

**UNIVERSITÉ NATIONALE DU VIETNAM À HANOÏ (UNVH)**  
**INSTITUT FRANCOPHONE INTERNATIONAL (IFI)**

---



Option : Systèmes Intelligents et Multimédia (SIM)

**TRAVAIL PERSONEL ENCADRÉ (TPE)**

**Sujet : Une simulation pour étudier la pollution de l'air en milieu urbain : le cas de la ville de HANOÏ**

Etudiant :

KAFANDO Rodrique  
Email : kafando.rodrique@gmail.com  
kafando.p21@ifi.edu.vn

Encadrants :

Dr Manh Hung Nguyen (IFI)  
Email : nmh.nguyenmanhhung@gmail.com  
Dr HO Tuong Vinh (IFI)  
Email : ho.tuong.vinh@ifi.edu.vn

*PROMOTION XXI*

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Analyse du sujet</b>	<b>5</b>
1	Introduction	5
2	Contexte	5
3	Problématique	6
3.1	Problèmes théoriques . . . . .	6
3.2	Problèmes pratiques . . . . .	7
4	Définition des termes et outils employés	7
4.1	Mots clés . . . . .	7
4.2	Outils nécessaires . . . . .	8
5	Résultats attendus	8
6	Conclusion	9
<b>II</b>	<b>Etat de l’art</b>	<b>10</b>
1	Introduction	10
2	Les principaux polluants produit par le trafic routier [1]	10
3	Les modèles de dispersion atmosphérique utilisés en milieu urbain	11
3.1	Les modèles paramétriques . . . . .	11
3.1.1	Les modèles de panache gaussien . . . . .	11
3.1.2	Le modèle CALINE4 . . . . .	11
3.1.3	Le modèle TNO et CAR . . . . .	12
3.1.4	STREET-SRI . . . . .	12
3.1.5	Le modèle CPBM (Canyon Plume Box Model) . . . . .	12
3.1.6	OSPM et AEOLIUS . . . . .	13
3.1.7	Les modèles récepteurs . . . . .	13
3.2	Les modèles computationnels de fluides dynamiques (CFD) . . . . .	13
4	Analyse critique de quelques travaux	13
5	Conclusion	17
<b>III</b>	<b>Proposition de solution</b>	<b>18</b>

<b>1</b>	<b>Modèle proposé</b>	<b>18</b>
1.1	Description générale du modèle . . . . .	18
1.2	Apports . . . . .	19
1.3	Les paramètres du modèle . . . . .	21
1.3.1	Les conditions météorologiques . . . . .	21
1.3.2	Les données de trafic . . . . .	21
1.4	Pourquoi ce modèle ? . . . . .	22
1.4.1	Le contexte . . . . .	22
1.4.2	La morphologie urbaine . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Approche SMA (Système Multi-agent)</b>	<b>22</b>
2.1	Les agents fixes . . . . .	23
2.2	Les agents mobiles . . . . .	23
<b>3</b>	<b>La phase de réalisation</b>	<b>23</b>
3.1	Plateforme et outils nécessaires . . . . .	23
3.2	Les données nécessaires . . . . .	24
3.3	Les contraintes à prévoir . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Plannification</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>25</b>
<b>IV</b>	<b>Mise en place de la solution proposée</b>	<b>26</b>
<b>1</b>	<b>Modélisation du modèle proposé</b>	<b>26</b>
1.1	Extraction des agents du modèle proposé . . . . .	26
1.2	Diagramme de classe du modèle proposé . . . . .	28
1.3	Présentation du modèle réalisé . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Simulation</b>	<b>29</b>
2.1	Scénarios de simulation . . . . .	29
2.2	Conditions d'arrêt . . . . .	31
2.3	Paramètres d'évaluation . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Expérimentation et analyse des résultats</b>	<b>31</b>
3.1	Présentation des données utilisées . . . . .	32
3.2	Analyse des résultats . . . . .	33
<b>V</b>	<b>Conclusion Générale et Perspectives</b>	<b>38</b>
<b>1</b>	<b>Difficultés rencontrées</b>	<b>38</b>



## Table des figures

1	Chaine de production des polluants . . . . .	6
2	Schéma du modèle OSPM . . . . .	20
3	Schéma du modèle proposé . . . . .	21
4	Diagramme de classe du modèle proposé . . . . .	29
5	Diagramme de classe du modèle réalisé . . . . .	30
6	Schéma du modèle simplifié (réalisé) . . . . .	30
7	Environnement de simulation (OpenStreetMap) . . . . .	32
8	Environnement à l'initial . . . . .	33
9	Présentation des agents sur la carte . . . . .	34
10	Carte de pollution dans le cas d'un vent instable (direction non définie) . . . . .	34
11	Carte de pollution avec un vent directionnel 1 . . . . .	35
12	Carte de pollution avec un vent directionnel 2 . . . . .	35
13	Carte d'illustration d'un cas de congestion . . . . .	36
14	Evolution des polluants en fonction du temps . . . . .	37
15	Quantité de polluants par types générée au cours de la simulation . . . . .	37
16	Représentation de la pollution par une grille évolutive . . . . .	39

## Liste des tableaux

1	Tableau comparatif de quelques travaux existants . . . . .	16
2	Tableau de planification . . . . .	24
3	Caractéristiques de véhicule . . . . .	26
4	Caractéristiques de polluant . . . . .	27
5	Caractéristiques de vent . . . . .	27
6	Caractéristiques de arbre . . . . .	27
7	Caractéristiques de pluie . . . . .	28
8	Caractéristiques de indicateur . . . . .	28
9	Caractéristiques de habitant . . . . .	28
10	Critères d'évaluations . . . . .	31

## Première partie

# Analyse du sujet

## 1 Introduction

Les évolutions technologiques sont de nos jours rependues et touchent tous les domaines qui englobent nos quotidiens. Malheureusement, au vu des avantages que ces évolutions nous apportent, elles présentent des retombés néfastes pour la vie de l'humanité ainsi que sur l'environnement. Parmi ces domaines, nous avons le domaine du transport routier, plus précisément le transport automobile qui est maintenant une partie inhérente de notre civilisation. L'un des aspects néfastes de ce développement est la pollution de l'air issue des pots d'échappement des véhicules. Ce phénomène prend de plus en plus d'ampleur dans les zones urbaines. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) [2], entre 1990 et 2010, la pollution de l'air a augmenté de près de 30 % en Asie et dans la Pacifique avec un enjeu fort pour les villes où d'années en années se concentre toujours plus de population. C'est l'une des situations préoccupante que vivent les autorités des différents pays du monde entier surtout dans les pays développés. C'est ainsi qu'à l'occasion de notre Travail Personnel Encadré (TPE), le sujet intitulé «Une simulation pour étudier la pollution atmosphérique en ville : le cas de la ville de HANOÏ » nous a été soumis comme thème de recherche. Pour ce faire, nous subdivisons notre travail en trois grandes lignes que sont l'analyse du sujet en première position, un état de l'art sur les différents travaux ayant déjà abordés le même sujet ou de sujets similaires, et en dernière position nous proposerons une solution sur laquelle nous allons nous baser pour la réalisation de la phase pratique.

Le TPE est un module dans lequel, l'étudiant choisit un sujet de réflexion qu'il doit réaliser le long d'un semestre. Il est encadré par des professeurs et/ou des personnes qualifiées dans le domaine. Le TPE a pour principal but d'évaluer la capacité qu'a l'étudiant à travailler de façon autonome, et de développer son sens de curiosité afin de pouvoir faire face au monde de la recherche. Dans cette première partie, il est question pour nous de définir le contexte et les concepts de notre sujet afin de mieux l'appréhender pour la suite du travail. Dans la suite de notre travail, nous présenterons d'abord, le domaine de notre sujet, ensuite les outils existants, en outre, les problèmes à résoudre, les termes et outils employés, les références et enfin les résultats attendus.

