'entrerons pas dans le détail des équations de Navier-Stokes, mais il est important de savoir que toute notre méthodologie repose sur ces bases mathématiques.

### **2.2. Équation de Lattice Boltzmann à temps de relaxation multiple**

La partie méthodologie de l'article scientifique est entièrement issue du travail de mon professeur, Monsieur Dung Viet Duong, qui est également co-auteur de l'article. La raison est simple : la méthode utilisée repose sur des concepts mathématiques bien trop complexes pour que je puisse les maîtriser ou les expliquer en détail. Dans le cadre de ce rapport, je vais donc tenter de la résumer de la façon la plus simple possible, pour en donner une compréhension générale. La version complète et détaillée de la méthodologie est disponible en annexe.

Pour modéliser les écoulements d'air autour de la tour, nous avons utilisé une méthode appelée méthode Lattice Boltzmann. C'est une technique numérique qui fait partie des outils de la CFD, et qui permet de simuler des écoulements complexes, comme ceux que l'on trouve en milieu urbain.

Contrairement aux méthodes classiques, cette approche ne travaille pas directement sur les équations générales de l'écoulement (les équations de Navier-Stokes), mais sur des modèles simplifiés qui permettent d'obtenir les mêmes résultats de manière plus adaptée aux structures géométriques complexes.

En pratique, cette méthode représente le fluide comme un ensemble de particules évoluant sur un maillage, avec des règles de mouvement et de collision. Grâce à cela, on peut simuler la manière dont l'air se déplace, tourbillonne ou ralentit en fonction des obstacles. L'équation mathématique qui régit cette méthode est le modèle de collision (BGK) dont les termes seront détaillés en annexe est :

$$\Gamma_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = \Gamma_i(x, t) - \omega \left( \Gamma_i(x, t) - \Gamma_i^{eq}(x, t) \right) \quad (2.1)$$

Concrètement, chaque point du maillage stocke une fonction de distribution pour un ensemble discret de vitesses ici 27 directions en 3D (D3Q27), puis applique à chaque pas de temps deux opérations successives qui sont La collision et Le streaming.

Les 27 directions sont représentées :

- Les 6 directions principales (haut, bas, gauche, droite, avant, arrière) (en rouge)
- Les 12 directions diagonales sur les plans (en bleu)
- Les 8 diagonales en 3D (comme en diagonale dans un cube) (en noir)

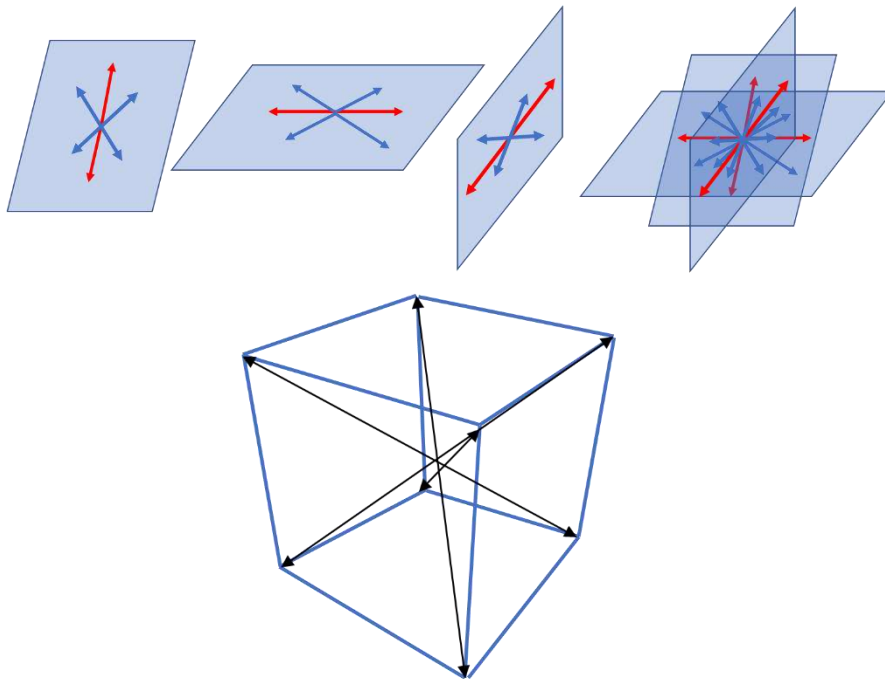


Figure 2 : Représentation des 27 directions du D3Q27

La collision : Les petits paquets présents à un point donné vont interagir entre eux. Ils échangent une partie de leur énergie ou de leur direction, de façon à se rapprocher d'un état d'équilibre. C'est cette étape qui permet de simuler des effets comme la pression, la température ou la turbulence.

Le streaming : représente la circulation du fluide dans la simulation. Après une collision, chaque paquet se déplace vers une cellule voisine en fonction de sa direction. Ce processus assure la propagation du fluide dans l'ensemble du domaine de calcul et permet de reproduire les mouvements d'air.

Le modèle BGK présente Cependant une limitation importante : lorsque la viscosité cinématique du fluide est faible, notamment lors de simulations à maillage fin pour augmenter la précision, la stabilité numérique se dégrade fortement. Conduisant à des divergences de calcul. Pour pallier cette instabilité, il est possible d'utiliser une formulation à temps de relaxation multiple (MRT). Sur le plan numérique, la méthode MRT consiste à transformer le modèle de collision (BGK) à l'aide de différentes matrices :

- Une matrice de transformation (M) pour transformer l'espace des vitesses discrètes en un espace des moments
- Une matrice de relaxation (S) pour calculées collisions dans ce nouvel espace
- Une matrice de transformation inverse à M pour reconvertir l'espace des moments espace des vitesses discrètes.

L'équation 2.1 est alors remplacé par :

$$F_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = F_i(x, t) - M^{-1} S [m_i(x, t) - m_i^{eq}(x, t)] \Delta t, \quad (2.2)$$

Les quantités d'écoulement macroscopiques (masse volumique, vitesse d'écoulement et pression moyenne) peuvent être obtenues à partir des moments de la fonction de distribution des particules donnant :

$$\rho(x, t) = \sum_i F_i(x, t), \quad \rho u(x, t) = \sum_i e_i F_i(x, t), \quad p(x, t) = \rho(x, t) c_s^2 \quad (2.3)$$

### 2.3. Condition aux limites de la simulation

Pour représenter les bâtiments et autres obstacles dans le domaine de simulation, on utilise un modèle 3D défini par un maillage de facettes triangulaires (Figure 3 Représentation du fonctionnement du maillage de la simulation (tiré du travail de mon professeur) a)<sup>6</sup>. Chaque triangle est décrit par ses sommets et son vecteur normal, ce qui permet de définir précisément la surface des objets.

Sur le maillage cartésien servant aux calculs, on distingue trois types de cellules : les cellules fluides (air libre), les cellules solides (occupées par un bâtiment) et les cellules limites (en contact direct entre fluide et solide) (Figure 3 Représentation du fonctionnement du maillage de la simulation (tiré du travail de mon professeur) c) . Au départ, toutes les cellules sont considérées comme fluides. Un algorithme détecte ensuite quelles cellules se trouvent à l'intérieur d'un

---

<sup>6</sup> Le figure 3 est tiré du travail de mon professeur : Direct numerical simulation of 45° oblique flow past surface-mounted square cylinder (DungViet Duong)

objet solide en vérifiant les intersections entre les rayons du maillage et les triangles de la géométrie. Les cellules en bordure des solides sont alors identifiées comme cellules limites.

Cette étape est essentielle pour appliquer correctement les conditions aux limites et simuler avec précision les interactions entre le vent et les surfaces des bâtiments.

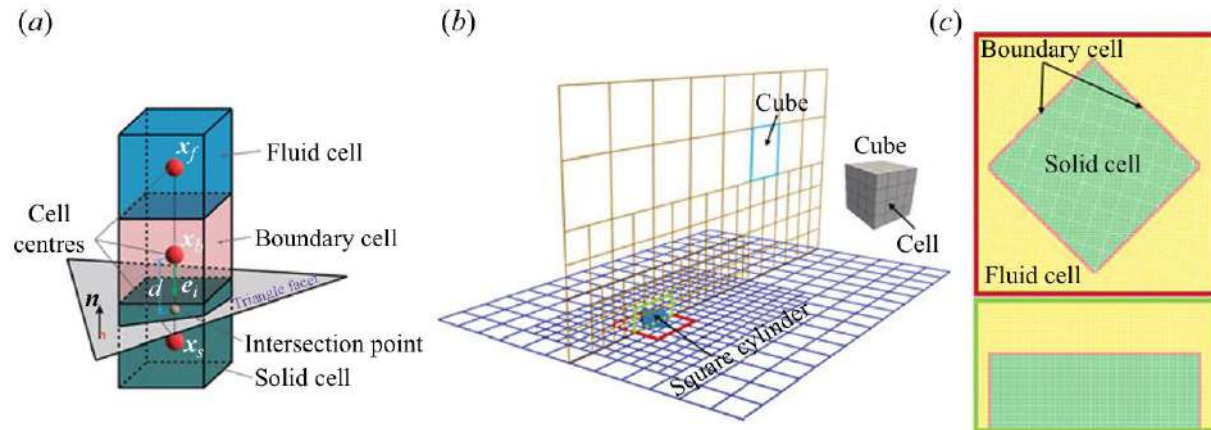


Figure 3 Représentation du fonctionnement du maillage de la simulation (tiré du travail de mon professeur)

Avec ce type de simulation, un problème se pose sur lors de la réflexion du fluide sur les parois courbes, on utilise la méthode (IBB) pour le régler. L'IBB permet de calculer avec plus de précision la réflexion du fluide sur les parois, même lorsque celles-ci ne coïncident pas parfaitement avec le maillage.

Le principe est de repérer le point exact où une particule virtuelle entre en contact avec la surface du bâtiment, puis de calculer la façon dont elle rebondit en fonction de sa position par rapport à cette paroi. Cette réflexion est obtenue par interpolation des données déjà connues dans la simulation c'est-à-dire direction vitesse, viscosité.