## 2 Contexte

Nous avons à notre disposition un sujet transversal faisant appel à divers domaines à savoir l'informatique, les connaissances liées aux changements climatiques, du domaine sanitaire et bien d'autres. Afin de mieux comprendre et d'appréhender le concept de la pollution atmosphérique, il serait d'une grande importance de réaliser des séances de simulation avec tout ce qui pourrait entrer dans la production de ce phénomène. Notre travail consistera donc à simuler la pollution atmosphérique dans son ensemble à partir des sources de pollution jusqu'à sa dispersion dans

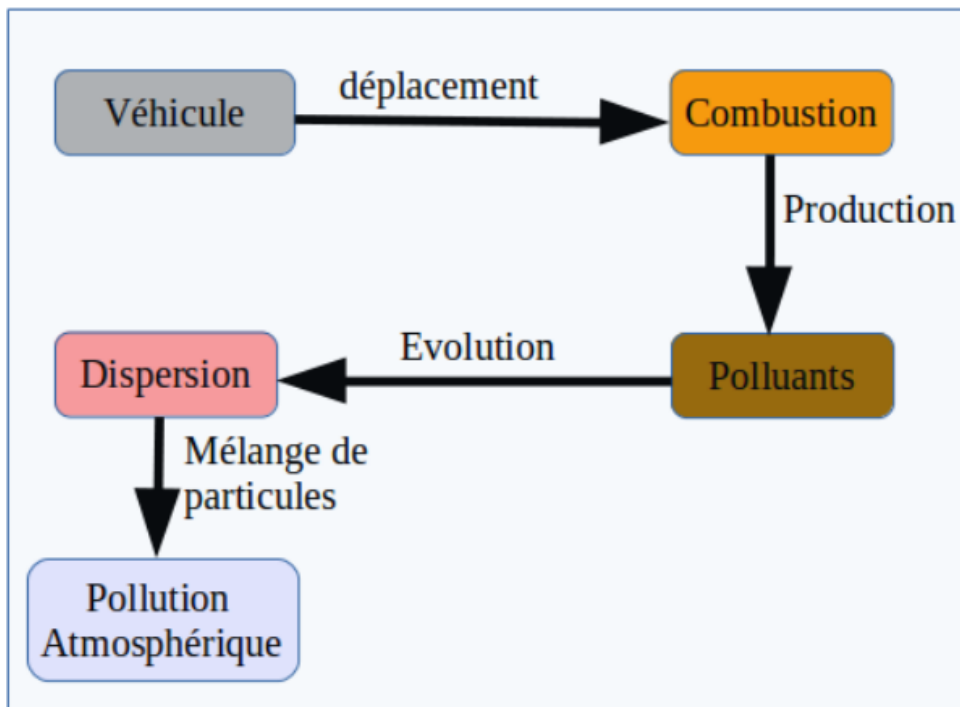


FIGURE 1 – *Chaîne de production des polluants*

l’atmosphère et éventuellement son impact sur la vie humaine que sur l’environnement. Ces processus sont de nos jours possible grâce à la disponibilité des plateformes de simulations qui nous permettent de représenter le monde réel sous une autre forme et compréhensible. Parmi ces plates- formes nous avons les plates-formes de simulations multi-agents qui feront objet dans notre cas.

### 3 Problématique

La figure 1 donne une illustration sur la problématique de la chaîne de production de polluants et de leurs dispersions dans l’atmosphère et de leurs impacts sur les habitants.

Le principal but de ce sujet est de proposer et implémenter un modèle qui répondra au mieux la figure ci-dessus. Ce modèle devrait nous permettre de simuler le trafic dans les zones d’embouteillage en ville et ensuite de donner une mesure sur la pollution de l’air dans ces zones. A priori, pour la réalisation de ce projet tout en poursuivant les objectifs précédemment définis, nous soulevons les quelques contraintes d’ordres théoriques que pratiques.

#### 3.1 Problèmes théoriques

Les contraintes d’ordre théorique sont entre autre :

1. Les manques de connaissances sur le domaine de la pollution ainsi que les différentes étapes qui la composent ;
2. Les principes de fonctionnement sur les modèles de dispersions ;



3. Les spécifications du modèle à implémenter ;
4. La spécification des paramètres d'entrées et sorties du modèle ;
5. Les concepts de modélisation et de simulation ;

### 3.2 Problèmes pratiques

1. La mise en place un environnement de simulation sur une répartition spatiale ;
2. La création des différents agents de pollution avec des quantités de pollution différentes ;
3. La création des groupes de véhicules pour l'illustration des zones embouteillées ;
4. La création de l'ensemble des paramètres qui entrent en compte dans la génération des polluants ;
5. La simulation de la pollution provoquée par différents sortes de véhicules de trafic routier à savoir tous les engins qui fonctionnent à base d'essence, de gas-oil, et toute autre substances combustible ;
6. La prise en compte de la capacité de polluant dégagé par chaque engins en fonctions de la puissance de son moteur et de sa vétusté ;
7. La prise en compte de l'intensité ou du flux de la circulation en fonction des heures de la journée ;

## 4 Définition des termes et outils employés

Afin de mieux appréhender l'ensemble des concepts de notre sujet, il est primordiale que nous définissons certains mots qui seront utilisés par la suite de notre travail.

### 4.1 Mots clés

1. Simulation [3]

La simulation informatique, ou simulation numérique, est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film vidéo.

2. Pollution [4]

La pollution de l'air (ou pollution atmosphérique) est une altération de la qualité de l'air pouvant être caractérisée par des mesures de polluants chimiques, biologiques ou physiques gazeux, particulaires, radiologiques et parfois liquides présents dans l'air, ayant des conséquences préjudiciables à la santé humaine, aux êtres vivants, au climat, ou aux biens matériels.

3. Agent [5]

Un agent en SMA représente une entité physique ou virtuelle :

- mue par un ensemble de tendances (objectifs individuels, fonction de satisfaction ou de survie à optimiser) ;
- possède des ressources propres ;
- ne dispose que d’une représentation partielle (éventuellement aucune) de son environnement ;
- comportement tendant à satisfaire ses objectifs, en tenant compte de ses ressources et de ses compétences, et en fonction de sa perception, ses représentations et ses communications.

#### 4. Système multi-agents (SMA) [5]

Un système multi-agent (SMA) est un système composé d’un ensemble d’agents, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu’elle est, au moins partiellement, autonome. Ce peut être un processus, un robot, un être humain, etc. Bien vrai qu’il existe une diversité d’outils qui abordent les notions de trafic routiers, beaucoup d’entre eux restent limités. L’outil qui nous servira de mieux est l’outil de développement GAMA.

### 4.2 Outils nécessaires

Suivant les exigences du sujet, nous aurons à utiliser trois sortes d’outils/plateformes que sont :

- La plateforme de simulation GAMA : GAMA est une plateforme de simulation pour des systèmes multi-agents. Le modèle que nous aurons à proposer sera réalisé sous GAMA.
- OpenstreetMap : OpenstreetMap nous permettra d’extraire la carte routière de la ville de Hanoi.
- Un ordinateur : Pour l’ensemble du travail, l’usage d’un ordinateur PC avec des caractéristiques minimum sera obligatoire.

## 5 Résultats attendus

1. Résultats théoriques Théoriquement, à l’issue de ce travail nous pourrions espérer les résultats suivants :
  - Une évaluation qualitative de l’impact de la pollution sur la vie des habitants ;
  - Une évaluation qualitative de la pollution sur l’environnement ;
  - Une évaluation de la contribution de chaque type de véhicule sur la quantité de polluants dégagés ;
2. Résultats pratiques
  - Le modèle de simulation implémenté ;
  - Les résultats issus des différents scénarios ;
  - L’évaluation du modèle. Ces différents points levés ci-dessus entrent dans le cadre de notre analyse du sujet à proprement dit. Par la suite, notre travail consistera à faire

une étude panoramique sur les différents travaux qui ont fait l'objet de sur le même sujet ou des sujets similaires.

## 6 Conclusion

Cette première partie nous à permis de faire une étude analytique pour une meilleur compréhension du sujet. Cependant, tout travail de recherche necessite une exploitation du terrain dans le but de savoir les thématiques qui y sont déjà abordées. Cette étude qui est l'éude bibliographique sera la base sur laquelle s'appuiera toutes propositions que nous aurons à préconiser pour la résolution du problème posé.

## Deuxième partie

# Etat de l'art

## 1 Introduction

Tout sujet de recherche doit s'appuyer sur des bases existantes pour éviter des risques de redondances ou la reprise des travaux qui n'auront pas d'issus. Il est donc important pour nous d'effectuer une étude sur les travaux déjà réalisés sur notre sujet ou sur des sujets similaires. Comme énoncé dans la problématique, notre étude de l'art sera basée sur les travaux ayant fait part de la simulation du trafic routier à l'aide de systèmes multi-agent, des travaux ayant étudié les modèles d'émission de gaz issu des véhicules et de façon générale l'ensemble des modèles existant qui permettent d'étudier l'impact du trafic sur la pollution de l'air dans les milieux urbains. Pour ce faire, nous présenterons tout d'abord les principaux types de polluants émis par les véhicules, ensuite nous présenterons les modèles existants et pour finir, nous ferons une analyse critique de quelques travaux fondés sur le principe de ces modèles.

## 2 Les principaux polluants produit par le trafic routier [1]

La majeure partie de la pollution atmosphérique en milieu urbain est principalement due au trafic routier. Ainsi, nous pouvons distinguer différents types de polluants tels que :

- Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) ;
- Le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) ;
- Les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) ;
- L'ozone ( $\text{O}_3$ ) ;
- Le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) ;
- L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) ;
- Le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ;
- Les particules ( $\text{PM}_{10}$  et  $\text{PM}_{2,5}$ ) ;
- Composés Organiques Volatils (COV) .

En plus des polluants de nature gazeux, il existe des métaux qui sont émis par émission échappement ainsi que par émission non-échappement sous forme de particules (à l'exception du mercure qui est principalement sous forme gazeuse, mais émis en très faible quantité par les véhicules). Les métaux principaux impliqués dans la pollution automobile sont :

- Le plomb (Pb) ;
- Le cadmium (Cd)
- Le zinc (Zn)
- Les métaux fer (Fe), cuivre
- (Cu), antimoine (Sb), chrome (Cr), nickel (Ni), sélénium (Se), baryum (Ba), arsenic (As), mercure (Hg), etc., peuvent être produits par les émissions échappement, non-échappement et par suspension.

Dans les lignes qui suivent, nous présenterons les principaux modèles utilisés pour la modélisation de la dispersion des polluants issus du trafic routier en milieu urbain.

### **3 Les modèles de dispersion atmosphérique utilisés en milieu urbain**

Le milieu urbain est un endroit pas comme les autres en ce qui concerne les phénomènes de dispersion atmosphérique. En effet, le milieu urbain est soumis à une double contrainte. Il s'agit des contraintes morphologiques et des contraintes météorologiques. Les exigences de l'urbanisation rend complexe sa morphologie. Ainsi, les rues issues de l'urbanisation ou rues « canyon » sont constamment sous l'influence des bâtiments et toutes genres de constructions. Quant aux conditions météorologiques, elles sont elles aussi modifiées par la morphologie de la ville. Plus le milieu est dense, plus le vent circule très difficilement. Le vent en circulation dans la rue est donc soumis à ces transformations qui influencent sur la direction de ce dernier. Les polluants dégagés par les véhicules dans les rues sont à leur tour dispersés en fonction des conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, température,...) du milieu. De même, l'exposition de la population face à ces polluants varie d'un milieu à un autre. D'après une revue (Sortis et al., 2014) [6] des modèles utilisées pour simuler la dispersion des polluants en milieux urbains nous pouvons distinguer deux grands sortes de modèles à savoir les modèles paramétriques et les modèles computationnel des fluides dynamiques ou computational fluid dynamics (CFD). Ces modèles sont les suivants :

#### **3.1 Les modèles paramétriques**

##### **3.1.1 Les modèles de panache gaussien**

Les modèles paramétriques sont des modèles définis par des ensembles d'équations décrivant le champ de concentration tridimensionnel généré généralement par une source ponctuelle. Avec ces modèles, l'on suppose que les concentrations d'une source émettrice continue sont proportionnelles au taux d'émission, inversement proportionnel à la vitesse du vent, et que les concentrations moyennes de polluants dans le temps horizontalement et verticalement sont bien décrites par des distributions gaussiennes. De plus, ces modèles peuvent être utilisés pour calculer les concentrations de polluants dans les agglomérations urbaines et les autoroutes proches. Ce sont des modèle qui ne sont généralement applicables à la dispersion de à petite échelle. Néanmoins, dans certains cas, ils comprennent des modules spécialisés pour les canyons de rue. C'est le cas du modèle ADMS-Urban (Owen et al. 1999) [7], un modèle de dispersion d'échelle urbaine de deuxième génération qui comprend un module de canyon de rue intégré.

##### **3.1.2 Le modèle CALINE4**

Dernière version de modèle de dispersion des polluants de la série de CALINE (California LINE source dispersion modèle), il représente l'un des modèles les plus validés disponibles pour

l'évaluation de l'impact du trafic des véhicules sur la qualité de l'air routier. Le modèle utilise la théorie de panaches gaussiens pour simuler des polluants émis par une source de ligne. Ce modèle a été largement utilisé dans les applications scientifiques et techniques principalement concernant le développement et la gestion des routes.(Dhyani et al., 2013) [8]

### **3.1.3 Le modèle TNO et CAR**

Le modèle TNO est un modèle de type de panache gaussien qui décrit la dispersion des échappements de trafic (Eerens et al., 1993)[9]. Il est basé sur un vaste programme d'expériences sur les souffleries qui couvre un grand nombre de différentes configurations de rue, y compris les canyons urbains et les intersections. Quant au modèle CAR (ou CAR-International), c'est une version simplifiée du modèle TNO, dans laquelle seules les configurations de rue les plus représentatives ont été catégorisées (den Boeft et al., 1996)[10]. Pour chaque type de rue (p. Ex. Autoroute, route urbaine, etc.), une relation source- récepteur est spécifiée en fonction de la distance entre le récepteur et l'axe de la rue. Le CAR utilise la vitesse moyenne annuelle du vent et suppose qu'il n'y a pas de direction du vent. Ainsi, l'utilisateur obtient les mêmes moyennes annuelles et percentiles de chaque côté de la rue. Dans tous les cas, l'effet des arbres et des véhicules en mouvement sur la vitesse du vent au niveau de la rue est pris en compte. En 2015, ce modèle a été utilisé pour estimer la concentration de l'oxyde de nitrogène (Zhu et al., 2015)[11].

### **3.1.4 STREET-SRI**

C'est sont des modèles de diffusions urbaines polyvalents pour les polluants inertes. Il est la dérivée d'un modèle en boîte ainsi que des hypothèses simplifiées concernant la dispersion initiale et la turbulence induite par les véhicules de Johnson et al. (1973). Par exemple, c'est un modèle qui se repose sur l'hypothèse que les concentrations de polluants sur le bord de la route se composent de deux composants, de la concentration d'arrière-plan urbain et de la composante concentration en raison des émissions des véhicules générées dans la rue spécifique. Ensuite, il calcule les concentrations de polluants des deux côtés de la rue, en tenant compte de la hauteur et de la distance du récepteur simulé du bordure. Sur le côté sous le vent du canyon, on suppose que les concentrations sont inversement proportionnelles à la distance entre la source de la ligne et le point du récepteur.

### **3.1.5 Le modèle CPBM (Canyon Plume Box Model)**

Le modèle CPBM (Yamartino et Wiegand, 1986) [12] fonctionne à partir de la combinaison de deux autres modèles à savoir le modèle de panache gaussien et le modèle en boîte. Le modèle de panache gaussien est utilisé pour évaluer l'impact direct des polluants émis dans la rue, et le modèle de boîte permet d'évaluer l'impact supplémentaire des polluants piégés dans le vortex du vent formé à l'intérieur du canyon. Il permet de prendre en compte les conditions météorologiques telles que les variations de vitesse et des directions du vent.