En appliquant cela à toute la surface de la tour on peut estimer l'impact du vent sur la tour, en calculant les forces exercées par le fluide sur bâtiment à partir des échanges de quantité de mouvement (2.3).

La (Figure 3 Représentation du fonctionnement du maillage de la simulation (tiré du travail de mon professeur) b) une grille composée de blocs cubiques, avec des tailles de maillage différentes selon la zone étudiée. Près des bâtiments, où l'écoulement est complexe, les blocs sont très fins pour mieux capturer les détails. Plus on s'éloigne, plus les blocs sont grossiers afin de réduire le temps de calcul.

Chaque bloc contient toutes les informations nécessaires pour la simulation (taille des cellules, coordonnées, voisins, etc.) et peut être traité séparément, ce qui permet d'utiliser le calcul parallèle. Cette organisation permet de concentrer la puissance de calcul là où c'est nécessaire, tout en optimisant les performances globales de la simulation. Nous parlerons de la distribution des blocs plus en précision dans une partie dédié.

### 3. Paramétrage numérique

#### 3.1. Domaine computationnel

Pour la simulation, un modèle numérique de la tour Keangnam Hanoi Landmark et de ses deux tours adjacentes a été construit. La tour principale a une base rectangulaire de 93 m × 57 m et une hauteur de 350 m. Les deux tours adjacentes, hautes de 212 m, ont une base triangulaire de 53 m de côté et présentent des façades incurvées.

Afin de simplifier la simulation et limiter la complexité du maillage, les bâtiments ont été représentés comme des structures rigides aux surfaces lisses, sans détails tels que balcons, décorations ou immeubles bas environnants. Le modèle a été réalisé avec le logiciel SALOME (Figure 5 : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan Y-Z à  $X=22DX = 22DX=22D$ , d) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Z à  $Y=0DY = 0DY=0D$ , e) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Y à  $Z=10DZ = 10DZ=10D$ .

), à partir de plans AutoCAD, pour garantir des dimensions et un positionnement fidèle à la réalité.

SALOME est un logiciel de CAO gratuit il utilise un principe qui ressemble beaucoup à un travail de sculpteur. On part d'un gros bloc, puis on dessine des pièces pour couper notre bloc. Voir (Figure 4)

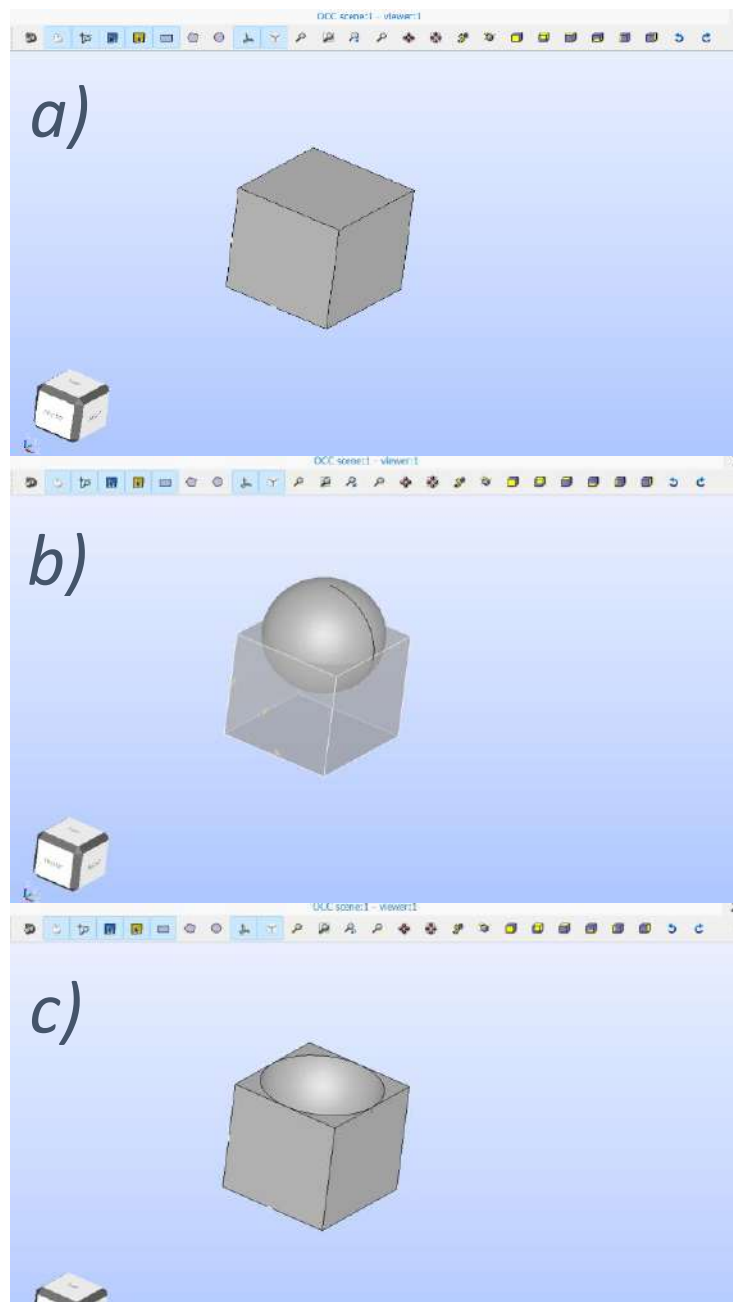


Figure 4 : a) Pièce à découper b) l'outil de découpe c) pièce coupée

Le domaine de calcul (Figure 5 : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan Y-Z à  $X=22DX = 22DX=22D$ , d) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Z à  $Y=0DY = 0DY=0D$ , e) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Y à  $Z=10DZ = 10DZ=10D$ .

a) a été créer en utilisant la largeur de la tour ( $D = 93$  m) (Figure 5 : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs

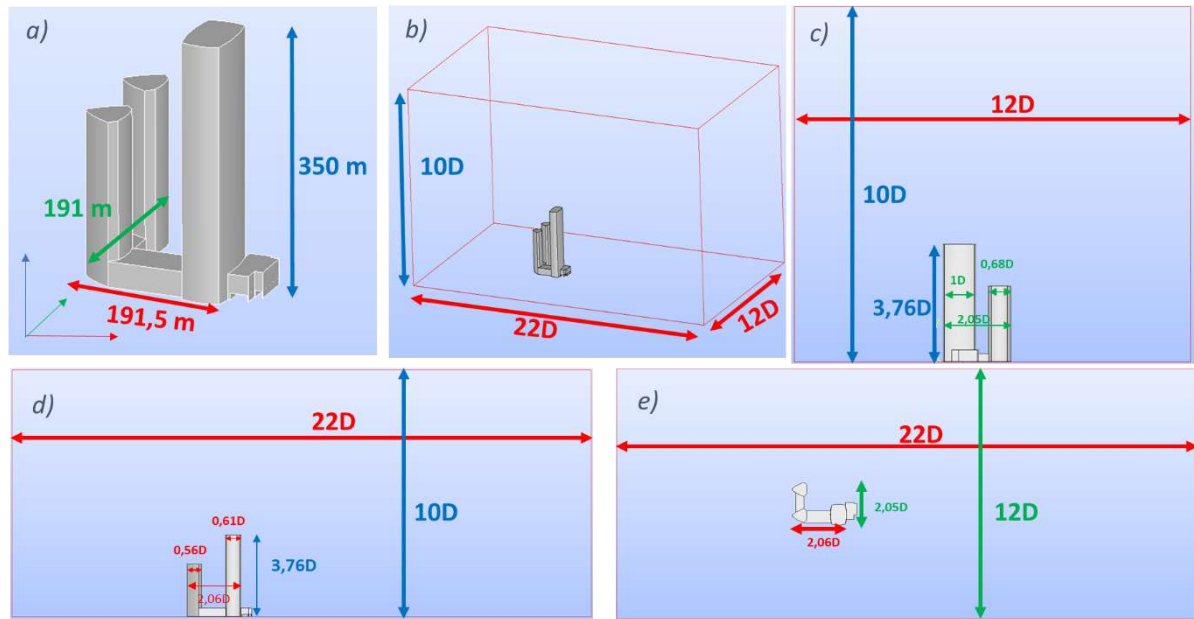


Figure 5 : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan Y-Z à  $X=22DX = 22DX=22D$ , d) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Z à  $Y=0DY = 0DY=0D$ , e) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Y à  $Z=10DZ = 10DZ=10D$ .

c) comme référence pour normaliser les dimensions. Ainsi, le domaine s'étend sur  $22D$  dans la direction de l'écoulement (X),  $12D$  dans la direction transversale (Y) et  $10D$  en hauteur (Z) selon la recommandation de plusieurs recherches antérieur tel que (AIJ, 2017) et (Cao et al., 2022). De plus vous retrouverez toutes les longueurs caractéristique de la Tour sur les différents plan de coupe (Figure 5 : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan Y-Z à  $X=22DX = 22DX=22D$ , d) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Z à  $Y=0DY = 0DY=0D$ , e) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Y à  $Z=10DZ = 10DZ=10D$ .

c ; Figure 5 : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan Y-Z à  $X=22DX = 22DX=22D$ , d) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Z à  $Y=0DY = 0DY=0D$ , e) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Y à  $Z=10DZ = 10DZ=10D$ .

d ; Figure 5 : a) Modèle 3D de la Keangnam Tower sur SALOME et longueurs caractéristiques, b) représentation 3D du domaine de calcul, c) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan Y-Z à  $X=22DX = 22DX=22D$ , d) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Z à  $Y=0DY = 0DY=0D$ , e) longueurs caractéristiques de la tour sur le plan X-Y à  $Z=10DZ = 10DZ=10D$ .

e).