### 3.1.6 OSPM et AEOLIUS

AEOLIUS (Buckland, 1998)[13] est un modèle basé sur des concepts et des techniques précédemment utilisés pour le développement du modèle opérationnel de pollution des rues qui a été élaboré à partir du CPBM. AEOLIUS est un modèle semi-empirique qui calcule les concentrations de gaz d'échappement des deux côtés d'un canyon en supposant trois contributions différentes à savoir la contribution du flux direct de polluants de la source au récepteur, la recirculation en raison du flux de polluants autour du vortex généré dans la zone de recirculation du canyon, et de la contribution de fond urbain. Un algorithme de panache gaussien est utilisé pour calculer la contribution directe et un modèle de boîte simple pour dériver le composant de recirculation. L'ensemble de ces deux modèles traitent les problèmes issus de la météorologie. Mais néanmoins, ils possèdent des divergences en ce qui concerne la prédiction en raison des différences de codage, de paramétrage et de prétraitement des données. Deux autres variantes de d'AEOLIUS existent : AEOLIUS Screen et AEOLIUSQ Emission mises à disposition par U.K Met Office.

### 3.1.7 Les modèles récepteurs

Les modèles décrits dans les sections précédentes peuvent également être définis comme des modèles orientés source. De tels modèles s'appuient sur l'utilisation des meilleures estimations d'émissions disponibles et des données météorologiques pour prédire les concentrations de polluants à divers endroits. Une approche alternative est la modélisation axée sur le récepteur, qui repose sur l'analyse détaillée du polluant collecté dans un ou plusieurs sites de surveillance. Cette analyse, également appelée répartition de source ou masse chimique (Gordon et al., 1984)[14], tente de déterminer quelles sources ont contribué à la concentration mesurée au point du récepteur.

## 3.2 Les modèles computationnels de fluides dynamiques (CFD)

La modélisation de la dynamique des fluides computationnels (CFD) est un terme général utilisé pour décrire l'analyse des systèmes impliquant le flux de fluide, le transfert de chaleur et les phénomènes associés (par exemple, les réactions chimiques) au moyen d'un système informatique sophistiqué de méthodes numériques. Ce qui distingue les CFD des autres modèles, c'est leur capacité à faire face à des murs de forme très complexes et à d'autres conditions aux limites (par exemple dans le domaine de l'avion et de l'automobile) à l'aide de grilles flexibles à échelle fine. En outre, ils comprennent un Traitement plus sophistiqué de la turbulence, ce qui les rend adapté aux petites applications de dispersion des polluants. C'est une puissante technique de modélisation couvrant une large gamme d'applications industrielles et plus récemment environnementales et biomédicales (Gosman, 1999 ) [15].

## 4 Analyse critique de quelques travaux

Plusieurs sujets ont fait l'objet de discussions sur la modélisation de la pollution produite par le trafic routier. Parmi ces sujets, nous pouvons noter le travail (Berkowiz et al., 97) [16]

qui avait pour but de modéliser la pollution atmosphérique issu du trafic routier à la hauteur d'une rue. Dans la ville de Dijon, Justin Emery et ses collaborateurs ([17] [18]) ont effectué une simulation du trafic routier à base de système multi-agents dans le but d'évaluer la pollution atmosphérique automobile (PAA) à partir des données recueillies sur le trafic à l'aide de capteurs placés au long de la circulation, d'où le nom du modèle SCAUP (Simulation multi-agents à partir de CAPteurs Urbains pour la Pollution atmosphérique automobile). Pour la réalisation de ce projet, deux catégories de modèles ont été retenus, à savoir le modèle macroscopique et le modèle microscopique. Dans l'article de (Khalesian et al., 2008) [19] une approche de micro-simulation de trafic multi-agent basée sur le SIG pour déterminer la pollution atmosphérique, en particulier le CO, générée par les congestions (embouteillages) le long d'une rue dans la ville de Téhéran a été effectuée par M. khalesian, P. Pahlavani, M. R. Delavar à travers l'approche semi-empirique proposée par Gualtieri et Tartaglia (1998) [20]. Dans le but de pouvoir évaluer et de prédire la dispersion de la pollution atmosphérique dans la ville Delhi en Inde, une étude a été réalisée par Kumar et al., 2015 [21] à l'aide du système d'information géographique (SIG) qui est un puissant outil pour rendre les méthodes plus efficaces et plus flexibles, et d'un système de simulation d'interface géographique. L'étude a montré que dans cette ville, une grande partie de la pollution est due au trafic routier, soit 72 % contre 20 % au regard du secteur industriel. La pollution affecte scrupuleusement la santé de la population locales et des zones environnantes. Pour évaluer cet impact dans la région de Baie à San Francisco, une équipe de chercheurs (Samaranayak et al, 2014) [22] ont mis en place une nouvelle méthode qui permet d'estimer la pollution atmosphérique en modélisant l'état de la circulation, la pollution induite par le trafic et la dispersion des polluants le long d'une autoroute en temps réel. Dans ce modèle, chaque direction de l'autoroute est représentée comme un ensemble de rectangles planaires ("segments"), et chaque rectangle 2-D est remplacé par un nombre limité de lignes unidimensionnelles orientées perpendiculairement par rapport au vent dominant (lignes fines). Masoud Fallah Shorshani [23], au cours de sa thèse de doctorat a développé lors de son étude une évaluation sur la faisabilité et la pertinence d'une chaîne de modèle en vue de simuler l'impact du trafic routier sur la pollution de l'air et des eaux de ruissellement en prenant en compte le trafic, les émissions des véhicules, les processus de transport et de transformation atmosphériques, les dépôts atmosphériques sur les bassins versants et les processus de lessivage et de transport par les eaux de ruissellement. Au cours de son étude, il a fait cas de deux modèles, l'un statique avec des pas de temps horaires et l'autre dynamique pour le trafic et les polluants associés.

Nous retenons qu'il existe un bon nombre de modèles mais chacun de ces modèles est adapté à des conditions particulières avec ses avantages et ses inconvénients. Les critères les plus discriminants se reposent sur l'espace géographique à modéliser et aussi les données disponibles. Pour notre cas ci-présent, à partir des différentes analyses que nous avons effectuées, plusieurs outils de simulation sont à notre disposition. Nous avons par exemple MATSim, NETLogo, ou GAMA qui nous offrent de grands avantages en ce qui concerne l'intégration des données avec le système d'information géographique (SIG). Quant au modèle de dispersion de la pollution atmosphérique, nous ferons recours à des modèles qui abordent la simulation dans des zones géographiques bien précises. Nous avons entre autre le modèle de la rue en forme de Canyon utilisé dans [4], le modèle



Articles	Modèles	Données utilisées	Forces	Limites
[16]	Operational Street Pollution Model (OSPM)	-Données météorologiques - Données sur le flux du trafic	- Prise en compte des conditions météorologiques - Prise en compte de l'influence du vent - Supporte une large gamme de conditions	-Devient inefficace face à de fortes variations de flux du vent - Limité aux zones géographiques restreintes
[17] [18]	- Méthodes macroscopique et microscopique - Plateforme GAMA	Données issues de 210 capteurs - Nombre de véhicule ; - Vitesse moyenne ;	- Prise en compte de la dimension spatio-temporelle du trafic (usage des capteurs) ; - Couverture à grande échelle	- Nécessite un grand nombre de données (déplacement, localisation) - Non prise en compte des variations temporelles (statique) - Prise en compte unique des artères caractéristiques. - Temps de calcul élevé - Prétraitement obligatoire des données
[20]	-Modèle à plume Gaussien et Réseau de Neurones (GPM and ANN)	-Données météorologiques issus de deux années (1re année pour apprentissage et 2e année pour test)	- Prise en compte des sources incontrôlées - Prise en compte de paramètres climatiques (Vitesse du vent, Température, Humidité) - Bonne prédiction : apprentissage supervisé avec réseaux de neurones - Zone à grande échelle	-Nombre limité de polluants pris en compte (PM10,SOx,NOx)
[19]	-Modèle de Gualtieri et Tartaglia -Plateforme utilisée : ArcGIS	-Nombre de véhicules -Vitesse de véhicule	- Direction et vitesse du vent - Rayonnement solaire - Température de l'air - Hauteur des bâtiments	- Utilisé uniquement pour le CO (non-applicable pour des polluants impliquant des produits chimiques dans le processus de dispersion)
[21]	- Modèle de dispersion de plume Gaussien (Gaussian plume dispersion model) à travers les coefficients d'émission, et le volume du trafic ; - Plateforme utilisée : Geomatica10	- Données de comptage routier (nombre de véhicule) - Données météorologiques	- Implémentation avec SIG - Flexible - Performant - Application à grande échelle	- Requiert beaucoup de données - Interprétation complexe des données issues des observations satellitaires