### 3.2. Conditions aux limites de la simulation

Les conditions aux limites de la simulation sont définies comme suit :

- En entrée du domaine la vitesse est uniforme et en écoulement libre, calculée à partir du nombre de Reynolds  $Re = 6000000$ . De plus avec les propriétés de l'air à température ambiante ( $\rho = 1.225, \text{kg/m}^3$ ) et ( $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ). La vitesse obtenue est  $U = 0.9677 \text{ m/s}$ , représentant un vent léger, limitant la dispersion des polluants et simulant un scénario défavorable où ceux-ci stagnent.
- La direction du vent est perpendiculaire à la face la plus large ( $L = 93 \text{ m}$ ) de la tour principale pour maximiser la turbulence et la formation de tourbillons.
- Une condition de « free-slip<sup>7</sup> » présenté par (Succi, 2001) pour réduire les effets artificiels de frottement.
- Une condition de non-glissement appliquée avec la méthode « half-way bounce-back<sup>8</sup> » présenté par (Ladd, 1994).

### 3.3. Distribution des blocks

Pour optimiser la précision tout en limitant le temps de calcul, le maillage est raffiné uniquement dans les zones d'intérêt. Comme illustré sur la Figure 6 : Visualisation dans ParaView des trois niveaux de raffinement

, trois niveaux de raffinement sont utilisés : le niveau 0, avec une taille de cellule  $\Delta$ , correspond à la résolution la plus fine et est utilisé pour capturer les structures turbulentes et les zones de recirculation situées sur les faces et le sommet de la tour ; le niveau 1, avec une taille de cellule  $2\Delta$  ; et le niveau 2, avec une taille de cellule  $4\Delta$ . La génération du maillage se fait en trois étapes :

- D'abord la définition du niveau de raffinement nécessaire pour chaque zone de la simulation,
- Puis la détermination des dimensions des blocs de maillage pour chaque niveau, et l'application d'une taille de cellule uniforme à l'intérieur de chaque
- Enfin comme dans l'étude de (White, 2006) la taille minimale de cellule est calculée à partir de l'épaisseur estimée de la couche limite autour de la tour ( $\delta_B$ ) avec  $\delta_B = (5.5 \cdot 0.5w) / \sqrt{Re_{0.5w}}$ , ce qui permet de bien représenter les effets de turbulence sans avoir à raffiner l'ensemble du domaine.

Level	Lv. 0	Lv.1	LV.2	Total
D	20.0	40.0	80.0	

<sup>7</sup> Condition où le fluide peut glisser librement le long d'une surface sans frottement, tout en restant perpendiculaire à celle-ci, c'est-à-dire que l'air ne peut pas être ralenti par les bords du domaine.

<sup>8</sup> Condition où les particules de fluide rebondissent sur une surface virtuelle placée à mi-distance entre deux points, ici les parois de la tour sont ces surfaces virtuelles

Le total de présenté Tableau 2.

K. viscosity	0.00400	0.00800	0.01600	
Block	168	892	3232	4292
Cell	10752000	57088000	206848000	274688000

nombre cellule est dans le

Tableau 2 : Tableau des tailles de grille indiquant les niveaux de grille utilisés et le nombre de cellules correspondant à chaque niveau

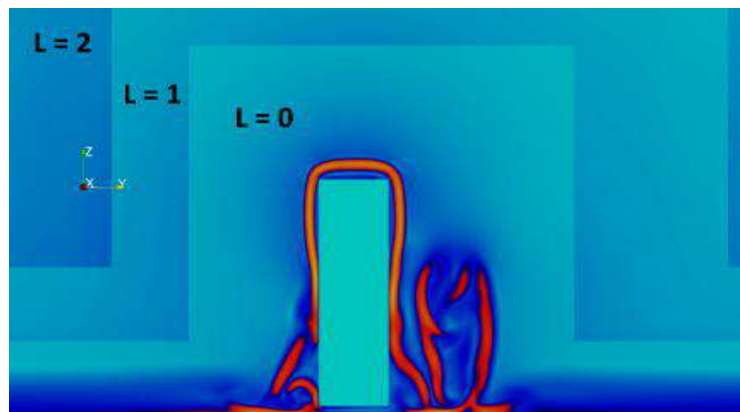


Figure 6 : Visualisation dans ParaView des trois niveaux de raffinement

### 3.4. Vérification de la simulation avec l'échelle de Kolmogorov

La première étape de validation de la simulation consiste à vérifier que notre maillage spatial que l'on appellera ( $\Delta x$ ) et notre pas de temps que l'on appellera ( $\Delta t$ ) sont suffisamment fins pour représenter correctement les plus petites structures turbulentes du flux.

En effet, lorsque le flux d'air laminaire rencontre un obstacle (ici, la tour), il devient turbulent en aval. Cette turbulence génère diverses structures caractéristiques, telles que des vortex, ainsi que des courants ascendants et descendants.

Ces structures turbulentes présentent des tailles très variées. Lorsqu'elles sont plus petites que la taille d'une cellule du maillage, la simulation ne peut pas calculer correctement leur vitesse ni leur évolution. Par exemple, un tourbillon doit être représenté par plusieurs cellules afin que la simulation puisse en reproduire la forme, la vitesse de rotation et les échanges d'énergie avec son environnement.

Figure 7 : Exemple d'un tourbillon plus petit qu'une cellule a) Exemple d'un tourbillon contenu dans 4 cellules b) a) On observe un tourbillon plus petit qu'une cellule. Dans ce cas, la cellule ne peut calculer qu'une direction du tourbillon, le considérant comme un simple courant d'air. Cependant, lorsque le tourbillon est plus large qu'une cellule, il est forcément contenu dans au moins 4 cellules (Figure 7 : Exemple d'un tourbillon plus petit qu'une cellule a) Exemple d'un tourbillon contenu dans 4 cellules b) b), ce qui permet d'avoir une bonne idée de son mouvement.

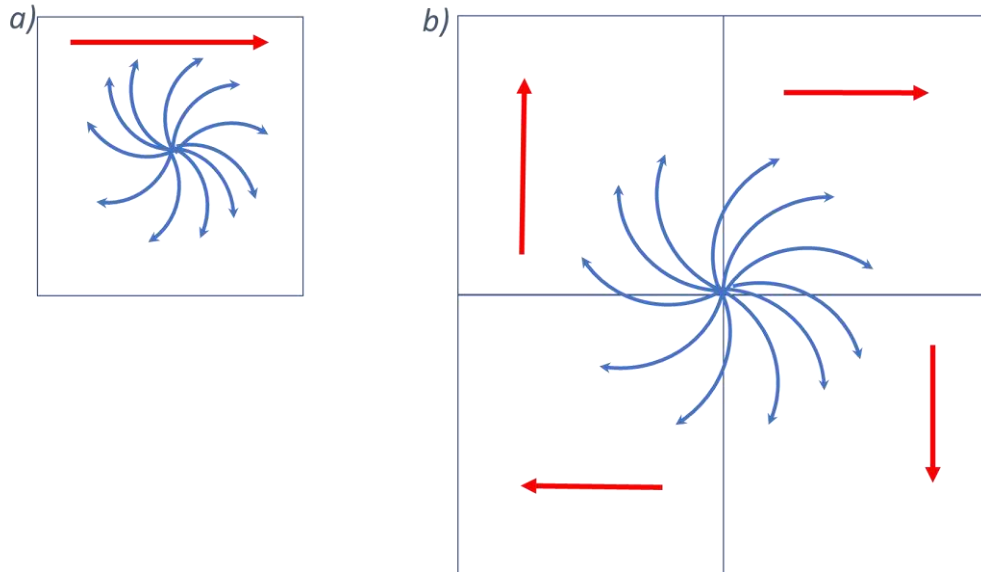


Figure 7 : Exemple d'un tourbillon plus petit qu'une cellule a) Exemple d'un tourbillon contenu dans 4 cellules b)

$\Delta x$  nous permet de vérifier la précision de notre simulation en s'assurant que la grande majorité des structures turbulentes sont plus grandes que la taille du maillage.

De la même manière,  $\Delta t$  permet de vérifier que le pas de temps de la simulation est plus court que le temps nécessaire à la création et à la dissipation des petites structures turbulentes.

Ces grandeurs doivent respectés deux critères :

$$\Delta x \leq C\eta \text{ et } \Delta t \leq C\tau$$

où  $\eta = (v^3/\epsilon)^{1/4}$  est l'échelle spatiale de Kolmogorov et  $\tau = (v/\epsilon)^{1/2}$  son équivalent temporel. Selon (Yakhot et al., 2006) une simulation peut être considérée comme suffisamment précise si le rapport  $\Delta x/\eta < 5$  et  $\Delta t/\tau < 1$

Afin de vérifier si ces conditions sont respectées dans notre cas, nous avons discrétisé le domaine de calcul en 5 plans selon chacun des axes (X, Y et Z) (Figure 8 : a) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe X, b) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe Y, c) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe Z.), ce qui représente un total de 15 sections. Sur chacune de ces coupes, nous avons vérifié les critères  $\Delta x/\eta < 5$  et  $\Delta t/\tau < 1$ .

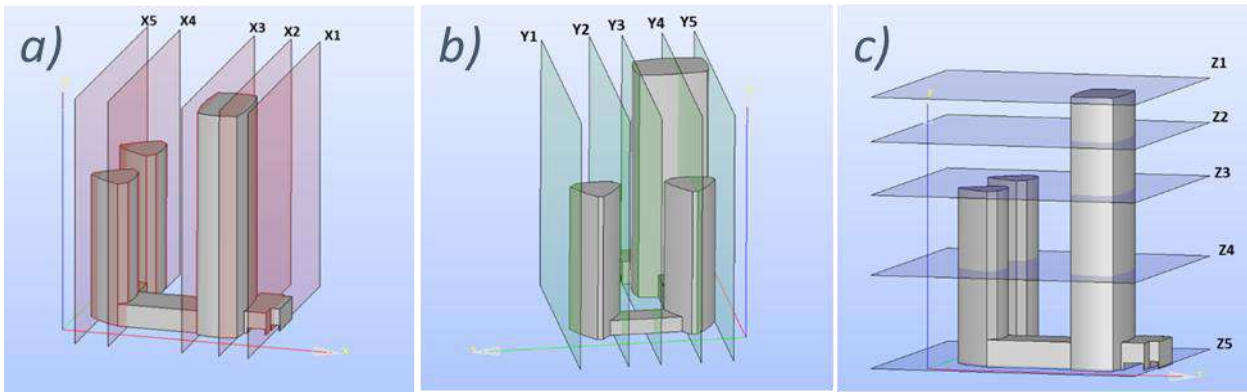


Figure 8 : a) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe X, b) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe Y, c) Discrétisation du modèle 3D selon l'axe Z.

Les résultats de cette vérification sont présentés dans le (3) ainsi que sur des visualisations issues de Paraview (Figure 9 : a) Paraview valeurs de  $(\Delta x / \eta)$  sur le plan X2 ; b) Paraview valeurs de  $(\Delta x / \eta)$  sur le plan Y4 ; c) Paraview valeurs de  $(\Delta x / \eta)$  sur le plan Z3 ; d) Paraview valeurs de  $(\Delta t / \tau)$

	Coordinates	Grid size/ Kolmogorov length scale		Time step / Kolmogorov time scale	
		Max	Threshold	Max	Threshold
<b>Normal to Y</b>	Plan Y1	2	<5	0.063	<1
	Plan Y2	2	<5	0.063	<1
	Plan Y3	2	<5	0.063	<1
	Plan Y4	2	<5	0.063	<1
	Plan Y5	2	<5	0.063	<1
<b>Normal to X</b>	Plan X1	1.1	<5	0.02	<1
	Plan X2	1.3	<5	0.026	<1
	Plan X3	1.4	<5	0.029	<1
	Plan X4	1.5	<5	0.036	<1
	Plan X5	1.4	<5	0.029	<1
<b>Normal to Z</b>	Plan Z1	1.8	<5	0.054	<1
	Plan Z2	1.8	<5	0.053	<1
	Plan Z3	1.6	<5	0.043	<1
	Plan Z4	1.7	<5	0.044	<1
	Plan Z5	1.5	<5	0.034	<1

Tableau 3 : Vérification du rapport  $\Delta x / \eta < 5$  et  $\Delta t / \tau < 1$  pour chaque plan.4 sur le plan X2 ; e) Paraview valeurs de  $(\Delta t / \tau)$  sur le plan Y4 ; f) Paraview valeurs de  $(\Delta t / \tau)$  sur le plan Z3.)

Ces résultats montrent que l'ensemble de la simulation est bien correct et assez précise.

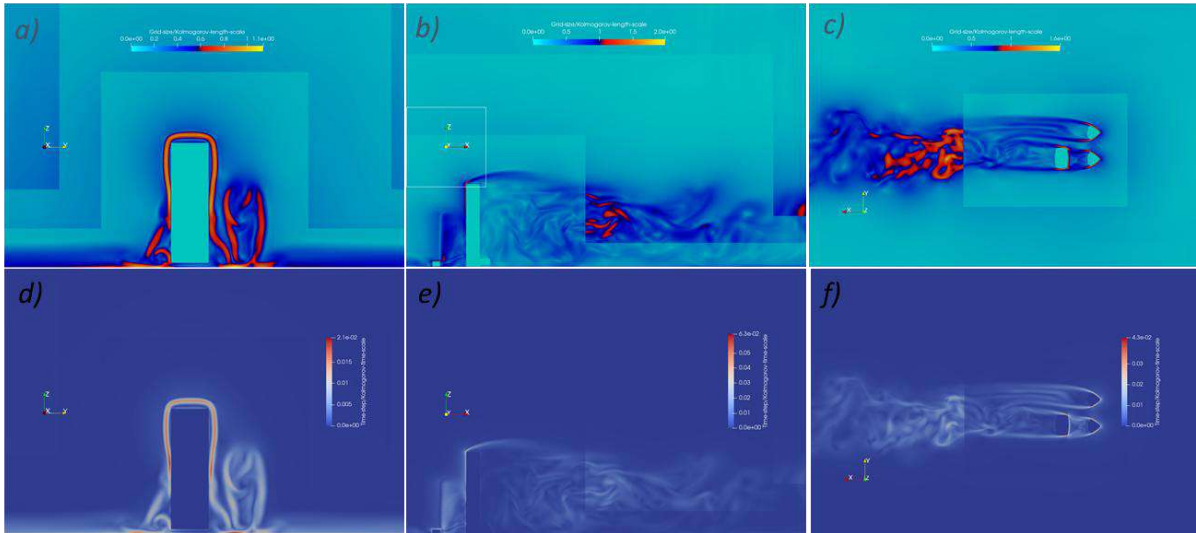


Figure 9 : a) Paraview valeurs de  $(\Delta x / \eta)$  sur le plan X2 ; b) Paraview valeurs de  $(\Delta x / \eta)$  sur le plan Y4 ; c) Paraview valeurs de  $(\Delta x / \eta)$  sur le plan Z3 ; d) Paraview valeurs de  $(\Delta t / \tau)$  sur le plan X2 ; e) Paraview valeurs de  $(\Delta t / \tau)$  sur le plan Y4 ; f) Paraview valeurs de  $(\Delta t / \tau)$  sur le plan Z3.

Ces visualisations Paraview nous donnent déjà une image du flux turbulent derrière la tour, de plus vous pourrez retrouver l'ensemble des captures d'écrans des vérifications Paraview en annexe.

## 4. Résultats

### 4.1. Le champ de vitesse

Dans cette section, je vais présenter l'analyse des résultats de simulation, en me concentrant surtout sur le champ de vitesse.

Pour trouver l'emplacement et la quantité de polluants, la meilleure façon est d'étudier leur concentration. Dans notre cas, la méthode idéale pour évaluer cette concentration est d'utiliser l'équation d'advection-diffusion qui fournit un cadre solide pour décrire les processus de transport et de dispersion.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \nabla C) + S \quad (4.1)$$

Ici,

- $\frac{\partial C}{\partial t}$  représente le taux de changement de la concentration au fil du temps,
- $\mathbf{u} \cdot \nabla C$  L'advection due au champ de vitesse c'est dire la dispersion des polluants par la vitesse du vent
- $\nabla \cdot (D \nabla C)$  La diffusion « naturel » des polluants liée au coefficient de diffusion
- $S$  la source.

Comme (Szymkiewicz & Gąsiorowski, 2021), nous supposons un vent entrant constant et une source de pollution constante, ce qui signifie que  $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ . Ainsi, nous pouvons simplifier l'équation en :

$$u \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \nabla C) + S \quad (4.2)$$

On retrouve dans cette équation le terme d'advection ( $u \cdot \nabla C$ ) et le terme de diffusion ( $\nabla \cdot (D \nabla C)$ ). Pour déterminer quel terme domine, on utilise le nombre de Peclet ( $Pe = \frac{|u|L}{D}$ ) avec  $L = 93$ .

Une valeur de  $Pe \gg 1$  montre que le transport par advection est bien plus important que les processus de diffusion.

Pour rappel, la vitesse du vent à la source est  $U = 0.9677 \text{ m/s}$  et elle varie de  $U = 0 \text{ m/s}$  à  $U = 5 \text{ m/s}$  dans la simulation, comme le montre la Figure 10 : champs de vitesse du plan Y4.

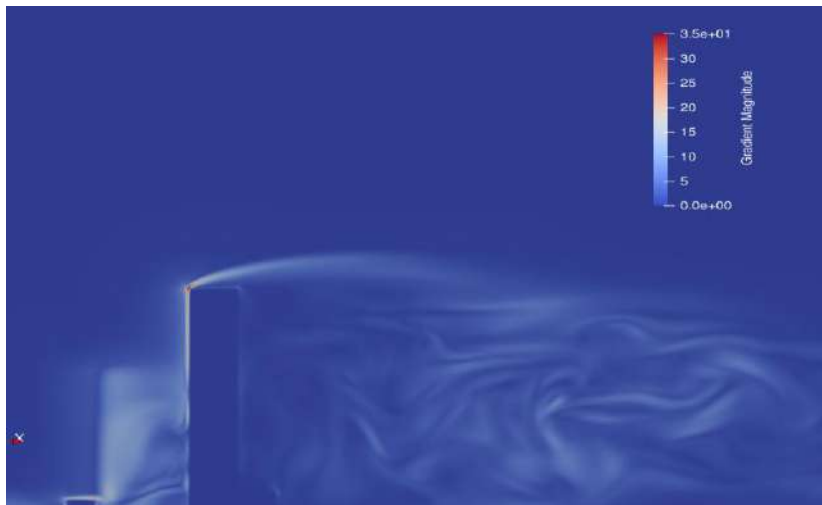


Figure 10 : champs de vitesse du plan Y4

De plus, le coefficient de diffusion  $D$ , qui représente le mélange turbulent des polluants, est estimé entre  $D = 10^{-2}$  et  $D = 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  selon (Batchvarova & Gryning, 2006; Venkatram et al., 2002). Cela nous donne une plage de  $Pe$  allant de  $Pe = 900$  (pour  $U = 0.9677 \text{ m/s}$  et  $D = 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ ) à  $Pe = 42500$  (pour  $U = 5 \text{ m/s}$  et  $D = 10^{-2}$ ). On a donc  $Pe \gg 1$  dans tous les cas

Le lien entre la vitesse et la concentration a déjà été beaucoup étudié dans la littérature scientifique. Par exemple, (Britter & Hanna, 2003) notent que dans les environnements urbains, le transport des polluants suit les lignes de courant du flux. De même, (Venkatram et al., 2002) montrent, à travers des expériences de traceurs en milieu urbain, que les concentrations suivent de près les chemins du champ de vitesse.

La visualisation avec Paraview du champ de vitesse (Figure 11 : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z1 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z3 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z5 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z1 e) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z3 f) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z5; Figure 12 : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y4 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y5 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Y4 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de

vorticité sur le plan Y5; Figure 13 : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan X2 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan X4 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan X2 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan X4) met en évidence les motifs turbulents causés par la tour. On observe une forte diminution des vitesses locales et la formation de grands tourbillons. Ces tourbillons, reconnaissables à leur cœur où la vitesse est très faible, jouent un rôle essentiel dans la rétention des polluants.