[22]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modèle de dispersion Gaussienne (modèle parallèle à CALINE3 [3] mais permet de calculer les concentrations dans de petits espaces)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nombre de véhicules et leur vitesse moyenne</li> <li>- Données météorologiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement pour des mesures sur intersections</li> <li>- Modélisation en temps réel</li> <li>- Intégration du modèle de trafic, conditions météorologiques, et modèles d'émissions</li> <li>- Système réutilisable pour d'autres sources d'informations sur la pollution</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins efficace pour des fortes variations des conditions météorologiques</li> <li>- Favorable pour des polluants non-réactifs</li> </ul>
[23]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modèle en boîte</li> <li>- Modèle de panache Gaussien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données de trafic</li> <li>- Données issues de la consommation de carburant</li> <li>- 26 polluants</li> <li>- Matrice origine-destination (O/D)</li> <li>- Types de véhicules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleur suivi des véhicules dans le réseau à chaque instantané</li> <li>- Prise en compte d'un grand nombre de polluants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taux d'erreur élevé en cas de fortes variations des conditions météorologiques</li> <li>- Sous-estimation de certains polluants comme le NO2 sur de faibles distances</li> <li>- Pas de prise en compte des infrastructures dans la dispersion des polluants (panache Gaussien)</li> </ul>

TABLE 1 – Tableau comparatif de quelques travaux existants

parallèle CALINE3 développé dans l'article [22], du modèle de plume Gaussien ou peut être bien d'autres que nous pourrions rencontrer dans nos futures lectures compte tenu que notre liste est loin d'être exhaustive.

## 5 Conclusion

L'étude bibliographique que nous avons menée autour du sujet nous a permis de faire ressortir des cas d'études presque similaires c-à-d qui ont abordés les contours du sujet. La solution que nous allons proposer s'atellera autour des solutions existantes auxquelles nous adapterons pour la prise en compte des exigences du sujet.

## Troisième partie

# Proposition de solution

Comme le précise AIRPARIF [24] « chaque portion de voirie représente un cas particulier en terme de caractérisation de la qualité de l'air et il est donc illusoire de vouloir caractériser de manière exhaustive la qualité de l'air à proximité du trafic automobile, uniquement par les techniques de surveillance classiques (mise en place de capteurs permanents, utilisation de camions-laboratoires, campagnes à tubes de diffusion) », ce qui signifie qu'il est très difficile de connaître les expositions réelles de chaque citoyen. La modélisation nécessite donc une étude minutieuse au niveau spatio-temporel. Après avoir effectué une étude sur les modèles de dispersion des polluants, cette partie de notre travail se consacre à la proposition d'une éventuelle solution qui nous permettra de réaliser notre projet. Dans les lignes qui suivent, nous ferons une présentation suivie d'une discussion du modèle proposé, et nous terminerons par la phase de réalisation notre du modèle.

## 1 Modèle proposé

### 1.1 Description générale du modèle

L'objectif principal de notre travail est de mettre en œuvre un modèle qui nous permettra de simuler à base d'agents la pollution atmosphérique dans la ville de HANOÏ surtout dans les zones à fort trafic. Notre modèle devrait donc tenir compte de la dimension géographique à évaluer, les contraintes environnementaux (buildings, arbres...), les contraintes météorologiques (vent, l'humidité...), les types de polluants émis par le trafic routier et tout autres phénomènes pouvant influencer la dispersion des polluants dans l'air. Compte tenu des différents facteurs précités, et compte tenu des modèles existant, nous avons choisi de mettre en place un modèle similaire à ceux utilisés pour simuler les niveaux de polluants le long des rues. Il s'agit du Operational Street Pollution Model (OSPM) [25]. Le modèle OSPM est un modèle pratique de pollution des rues sous forme de canyon [26], développé par le Département des sciences de l'environnement de l'Université d'Aarhus en 1989 et a connu d'énormes évolutions au cours des années (Kakosimos et al., 2010) [27]. Les concentrations de gaz d'échappement sont calculées à l'aide d'une combinaison de deux modèles (Berkowicz et al., 2000) [28] : le modèle de panache et le modèle en boîte. Le modèle de panache permet de calculer la contribution directe du vent sur l'expansion des polluants. A ce niveau, avec ce modèle, on suppose que le trafic et les émissions sont uniformément repartis sur l'ensemble de la rue. Le champ d'émission est traité comme un nombre de sources de lignes infinitésimales alignés perpendiculairement à la direction du vent au niveau de la rue. Le modèle OSPM ne prend pas en compte le vent en diffusion croisé. La direction du vent au niveau de la rue est supposé être réfléchi par rapport au vent au niveau des toits. Le modèle de boîte est utilisé pour estimer la contribution du vent recyclé ou tourbillonné. La mise en place du modèle OSPM est composée d'un ensemble de calculs pour la prise en compte des différentes conditions et paramètres qui entrent dans la modélisation de la dispersion des

polluants [16]. Nous avons tout d’abord la contribution directe qui est la pollution directement engendrée par le trafic sans transport ou de contraintes ; deuxièmement nous avons la contribution de recyclage du vent dans la rue ; troisièmement nous la dispersion due à la vitesse du vent à l’intérieur de la rue ou du canyon ; quatrièmement nous avons la dispersion provoquée par la turbulence issue même des véhicules, et enfin nous avons la dispersion provoquée par la direction (valeur moyenne) du vent le long de la rue. Le modèle OSPM permet de calculer la concentration horaire de la pollution atmosphérique le long d’une rue. Pour obtenir cette concentration horaire, nous devons disposer des informations du trafic routier, de la météorologie et de la concentration des polluants que nous désirons évaluer l’impact. En nous référant à l’article (Raducan, G .M, 2008) [29], les principales hypothèses du modèle peuvent être résumées comme suit :

- L’ensemble des émissions sont supposées être homogènes le long de la rue ;
- Lorsque le vent souffle perpendiculairement par rapport à l’axe de la rue, un vortex se forme ;
- Le côté en contre vent ou en amont reçoit une contribution directe du trafic et une partie des polluants en recirculation à l’intérieur de la rue ;
- Le coté en aval reçoit principalement la contribution des composantes en recirculation ;
- La concentration des polluants aux deux côtés de la rue est supposée équivalente lorsque le vent souffle est nulle ou souffle parallèlement par rapport à la rue ;
- La contribution directe est calculée en utilisant un modèle de panache gaussien en supposant que les polluants se dispersent de façon linéaire avec la distance du panache ;
- Le vent en recirculation est décrit en utilisant un modèle en boîte ;
- Le modèle OSPM permet de modéliser la turbulence dans la rue en supposant qu’elle se compose de deux parties : la turbulence ambiante (dépend de la vitesse du vent) et la turbulence induite par le trafic (ce qui est important lorsque la vitesse du vent est faible). En plus, OSPM est un modèle qui intègre une photochimie simple impliquant le monoxyde d’azote (NO), le dioxyde d’azote (NO<sub>2</sub>) et le O<sub>3</sub> ( $\text{NO} + \text{O}_3 \rightleftharpoons \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ).

Ainsi, nous pouvons illustrer le modèle comme présenté à la figure 2

## 1.2 Apports

Les points suivants font appel aux différentes contributions que nous proposons à intégrer dans le modèle choisi afin de pouvoir envisager d’autres perspectives sur l’impact de la pollution sur l’environnement et les habitants de façon générale.

Premièrement, en plus d’utiliser ce modèle pour la réalisation de notre projet, nous ajoutons d’autres paramètres que sont la pluie et les arbres en plus de la présence des bâtiments. En effet, dans notre cas précis, il s’agit bien des phénomènes naturels qui existent et qui influence fortement sur la dispersion des polluants. Notre objectif serait donc de montrer l’impact de ces obstacles naturels sur la dispersion des polluants dans l’air.