En effet, lorsque le vent rencontre la forme massive de la tour, il se sépare et génère des zones de recirculation derrière la structure. Dans ces zones, l'air circule en rotation et de manière ralentie, ce qui agit comme un piège pour les polluants. Ceux-ci ont alors tendance à s'accumuler au lieu d'être dispersés plus loin. Ce phénomène se traduit par des concentrations plus élevées de polluant en certain point. En particulier pour les particules fines qui sont plus volatiles et qui peuvent rester piégées dans les cœurs de ces tourbillons pendant une longue durée.

La vorticité, qui correspond à la mesure de l'intensité de la rotation de l'écoulement ( $\omega = \nabla \times u$ ), joue également un rôle clé. Dans les régions où la vorticité est élevée, la rotation est plus forte et le mélange avec l'air extérieur est limité. Cela renforce encore la capacité de ces tourbillons à piéger les polluants. On observe ce phénomène de manière marquée dans le sillage de la tour, où la stabilité des structures tourbillonnaires favorise la rétention et l'accumulation des particules.

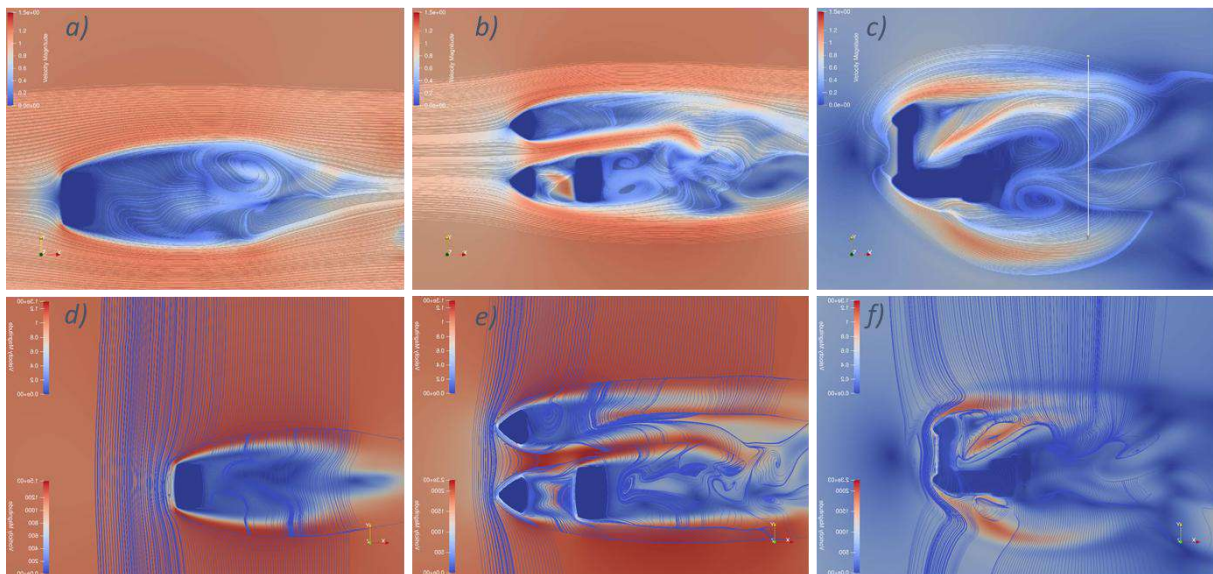


Figure 11 : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z1 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z3 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Z5 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z1 e) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z3 f) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Z5



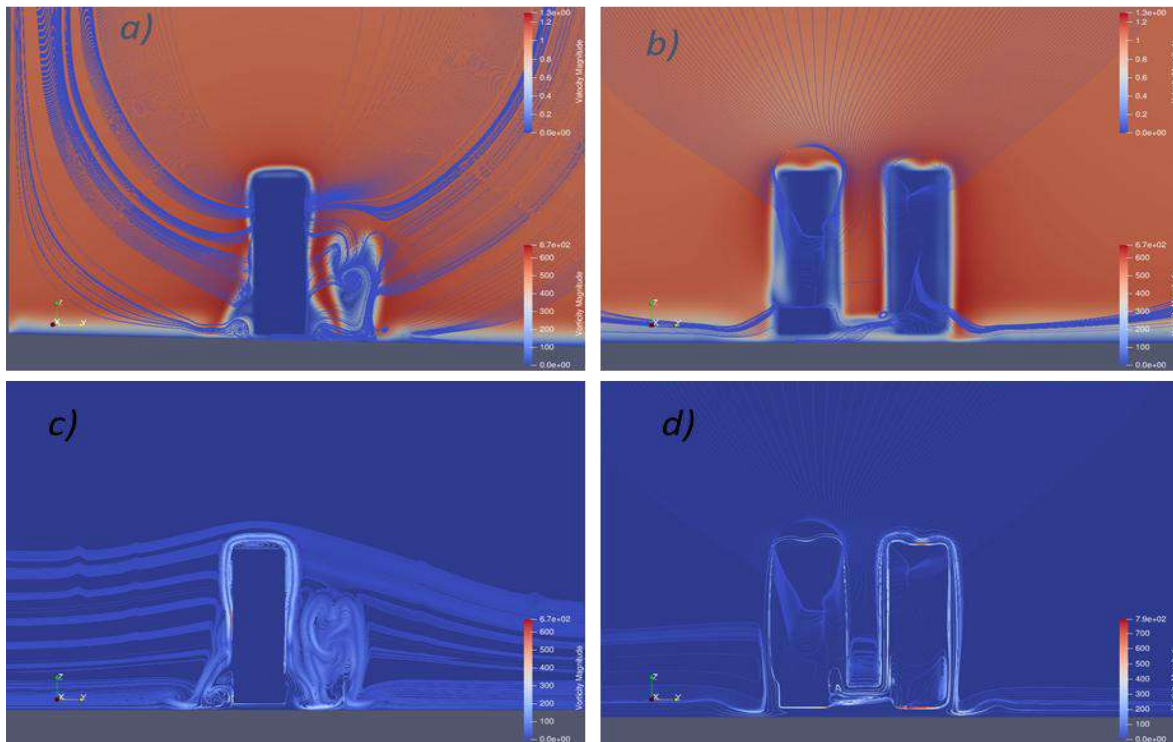


Figure 13 : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan X2 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan X4 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan X2 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan X4

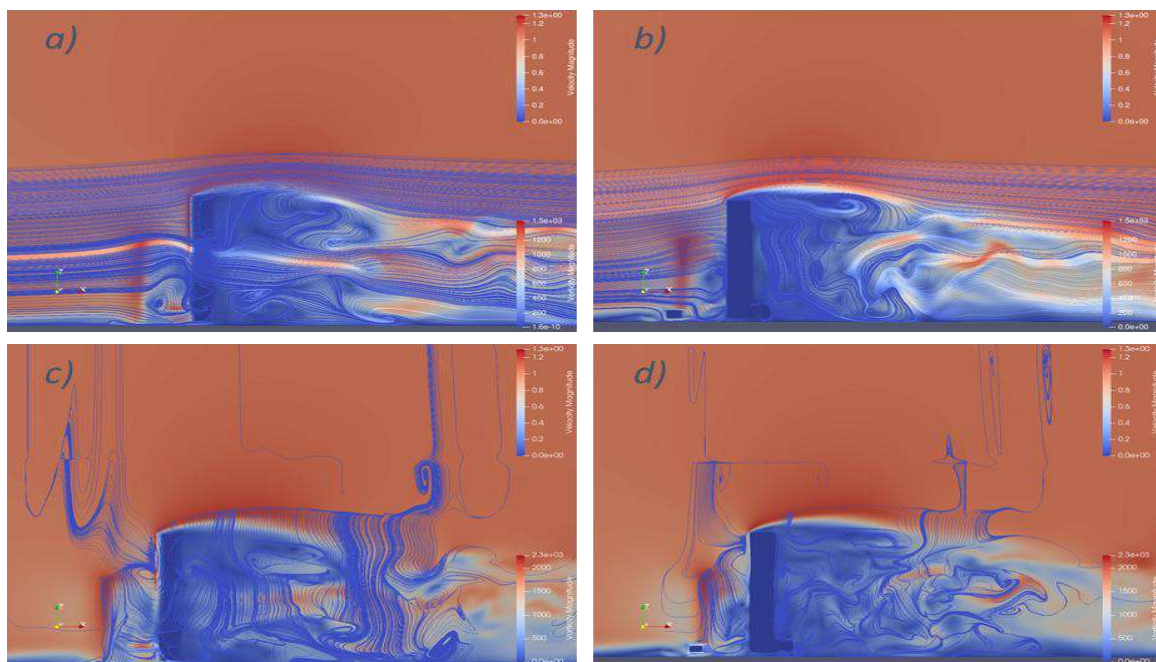


Figure 12 : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y4 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y5 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Y4 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Y5

## 4.2. Le champ de pression

Le champ de pression autour de la tour a également une influence importante sur la concentration des polluants. Deux grands mécanismes peuvent être mis en avant.

Premièrement, les gradients de pression façonnent le champ de vitesses et favorisent la formation de tourbillons dans le sillage de la tour. On retrouve ainsi une zone de forte pression sur la face avant de la tour, directement exposée au vent, tandis que l'arrière de la tour présente des zones de basse pression (Figure 14 e). Cette différence crée des zones de recirculation où les polluants restent piégés. De plus, lorsque le vent frappe la façade, une partie du flux est déviée vers le haut du bâtiment. À l'arête du toit, le flux se sépare et s'accélère (Figure 12 : a) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y4 b) Visualisation Paraview des lignes de courant de vitesse sur le plan Y5 c) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Y4 d) Visualisation Paraview des lignes de courant de vorticité sur le plan Y5 b) en contournant le bord, ce qui entraîne une chute de pression (Figure 14 c) (effet Bernoulli) et contribue à la création de tourbillons.

Deuxièmement, les gradients de pression régulent le mouvement vertical de l'air et donc la dispersion verticale des polluants. Dans la zone arrière de la tour, les basses pressions créent un effet d'aspiration qui entraîne un flux vertical ascendant (Figure 14 d). Cela a pour conséquence de soulever les polluants, vers les couches plus hautes de l'atmosphère et de modifier leur répartition en hauteur. Dans ce cas, les concentrations au niveau du sol peuvent être réduites, mais l'exposition à plus haute altitude peut être plus importante.   l'inverse, les zones de haute pression présentes sur la face avant de la tour limitent le mélange vertical, ce qui maintient les polluants près du sol et augmente les concentrations locales à hauteur piéton.

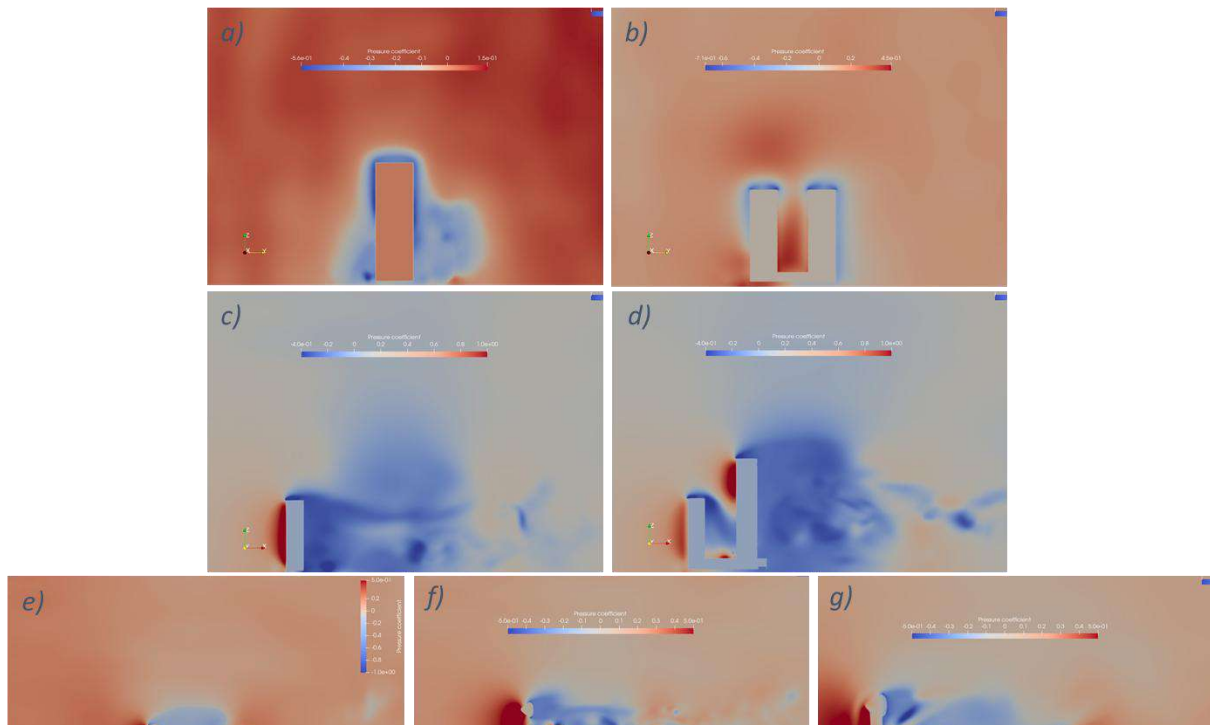


Figure 14 : a) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan X3 b) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan X4 c) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Y2 d) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Y4 e) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Z1 f) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Z3 g) Visualisation Paraview du champ de pression sur le plan Z5

## 5. Conclusion de l'étude

Cette étude sur la dispersion des polluants autour de la tour Keangnam Hanoi Landmark en utilisant la méthode de Lattice Boltzmann avec un maillage structuré et raffiné localement. Ce travail se distingue par l'application de cette méthode à un complexe de grande hauteur aux formes triangulaires et courbes, une configuration urbaine rarement étudiée. La simulation est validée grâce aux échelles de Kolmogorov, assurant une bonne résolution des structures turbulentes. Ces résultats permettent de mieux comprendre la dynamique des polluants en milieu urbain dense et offrent des indications utiles pour l'aérodynamique urbaine et la gestion de la qualité de l'air.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de tester différentes conditions, en variant la vitesse et la direction du vent ainsi que la position de la source de pollution. Cela permettrait de vérifier la robustesse des résultats et de mieux saisir les mécanismes de dispersion des polluants. L'évolution et la dissipation des tourbillons derrière les bâtiments méritent également une attention particulière, car ils influencent fortement le transport et la rétention des polluants.

## Remarques personnelles

### 6. Les difficultés rencontrées

La première difficulté que j'ai eu est liée à la barrière de la langue. J'ai réalisé mon stage à Hanoi, au Vietnam, dans un contexte où l'anglais était la seule langue pour communiquer. Même si je n'ai pas de problème particulier en anglais, le niveau global sur place était assez hétérogène. Certains professeurs s'exprimaient très bien, d'autres beaucoup moins, et c'était pareil pour les étudiants. Les échanges pouvaient donc être plus lents et parfois ambigus, ce qui compliquait un peu les discussions techniques. Au-delà de quelques moments d'incompréhension dans les commentaires des professeurs qui m'aidaient à écrire l'article, cela n'a été qu'un problème mineur.

La deuxième difficulté concernait la méthodologie et les aspects mathématiques de la simulation. Comme je l'ai déjà précisé, nous avons utilisé un code déjà existant, développé par mon professeur, qui est également co-auteur de l'article. En effet, coder une simulation complète est une compétence que je n'ai pas et qui aurait été extrêmement laborieuse à mettre en place, pour un résultat limité étant donné que ce n'était pas l'objectif principal de mon stage. C'est donc directement le code de mon professeur qui a servi de base pour nos travaux. Ce code repose sur des bases théoriques très complexes, en particulier la (LBM) combiné avec la (MRT). Ces outils demandent des connaissances mathématiques avancées que je ne maîtrise pas. Bien que j'aie pris le temps de comprendre globalement le fonctionnement de la méthodologie, rentrer dans les détails des équations et des fondements mathématiques n'était pas mon rôle. Cela n'a pas été un problème majeur, mais plutôt une source de frustration car je devais poser beaucoup de questions pour comprendre tout le fonctionnement de la simulation.

La troisième difficulté concerne le lien entre la recherche scientifique et les enjeux réels. Le problème majeur de ce type de travail est qu'il reste dans un cadre purement théorique. Même si la simulation utilisée est solide et que les résultats obtenus sont logiques, il faut garder en tête que nous travaillons uniquement sur un cas précis, avec des conditions bien définies. Dans notre étude par exemple, la vitesse du vent est fixée, la source de polluants est constante, et la direction du vent est unique.

Cela permet d'obtenir des résultats intéressants, mais uniquement dans ce cadre restreint. Dans la réalité, la situation est beaucoup plus complexe : le vent change de direction, son intensité varie au cours de la journée, et les sources de pollution ne sont pas homogènes. Ce décalage entre la simulation et la réalité peut être frustrant, surtout pour moi qui aurais aimé aller plus loin et chercher à quantifier réellement l'impact de la tour dans des conditions plus variées et plus proches du terrain.

Enfin, la dernière difficulté a été liée à la simulation en elle-même. Le volume de données générées par une telle simulation est colossal, au point qu'il était impossible de la réaliser sur mon propre ordinateur. Nous avons donc dû utiliser une centrale de calcul de l'université, et le processus complet, entre la mise en place et la fin des calculs, a pris près de deux semaines. Ce délai est d'autant plus contraignant que la simulation ne constitue que le point de départ du travail : j'avais besoin de ses résultats pour pouvoir orienter mes recherches et avancer dans l'analyse. J'ai donc passé ces deux semaines à approfondir la méthodologie utilisée, mais avec un sentiment mitigé. En réalité, j'avais compris l'essentiel en seulement quelques jours, et le

reste du temps était consacré à des recherches mathématiques très poussées, peu intéressantes pour moi et surtout trop complexes par rapport à mon rôle.

## **7. Apports personnels**

Dans cette partie, je vais aborder les apports professionnels de ce stage, mais également, de manière plus brève, les apports culturels liés à la mobilité à l'étranger et ce que le Vietnam m'a personnellement apporté.

### **7.1. Apports professionnels**

Mon stage m'a permis de découvrir de façon concrète le monde de la recherche scientifique. J'ai vite compris que ce domaine demande beaucoup de lecture et d'analyse d'articles. Les publications sont souvent très précises et techniques, mais elles s'intègrent toutes dans un cadre général commun, ce qui force à choisir ce qu'on retient.

J'ai appris qu'il est crucial de suivre un chemin logique dans la recherche. Si on se disperse trop vers des articles trop éloignés du sujet principal, on risque de se perdre et de gaspiller du temps. Bien sûr, toutes mes lectures m'ont donné des idées et une meilleure compréhension de mon sujet, mais c'est impossible de tout utiliser. Il faut sélectionner seulement ce qui est vraiment utile pour répondre à sa question de départ.

Ça m'a aussi appris à travailler avec plus de rigueur. J'ai pris l'habitude de noter, de classer et d'organiser les passages importants que je trouvais dans mes lectures, pour garder une vue claire et structurée de l'avancée de mes recherches. Cette méthode m'a beaucoup aidé pour rédiger mon article scientifique, où chaque référence devait être utilisée de manière exacte et bien justifiée.

Pour la partie simulation, j'avais déjà une première expérience en dynamique des fluides numérique, et je connaissais déjà des outils comme Paraview pour le traitement des résultats. Par contre, la méthode de cette simulation était complètement nouvelle pour moi. J'étais plus habitué à des approches comme la DNS ou la RANS, mais pas à une méthode aussi compliquée que la LBM avec temps de relaxation multiple. Ça m'a permis d'élargir mes connaissances et de découvrir une nouvelle façon d'aborder la simulation des écoulements.