Dans le second point, l’idée est de pouvoir quantifier la charge des polluants en suspension sur l’entourage de la rue afin de pouvoir évaluer leurs impact sur la santé des habitants. En effet, l’ensemble des polluants émis par le trafic routier après dispersion c.-à-d., après modification

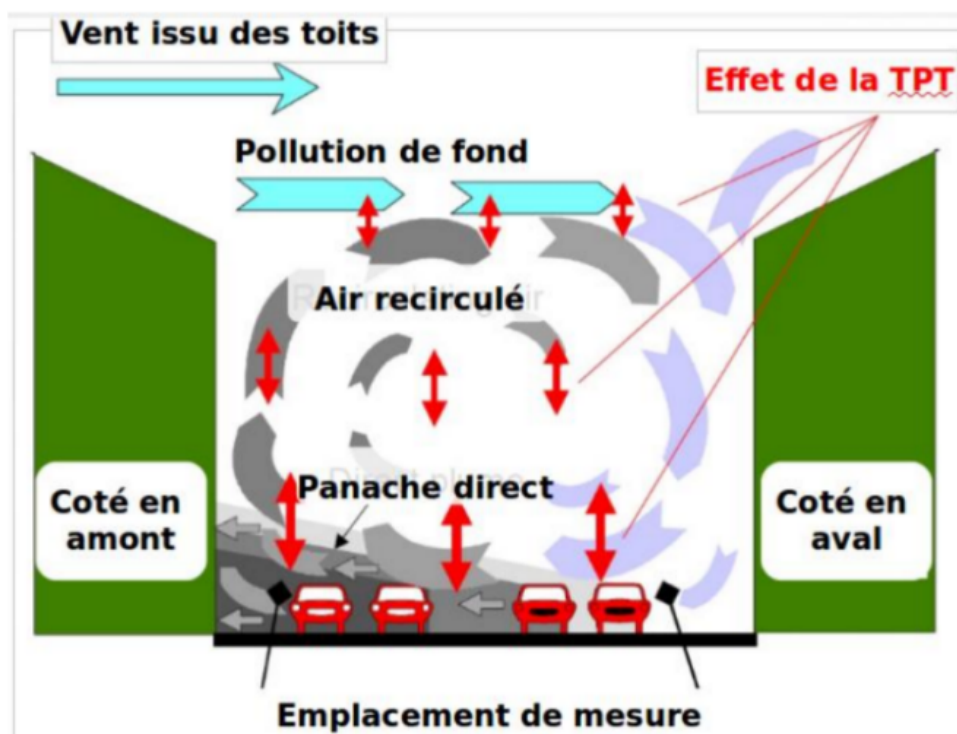


FIGURE 2 – Schéma du modèle OSPM

[30]

par la morphologie urbaine et par les conditions météorologiques subissent un phénomène appelé l'immission. C'est cette masse en suspension qui est perçue par la population environnante.

Pour ce faire, nous nous basons sur l'une des approches évoquées par Gilles MAIGNANT [31]. Il s'agit de la méthode fractale. C'est une méthode qui consiste à considérer la morphologie urbaine comme un objet fractal. Par définition, un objet est dit fractal lorsqu'il présente des irrégularités à toutes les échelles et possède une similarité structurelle c.-à-d., qu'il possède la même forme de loin comme de près. Plusieurs approches permettent de calculer les dimensions fractales mais dans le cas présent nous utilisons la nouvelle interprétation des dimensions fractales décrite par l'auteur. Le principe est de considérer la suspension des amants d'air en surface comme une déformation de contraste que subit la surface environnante. Pour cela, considérons une feuille blanche quadrillée que l'on noircit progressivement. Par la suite, on effectue le rapport du nombre de carrés noircis sur le nombre de carrés laissés blancs. Par exemple, si nous disposons d'un papier de 24 carrés initialement blancs, et qu'à un instant  $t$ , on se retrouve avec 3 carrés noircis donc un reste de 21 carrés blancs, la contraste sera  $3/(24-3)=0.33$ . Le contraste est donc mesuré comme le rapport entre la surface tachée qui représente les amants de polluants et la surface laissée blanche qui correspond aux zones non affectées ou moins polluées. Le maximum du contraste est atteint lorsque la moitié de la surface quadrillée est tachée et vaut 1. Si l'on continue à tacher, le contraste diminue puisque la surface de la feuille devient de plus en plus noire donc tant à être homogène. Nous pouvons continuer à calculer mais en faisant cette fois-ci le rapport entre la surface encore laissée blanche et la surface déjà noire. Ainsi, nous remplissons la

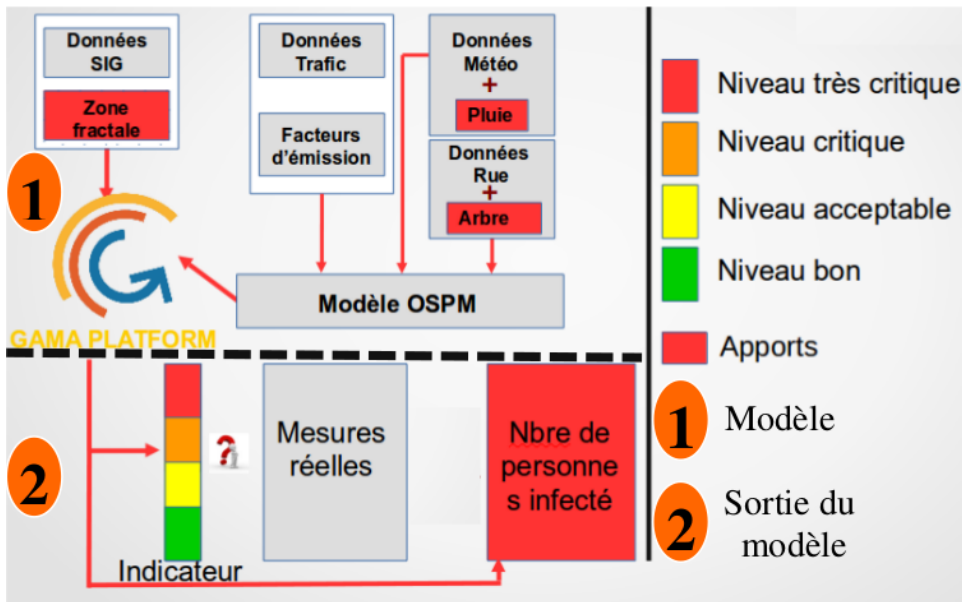


FIGURE 3 – Schéma du modèle proposé

feuille de couleur noire dans son entièreté équivalent ainsi la zone d'étude uniformément répartie en termes de quantité de polluants. Ces apports nous permettrons d'obtenir en sortie :

- La contribution de la pluie et des arbres sur la dispersion des polluants en plus des autres contraintes cités ci-dessus.
- L'application de la méthode fractale nous permettra d'avoir une vue globale des polluants en suspension hors du canyon et de pouvoir quantifier cette masse au-dessus des habitations.

### 1.3 Les paramètres du modèle

#### 1.3.1 Les conditions météorologiques

Les paramètres météorologiques requis comme entrée par l'OSPM sont la vitesse du vent et sa direction, la température de l'air et le rayonnement solaire global. Cependant, ce modèle exige que la vitesse du vent et la direction correspondent aux conditions d'écoulement au-dessus du canyon de la rue, alors que la température et les rayonnements solaires devraient correspondre à la moyenne dans toutes les conditions dans le canyon de la rue.

#### 1.3.2 Les données de trafic

Les données du trafic sont d'une grande importance dans l'opération que nous désirons effectuer.

Le modèle OSPM utilise les données de trafic que sont essentiellement le nombre de véhicules, la catégorie du véhicule, la vitesse du véhicule, le type de combustible utilisé, la hauteur des bâtiments et aussi la largeur de la rue. Dans la pratique, ces données peuvent être recueillies

sur un intervalle de temps donné et de façon respective à base de capteurs ou des caméras de comptage.