### **7.2. Apports Culturel**

La mobilité internationale liée à ce stage m'a permis de découvrir Hanoï et, plus largement, le Vietnam. Capitale à la fois chaotique et énergique, Hanoï m'a marqué par le dynamisme de sa vie quotidienne et la simplicité respectueuse de ses habitants. À l'université, j'ai découvert une relation plus conviviale entre professeurs et étudiants, les enseignants participant volontiers à des activités sportives et favorisant un climat d'échange. J'ai également eu l'opportunité de voyager dans les montagnes voisines pour visiter des temples et rencontrer des moines, ce qui m'a rapproché des professeurs et renforcé nos liens. Enfin, j'ai été régulièrement impliqué dans la vie universitaire, en intervenant notamment dans des classes pour présenter l'EIVP et les programmes d'échanges, ce qui m'a apporté une expérience enrichissante de communication en public.

## 8. Perspectives d'évolutions

Après ce stage, on peut imaginer plusieurs idées pour aller plus loin et faire évoluer le projet. D'abord, les simulations que j'ai réalisées sont une première étape, et il serait bien de les compléter par des tests réels sur le terrain. Par exemple, on pourrait installer des capteurs de pollution à différentes hauteurs sur des grands bâtiments. Ces mesures permettraient de vérifier les résultats des simulations, mais aussi d'évaluer de façon plus précise l'impact concret de la pollution sur les habitants et les piétons. Ça aiderait aussi à mieux comprendre comment les polluants se répartissent en hauteur dans les villes, et quels sont les effets sur la santé des gens.

Ces idées amènent de nouvelles questions à se poser : par exemple, comment prendre en compte les changements de météo (comme la vitesse et la direction du vent, l'humidité ou la température) pour évaluer la façon dont la pollution se disperse ? Comment connecter les données des simulations et des mesures réelles à des modèles qui calculent l'exposition des populations, pour mesurer les risques pour la santé ? Enfin, sur un plan plus pratique, une grande question est de savoir comment utiliser ces résultats pour changer l'aménagement des villes, les règles de construction, ou les politiques publiques sur la qualité de l'air.

Même si ce stage a été très enrichissant et que je suis fier de ce que j'ai fait, j'ai réalisé que la recherche n'est pas pour moi. Elle est trop théorique et manque de résultats concrets, à mon avis. J'en garde un sentiment que ce n'est pas fini, contrairement à mes expériences en bureau d'études où les projets menaient à des solutions qu'on pouvait appliquer tout de suite. Du coup, je veux orienter ma carrière vers des jobs plus concrets et plus opérationnels.

## Conclusion

En conclusion, ce stage a permis d'aborder la problématique suivante : "Comment la modélisation numérique des écoulements turbulents autour de la Keangnam Landmark Tower peut-elle contribuer à comprendre la dispersion des polluants atmosphériques et à proposer des solutions pour améliorer la qualité de l'air à Hanoï ?"

Nous avons étudié les interactions détaillées entre les écoulements turbulents et la concentration de polluants autour de la Keangnam Landmark Tower en utilisant la méthode LBM combinée à un raffinement de maillage structuré par blocs, adapté aux défis aérodynamiques urbains. Le domaine de calcul, basé sur un modèle SALOME issu de plans AutoCAD. Les conditions aux limites incluaient une vitesse d'entrée uniforme, des parois libres sur les côtés et le haut, des conditions de glissement sur les bords du domaine et de rebond sur la tour, avec une sortie ouverte.

Un raffinement de maillage à trois niveaux a permis de capturer les couches limites et les zones de cisaillement. La fidélité de la simulation a été vérifiée en comparant la taille de maillage et le pas de temps aux échelles de Kolmogorov, respectant les critères  $\Delta x/\eta < 5$  et  $\Delta t/\tau < 1$  dans les zones critiques, garantissant une résolution précise des fluctuations turbulentes.

La distribution des polluants suit étroitement les lignes de courant de la vitesse, en raison de nombres de Peclet élevés ( $Pe \gg 1$ ), où l'advection domine la diffusion. Les visualisations montrent des zones de recirculation en aval de la tour, qui piègent les polluants en réduisant les vitesses et en limitant leur transport. Les gradients de pression renforcent ces effets : les transitions haute-basse pression créent des vortex qui accumulent les polluants horizontalement, tandis que les régions de basse pression favorisent une redistribution verticale, influençant à la fois l'accumulation près de la structure et la dispersion en hauteur.

Pour faire un bilan Vpersonnel, ce stage m'a confronté à plusieurs difficultés : la barrière de la langue, la complexité mathématique des simulations et le décalage entre les résultats théoriques et la réalité du terrain. Malgré ces obstacles, j'ai beaucoup appris sur la rigueur nécessaire en recherche scientifique, l'organisation des lectures et la compréhension des méthodologies avancées comme la LBM.

Sur le plan culturel, vivre à Hanoï m'a permis de découvrir une ville dynamique et des relations universitaires conviviales, ainsi que d'élargir mon expérience personnelle à travers les échanges avec les professeurs et les activités locales.

Enfin, cette expérience m'a conforté dans mon souhait de m'orienter vers des métiers plus opérationnels et concrets, où les résultats ont un impact direct, tout en gardant un enrichissement précieux sur le plan scientifique et humain.

## Références

- AIJ. (2017). Guidebook of Recommendations for Loads on Buildings 2 – Wind-Induced Response and Load Estimation / Practical Guide of CFD for Wind-Resistant Design (in Japanese).
- Batchvarova, & Gryning. (2006). Progress in urban dispersion studies. 84.
- Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- Britter, R. E., & Hanna, S. R. (2003). Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1), 469–496. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147>
- Cao, Tomura, Zhou, Bao, & Han. (2022). Topological description of near-wall flows around a surface-mounted square cylinder at high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1094>
- Hang, J. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Atmospheric Environment*, 45(31). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.010>
- Ladd. (1994). Numerical simulations of particulate suspensions via a discretized Boltzmann equation. Part 1. Theoretical foundation. *Journal of Fluid Mechanics*, 271. <https://doi.org/10.1017/S0022112094001771>
- Lateb, Meroney, & Yataghene. (2016). On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments. *Atmospheric Environment*.
- Mei, Luo, Zhao, & Wang. (2019). Street canyon ventilation and airborne pollutant dispersion: 2-D versus 3-D CFD simulations. *Building and Environment*.
- Succi, S. (2001). *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford Science Publications.
- Szymkiewicz, & Gąsiorowski. (n.d.). Adaptive method for the solution of 1D and 2D advection–diffusion equations used in environmental engineering. *Journal of Hydroinformatics*, 2021.
- Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2013). CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. *Atmospheric Environment*, 79, 716–730. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.028>
- Venkatram, Upadhyay, & Yuan. (2002). The development and evaluation of a dispersion model for urban areas.
- White. (2006). *Viscous Fluid Flow* (McGraw-Hill).
- Yakhot, Liu, & Nikitin. (2006). Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.001>

# Annexes

## Annexe I : Référence de l'article scientifique

### Références

- [1]. AIJ. (2017). Guidebook of Recommendations for Loads on Buildings 2 – Wind-Induced Response and Load Estimation / Practical Guide of CFD for Wind-Resistant Design (in Japanese).
- [2]. Aristodemou, Boganegra, Mottet, & Pavlidis. (2018). How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood. *Environmental Pollution*.
- [3]. Bader, M. (2012). *Space-Filling Curves* (Vol. 9). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31046-1>
- [4]. Batchvarova, & Gryning. (2006). *Progress in urban dispersion studies*. 84.
- [5]. Blocken, B. (2009). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: Wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41.
- [6]. Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- [7]. Blocken, Stathopoulos, & van Beeck. (2016). CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings: Influence of wall roughness, building geometry, and atmospheric conditions.
- [8]. Bouzidi, M., Firdaouss, M., & Lallemand, P. (2001). Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries. *Physics of Fluids*, 13(11), 3452–3459. <https://doi.org/10.1063/1.1399290>
- [9]. Britter, R. E., & Hanna, S. R. (2003). Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1), 469–496. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147>
- [10]. Cao, Tomura, Zhou, Bao, & Han. (2022). Topological description of near-wall flows around a surface-mounted square cylinder at high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.1094>
- [11]. Chen, S., & Doolen, G. D. (1998). LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR FLUID FLOWS. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 329–364. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.329>
- [12]. Chen, Y., Cai, Q., Xia, Z., Wang, M., & Chen, S. (2013). Momentum-exchange method in lattice Boltzmann simulations of particle-fluid interactions. *Physical Review E*, 88(1), 013303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.013303>
- [13]. Dubois, F., & Lallemand, P. (2011). Quartic parameters for acoustic applications of lattice Boltzmann scheme. *Computers & Mathematics with Applications*, 61(12), 3404–3416. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.01.011>
- [14]. Duong, V. D., Luc, V. N., Duc, V. N., & Truong, C. D. (2024). Direct numerical simulation of 45° oblique flow past surface-mounted square cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 992.