## 1.4 Pourquoi ce modèle ?

En rappel, il est question pour nous de simuler à base d'agents (SMA) le niveau de pollution en provenance des différents polluants émis par le trafic routier notamment en relation avec les véhicules et les motos. Le modèle de rue OSPM que nous avons choisi est un modèle semi- empirique permettant de calculer et d'évaluer le niveau de polluants dégagés dans une zone géographique bien précise. En effet, il est appliqué dans des endroits où la dispersion de la pollution est influencée par plusieurs phénomènes surtout les maisons de grandes taille (buildings), et les arbres. Sous l'emprise de la vitesse et de la direction du vent, la dispersion est fortement variée et est donc différente d'un milieu à un autre. Ce modèle a été utilisé dans divers travaux [[16], (HUNG en 2010) [32] [33] [21] (Vardoulakis et al., 2007)[34] ; (Lazić et al.,2016)[35] dans de contextes similaires et a donné de meilleurs résultats. En plus de ces travaux, pour notre cas précis, après avoir analysé le contexte de notre travail, plusieurs raisons nous poussent à choisir le modèle cité.

### 1.4.1 Le contexte

Notre travail consistera à simuler le niveau de pollution dans des zones congestionnées ou des zones à fort trafic. Ces zones se caractérisent essentiellement par : un nombre élevé de véhicules et une vitesse de déplacement relativement faible sur l'ensemble de la voie. L'ensemble de ces caractéristiques induisent à ce que nous appelons la congestion de trafic. La congestion d'un réseau routier est la condition dans laquelle une augmentation du trafic de véhicules provoque un ralentissement global de celui-ci. Ce terme désigne la dégradation de la qualité de service quand le nombre d'utilisateurs augmente. La congestion se caractérise par l'apparition de retards, voire de goulets d'étranglement en période de fort trafic, c'est-à-dire quand la capacité de l'infrastructure devient insuffisante pour réguler les flux. La congestion est un phénomène temporaire (par exemple aux heures de pointe) et localement observable.

### 1.4.2 La morphologie urbaine

La configuration géographique joue un rôle très important dans l'expansion ou à la dispersion des polluants dans un endroit donné. En effet, dans la majorité des villes comme celle de Hanoï, les rues sont entourées par de grandes constructions à niveau et/ou des arbres. Sous l'influence du vent, ces obstacles interagissent très fortement dans la dispersion des polluants et cela constitue donc un problème majeur à prendre en compte lors de l'évaluation du niveau des polluants.

## 2 Approche SMA (Système Multi-agent)

Le SMA comme son nom l'indique est une approche qui nous permet de simuler des réalités de la vie quotidienne afin de pouvoir apercevoir leurs impacts ou leurs modes de fonctionnement.



Dans notre cas, le milieu d'interaction représente la rue sur laquelle les véhicules se déplacent. Quant aux agents, ils représentent tout ce qui entre dans la constitution de l'ensemble de notre modèle. Chaque agent possède ses caractéristiques propres à lui. Nous pouvons en distinguer (02) types : les agents fixes et les agents mobiles.

## 2.1 Les agents fixes

- les bâtiments : un bâtiment est caractérisé par sa hauteur, et sa distance par rapport à la voie.
- les feux tricolores : ils définissent l'ordre de passage des véhicules dans les intersections.
- les arbres : chaque arbre peut être défini par sa hauteur et par la distance qui lui sépare de la voie.
- l'objet fractal : il permet de définir le niveau de pollution en fonction de l'altitude (distance par rapport à la terre).

## 2.2 Les agents mobiles

- les véhicules : chaque véhicule se caractérise par sa catégorie (personnel, transport en commun et les véhicules de transport), le type de carburant qu'il utilise (essence, diesel, gazole) et son facteur d'émission
- le vent : le vent intervient dans le transport des polluants et se caractérise par sa vitesse et sa direction.
- les polluants : un polluant est déterminé par sa teneur ou sa quantité émise par les véhicules (individuelle ou collective). Il s'agit éventuellement des polluants reconnus comme étant très nocifs pour la santé de la population. Parmi ces polluants, nous avons le PM2.5 et PM10, le NOx, le CO, et le NO2 ;
- la pluie : la présence de pluie défavorise une dispersion des polluants ;
- les habitants : ces derniers subissent sous toute forme de maladies issues des polluants.

# 3 La phase de réalisation

Dans cette partie, il est question pour nous de définir les outils et les données nécessaires pour la réalisation de notre modèle.

## 3.1 Plateforme et outils nécessaires

Le cas de notre sujet exige un des outils qui intègre les caractéristiques et les performances nécessaires pour prendre en compte les critères et les exigences de notre modèle. Il existe plusieurs plateformes de simulations auxquelles nous pouvons faire recours. Cependant, elles n'ont pas toutes les mêmes caractéristiques et aussi leur portabilité varie d'une à l'autre. Dans ce travail, nous choisissons la plateforme de simulation multi-agents GAMA qui est de nos jours l'une des plateformes la plus utilisée et la plus portable due à ces caractéristiques. GAMA intègre de grandes capacités en ce qui concerne l'utilisation des données des systèmes d'informations

Activités	Durée
Prise en main de GAMA	4 semaines
Conception	3 semaines
Implémentation	6 semaines
Test	1 semaine
Analyses	1 semaine
Validation	1 semaine
Rédaction	2 semaines

TABLE 2 – *Tableau de planification*

géographiques (SIG) qui est l'un des besoin primordiale pour l'importation des données sur les rues que nous allons utiliser. Le langage de programmation que nous allons utiliser est le GAML qui est le langage de la plateforme GAMA.

### 3.2 Les données nécessaires

Les données dont nous avons besoin sont des données réelles à recueillir sur les lieux de notre travail. Elles nous serviront d'évaluer notre modèle à titre comparatif avec les résultats que nous allons obtenir à la fin de la mise en œuvre de notre solution. Comme cité ci-dessus, il s'agit des données météorologiques, des données de trafic, certaines informations sur la rue en question (largeur, hauteur de bâtiments et des arbres) et en fin des mesures sur les niveaux de polluants que nous allons simuler. Les données sur les niveaux de polluants peuvent être obtenues en faisant des mesures régulières sur la rue à étudier à base d'appareil de mesure.

### 3.3 Les contraintes à prévoir

Plusieurs défis sont à relever dans ce projet et des contraintes n'en manqueront pas. L'un des principales contraintes est le temps dans lequel nous sommes tenu à réaliser le projet. La deuxième contrainte est l'obtention des données réelles, prises dans de bonnes conditions et qui refléteront des mesures exactes. Pour le moment, nous envisageons collecter des données publiées sur le site de la météorologie de Hanoï, ou de faire des mesures régulières du niveau de pollution à l'aide de l'apparition mobile AQI qui donne le niveau de la pollution de l'air en temps réel'. En fin, nous avons la non maîtrise des outils que nous avons choisi pour la mise en œuvre du projet. Ainsi, nous définissons notre modèle à travers le schéma de principe ci-dessous :

## 4 Plannification

Pour la réalisation de ce projet, nous avons organisé les différentes tâches comme indiqué dans le tableau 2.

## 5 Conclusion

A ce stade de notre travail, nous avons eu à effectuer tout d'abord une analyse de notre sujet qui nous a permis de mieux appréhender les contours et les pourtours de ce dernier. Ensuite, nous avons effectué une étude sur les différents travaux qui ont traités le même problème ou des situations semblables afin de connaître l'existant. Pour finir, nous avons proposé notre modèle qui est basé sur l'un des travaux existant qui est le modèle OSPM que nous estimons meilleur pour la réalisation du projet. Rappelons que ce choix a été guidé entre autre par sa fréquence d'utilisation, la disponibilité de sa documentation, ses meilleures performances et de son adaptabilité. Ainsi met fin à la phase théorique de notre projet. La suite de notre travail sera consacrée à sa mise en œuvre et aux analyses des différents résultats que nous aurons en fin de simulations.