- [15]. Duong, V. D., Nguyen, V. D., Nguyen, V. T., & Ngo, I. L. (2022). Low-Reynolds-number wake of three tandem elliptic cylinders. *Physics of Fluids*, 34(4), 043605. <https://doi.org/10.1063/5.0086685>
- [16]. European Environment Agency. (2021). Air quality in Europe 2021. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021>
- [17]. Falcucci, & Aureli. (2011). Transverse harmonic oscillations of laminae in viscous fluids: A lattice Boltzmann study. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369.
- [18]. Franke, J. (2007). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment [Guide technique]. COST Office.
- [19]. Fu, Wang, & Yang. (2025). Gap flow dynamics and air pollutant dispersion mechanism behind building clusters.
- [20]. Ginger, & Letchford. (1993). Characteristics of large pressures in regions of flow separation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [21]. Gousseau, P. (2011). Large-Eddy Simulation of Pollutant Dispersion in Downtown Montreal: Evaluation of the Convective and Turbulent Mass Fluxes. *Environmental Fluid Mechanics*.
- [22]. Hang, J. (2012). The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. *Atmospheric Environment*, 45(31). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.010>
- [23]. He, Ruan, Mehta, Gilliam, & Wu. (2007). Nonparametric independent component analysis for detecting pressure fluctuation induced by roof corner vortex. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95.
- [24]. Hertwig, Patnaik, & Leitl. (2019). Wake Characteristics of Tall Buildings in a Realistic Urban Canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, 173.
- [25]. Higuera, F. J., & Jiménez, J. (1989). Boltzmann Approach to Lattice Gas Simulations. *Europhysics Letters (EPL)*, 9(7), 663–668. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/9/7/009>
- [26]. Higuera, F. J., & Succi, S. (1989). Simulating the Flow Around a Circular Cylinder with a Lattice Boltzmann Equation. *Europhysics Letters (EPL)*, 8(6), 517–521. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/8/6/005>
- [27]. Higuera, F. J., Succi, S., & Benzi, R. (1989). Lattice Gas Dynamics with Enhanced Collisions. *Europhysics Letters (EPL)*, 9(4), 345–349. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/9/4/008>
- [28]. Huang, K. (2008). *Statistical Mechanics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [29]. Kamatsuchi. (2007). Turbulent flow simulation around complex geometries with cartesian grid method. <https://doi.org/10.2514/6.2007-1459>
- [30]. Kida, & Miura. (1998). Identification and Analysis of Vortex Structures in a Turbulent Boundary Layer. *Journal of Fluid Mechanics*.
- [31]. Ladd. (1994). Numerical simulations of particulate suspensions via a discretized Boltzmann equation. Part 1. Theoretical foundation. *Journal of Fluid Mechanics*, 271. <https://doi.org/10.1017/S0022112094001771>
- [32]. Ladd, & Verberg. (2001). Lattice-Boltzmann simulations of particle–fluid suspensions. *Journal of Statistical Physics*, 104. <https://doi.org/10.1023/A:1010414013942>

- [33]. Lallemand, P., & Luo, L.-S. (2000). Theory of the lattice Boltzmann method: Dispersion, dissipation, isotropy, Galilean invariance, and stability. *Physical Review E*, 61(6), 6546–6562. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.6546>
- [34]. Lateb, Meroney, & Yataghene. (2016). On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments. *Atmospheric Environment*.
- [35]. Li, Z., Ming, T., Liu, S., Peng, C., De Richter, R., Li, W., Zhang, H., & Wen, C.-Y. (2021). Review on pollutant dispersion in urban areas-part A: Effects of mechanical factors and urban morphology. *Building and Environment*, 190, 107534. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107534>
- [36]. Li, Zhang, Dong, & Abdullah. (2020). Small-scale reconstruction in three-dimensional Kolmogorov flows using four-dimensional variational data assimilation. *Journal of Fluid Mechanics*, 885.
- [37]. Liang. (2021). How do built environments measured at two scales influence PM<sub>2.5</sub> concentrations? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 99. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103014>
- [38]. Lim, H. D., et al. (2022). Pollutant dispersion by tall buildings: Laboratory experiments and Large-Eddy Simulation. *Experiments in Fluids*, 63.
- [39]. Malik, Ejaz, & Akgül. (2024). Exploring the advection-diffusion equation through the subdivision collocation method: A numerical study. *Scientific Reports*, 14.
- [40]. Mei, .al. (2019). Characteristics of air pollutant dispersion around a high-rise building. *Environmental Pollution*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.024>
- [41]. Mei, Luo, Zhao, & Wang. (2019). Street canyon ventilation and airborne pollutant dispersion: 2-D versus 3-D CFD simulations. *Building and Environment*.
- [42]. Mei, Luo, Zhao, & Wang. (2020). Large-eddy simulation of flow and pollutant dispersion around a cubic building: Analysis of turbulent structures and dispersing mechanisms. *Building and Environment*.
- [43]. Moeng, & Rotunno. (1990). Vertical-Velocity Budgets in the Convective Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*.
- [44]. Moin, P., & Mahesh, K. (1998). DIRECT NUMERICAL SIMULATION: A Tool in Turbulence Research. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 539–578. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.539>
- [45]. Möller, T., & Trumbore, B. (2005). Fast, minimum storage ray/triangle intersection. *ACM SIGGRAPH 2005 Courses on - SIGGRAPH '05*, 7. <https://doi.org/10.1145/1198555.1198746>
- [46]. OECD. (2016). *The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264257474-en>
- [47]. Peng. (1998). *Modeling of Turbulent Flow and Heat Transfer Modelling for Building Ventilation*. Chalmers University of Technology.
- [48]. Plummer. (2019). Reynolds-number independence in urban canopy flow models. *Urban Climate*.
- [49]. Rich, & Vanderwel. (2024). *Pollutant Dispersion Around a Single Tall Building*.

- [50]. Succi, S. (2001). *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford Science Publications.
- [51]. Succi, S. (2015). Lattice Boltzmann 2038. *EPL (Europhysics Letters)*, 109(5), 50001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/109/50001>
- [52]. Suga, K., Kuwata, Y., Takashima, K., & Chikasue, R. (2015). A D3Q27 multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method for turbulent flows. *Computers & Mathematics with Applications*, 69(6), 518–529. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2015.01.010>
- [53]. Szymkiewicz, & Gąsiorowski. (n.d.). Adaptive method for the solution of 1D and 2D advection–diffusion equations used in environmental engineering. *Journal of Hydroinformatics*, 2021.
- [54]. Takash, & Nakahashi. (2008). Efficient and robust cartesian mesh generation for building-cube method. *Journal of Computational Science and Technology*. <https://doi.org/10.1299/jcst.2.435>
- [55]. Tominaga, & Stathopoulos. (2010). Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Model evaluation of RANS and LES.
- [56]. Tominaga, Y., & Stathopoulos, T. (2013). CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. *Atmospheric Environment*, 79, 716–730. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.028>
- [57]. UNEP. (2019, June). A review of 20 Years' Air Pollution Control in Beijing \textbar UNEP - UN Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/review-20-years-air-pollution-control-beijing>
- [58]. Venkatram, Upadhyay, & Yuan. (2002). The development and evaluation of a dispersion model for urban areas.
- [59]. Wang, L. (2020). Enhanced multi-relaxation-time lattice Boltzmann model by entropic stabilizers. *Physical Review E*, 102(2), 023307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.023307>
- [60]. White. (2006). *Viscous Fluid Flow* (McGraw-Hill).
- [61]. World Health Organisation. (n.d.). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Retrieved June 9, 2025, from <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [62]. Yakhot, Liu, & Nikitin. (2006). Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.001>
- [63]. Yu. (2023). Correlation analysis of urban building form and PM<sub>2.5</sub> pollution based on satellite and ground observations. 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1111223>
- [64]. Zhang, X., Chen, X., & Zhang, X. (2018). The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(37), 9193–9197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809474115>

## Annexe II : Equation de la méthodologie

Voici l'ensemble des équations de la méthodologie de la simulation. Je peut intégré toute la méthodologie pour raison d'auto-plagiat.

Modèle (BGK) (2.1) **2.12.12.1:**

$$\Gamma_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = \Gamma_i(x, t) - \omega \left( \Gamma_i(x, t) - \Gamma_i^{eq}(x, t) \right)$$

Avec  $\Gamma_i$ ,  $\Gamma_i^{eq}$ ,  $x$ ,  $e_i$ ,  $\Delta t$  and  $\omega = 1/\tau$  des fonctions de distributions de vitesse discrètes

Vitesses discrètes :

$$e_i = \begin{cases} 0, & i = 0; \\ (\pm 1, 0, 0), (0, \pm 1, 0), (0, 0, \pm 1)c, & i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \\ (\pm 1, \pm 1, 0), (\pm 1, 0, \pm 1), (0, \pm 1, \pm 1)c, & i = 7, 8, \dots, 17, 18; \\ (\pm 1, \pm 1, \pm 1)c, & i = 19, 20, \dots, 25, 26, \end{cases}$$

Avec,  $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

Fonction de distribution du D3Q27 :

$$\Gamma_i^{eq}(x, t) = \rho w_i \left[ 1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_i \cdot u)^2 - (c_s |u|)^2}{2 c_s^4} \right]$$

Avec  $w_0 = \frac{8}{27}$ ,  $w_i = \frac{2}{27}$  pour  $i = 1 - 6$ ,  $w_i = \frac{1}{54}$ , pour  $i = 7 - 18$ ,  $w_i = \frac{1}{216}$ , pour  $i = 19 - 26$ ,  $c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}$  et  $\nu = c_s^2(\tau - 0.5 \Delta t)$

Modèle (MRT) (2.2):

$$\Gamma_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = \Gamma_i(x, t) - M^{-1} S [m_i(x, t) - m_i^{eq}(x, t)] \Delta t,$$

$S$  est une matrice diagonal  $27 \times 27$  avec  $s_{0-3} = 0$ ,  $s_4 = 1.54$ ,  $s_{5-9} = \frac{1}{0.5 + 3\nu}$ ,  $s_{10-12} = 1.5$ ,  $s_{13-15} = 1.83$ ,  $s_{16} = 1.4$ ,  $s_{17} = 1.61$ ,  $s_{18-22} = 1.98$  et  $s_{23-26} = 1.74$

Fonction de distribution des triangles du maillage :

$$\Gamma_i^+(x_b, t + \Delta t) = \begin{cases} 2q\Gamma_i^+(x_b, t) + (1 - 2q)\Gamma_i^+(x_f, t), & q \leq \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2q}\Gamma_i^+(x_b, t) - \frac{2q-1}{2q}\Gamma_i^+(x_b, t), & q \geq \frac{1}{2}, \end{cases}$$

Avec  $q = \frac{d}{|e_i|\Delta t} \in [0,1]$

### Annexe III : Visualisation Paraview

Voici l'ensemble des visualisation Paraview des échelles de Kolmogorov. (En haut critère spatial  $\Delta x/\eta < 5$  ; en bas critère temporel  $\Delta t/\tau < 1$ )