Attributs	Activités
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Les coordonnées (x,y)</li> <li>— La taille</li> <li>— La couleur</li> <li>— La vitesse</li> <li>— Le type</li> <li>— Le facteur d'émission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Se déplacer (accélérer, ralentir)</li> <li>— Produire des polluants</li> <li>— S'arrêter</li> </ul>

TABLE 3 – *Caractéristiques de véhicule*

## Quatrième partie

# Mise en place de la solution proposée

## 1 Modélisation du modèle proposé

La modélisation est la phase dans laquelle nous présentons le modèle proposé avec l'ensemble de ses entrées et sorties. Etant un modèle de simulation multi-agents, notre modèle se compose principalement des différents agents et leur comportements, du diagramme de classe UML qui présente les liaisons entre les agents et enfin nous présentons une illustration schématique du modèle.

### 1.1 Extraction des agents du modèle proposé

Le modèle que nous proposons comprend neuf agents que sont :vehicule, vent, pluie, habitant, indicateur,polluant, arbre. Les détails sur chaque agent sont illustrés dans les tableaux suivants.

#### 1. Agent véhicule ( tableau 3)

Les véhicules sont des agents mobiles qui se déplacent le long de la rue. Il existe plusieurs sortes de véhicules dans la ville de Hanoï. Nous distinguons les voitures, les cyclomoteurs, les transports en communs, et les véhicules de transports. Les véhicules se déplacent chacun avec sa vitesse tout en respectant une certaine distance entre eux. Ils génèrent de des polluants au fur et à mesure qu'ils se déplacent. Cependant, le type et la quantité de gaz généré dépend du facteur d'émission de ce dernier. Nous tenons compte des heures aux quelles les habitants se déplacent moins et les heures aux quelles la circulation est plus dense. Les cas de congestion seront pris en compte aux heures de pointe.

20

#### 2. Agent polluant ( tableau 4)

Les polluants sont les gaz générés par les véhicules. Ils sont de diverses natures. Nous distinguons entre autre le CO2, le NO2, PM2.5, le PM10, etc. Plus le nombre de véhicule augmente, plus la quantité des polluants aussi augmentent. En plus du nombre de véhicule, nous avons aussi leur vitesse moyenne. En effet, lorsque nous observons un état de

Attributs	Activités
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Les coordonnées (x,y,z)</li> <li>— La taille</li> <li>— La couleur</li> <li>— La vitesse</li> <li>— Le type</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Se disperser</li> <li>— Suivre la trajectoire du vent</li> <li>— Disparaître</li> </ul>

TABLE 4 – *Caractéristiques de polluant*

Attributs	Activités
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Les coordonnées (x,y,z)</li> <li>— La taille</li> <li>— La couleur</li> <li>— La vitesse</li> <li>— L'intensité</li> <li>— La direction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Se déplacer</li> <li>— Suivre la direction</li> <li>— Disparaître</li> </ul>

TABLE 5 – *Caractéristiques de vent*

congestion, la vitesse moyenne des véhicules diminue considérablement provoquant ainsi une forte concentration dans le dit milieu.

### 3. Agent vent (tableau 5)

Le vent est un agent qui agit sur la dispersion des polluants en fonction de sa vitesse de déplacement et de sa direction. Plus il est de forte intensité plus la dispersion se fait de plus en plus rapide.

### 4. Agent arbre (tableau 6)

Les arbres sont placés le long de la rue. Ils interviennent dans la limitation ou en l'atténuation de la dispersion des polluants et aussi dans les transformations chimiques que subissent certains polluants ( $\text{NO} + \text{O}_3 \rightleftharpoons \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ). Dans notre cas précis, nous considérons les arbres avec des feuilles. La réduction de la pollution dans les rues canyons est bien moins importantes que leur contributions dans son élévation.

### 5. Agent pluie (tableau 7)

Attributs	Activités
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Les coordonnées (x,y)</li> <li>— La taille</li> <li>— La couleur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Empêcher la dispersion des polluants</li> <li>— Produire le phénomène de réaction chimique</li> </ul>

TABLE 6 – *Caractéristiques de arbre*

Attributs	Activités
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Les coordonnées (x,y,z)</li> <li>— La taille</li> <li>— La couleur</li> <li>— La vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Se déplacer</li> <li>— Contribuer à la diminution et à la dispersion des polluants</li> </ul>

TABLE 7 – *Caractéristiques de pluie*

Attributs	Activités
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Les coordonnées (x,y)</li> <li>— La taille</li> <li>— La couleur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Changer de couleur</li> </ul>

TABLE 8 – *Caractéristiques de indicateur*

La pluie comme le vent agit sur la dispersion des polluants. Elle permet d'atténuer la vitesse de dispersion des polluants. En présence de pluie, les polluants sont atténués vers le sol.

6. Agent indicateur (tableau 8) Les indicateurs de niveau sont des indicateurs couleur servant à suivre l'évolution du niveau de pollution d'un polluant.
7. Agent habitant (tableau 9)

Les habitants sont situés les uns des autres dans l'environnement aux cotés de la rue. Ces derniers subissent les conséquences des polluants dégagés par les véhicules. Plus un habitant est proche de la rue, plus il est exposé aux diverses polluants et subit des infections à cet effet.

## 1.2 Diagramme de classe du modèle proposé

Le diagramme de classe UML (figure 4) modélise les interactions des agents précités.

Attributs	Activités
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Les coordonnées (x,y)</li> <li>— La taille</li> <li>— La couleur</li> <li>— La vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Se déplacer aléatoire</li> <li>— Changer de couleur en fonction de leur état (sain ou infecté)</li> </ul>

TABLE 9 – *Caractéristiques de habitant*

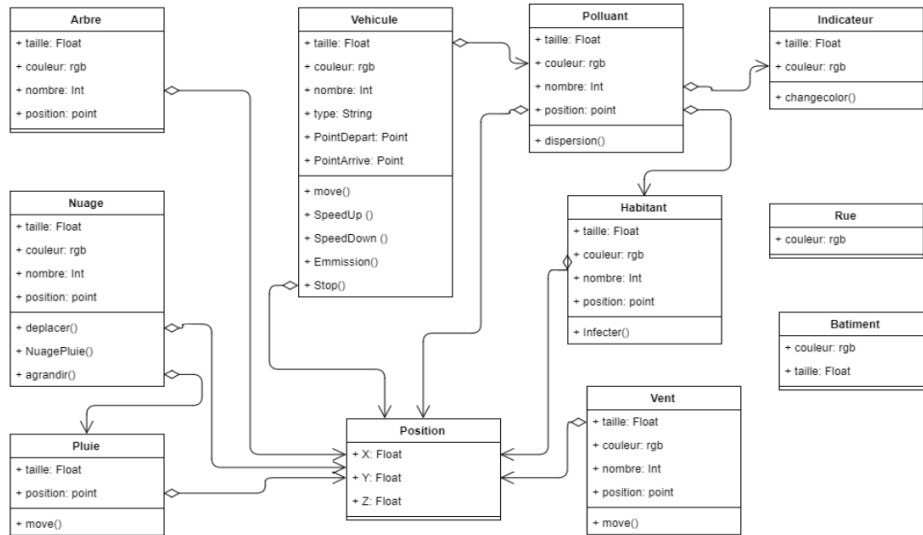


FIGURE 4 – Diagramme de classe du modèle proposé

### 1.3 Présentation du modèle réalisé

Dans cette partie, nous présentons le modèle que nous avons pu réaliser au cours de la période allouée. En effet, il représente un modèle simplifié du modèle proposé ci-dessus. Les agents que nous avons pu prendre en compte sont essentiellement : les véhicules, les polluants, les arbres et le vent.

Pour se faire, nous avons donc procédé à la réalisation d'un nouveau diagramme de classe que nous présentons dans la figure 5.

De même, le schéma de ce modèle peut être représenté comme illustré dans la figure 6. Dans ce schéma, nous pouvons constater que à la place des indicateurs, nous avons mis des courbes. Ces courbes nous permettront de suivre l'évolution des polluants correspondants sous forme statistique.

## 2 Simulation

Dans cette partie, nous présentons les scénarios, la condition d'arrêt et les paramètres d'évaluation qui serviront lors de la simulation de notre modèle.

### 2.1 Scénarios de simulation

Les scénarios de la simulation se resument en deux grandes parties à savoir la phase initiale et les actions répétées au cours de la simulation.

#### 1. INITIALISER

- Importer la carte ;
- Initialiser le nombre de véhicules à 0
- Créer le vent sans direction précise et avec direction ;

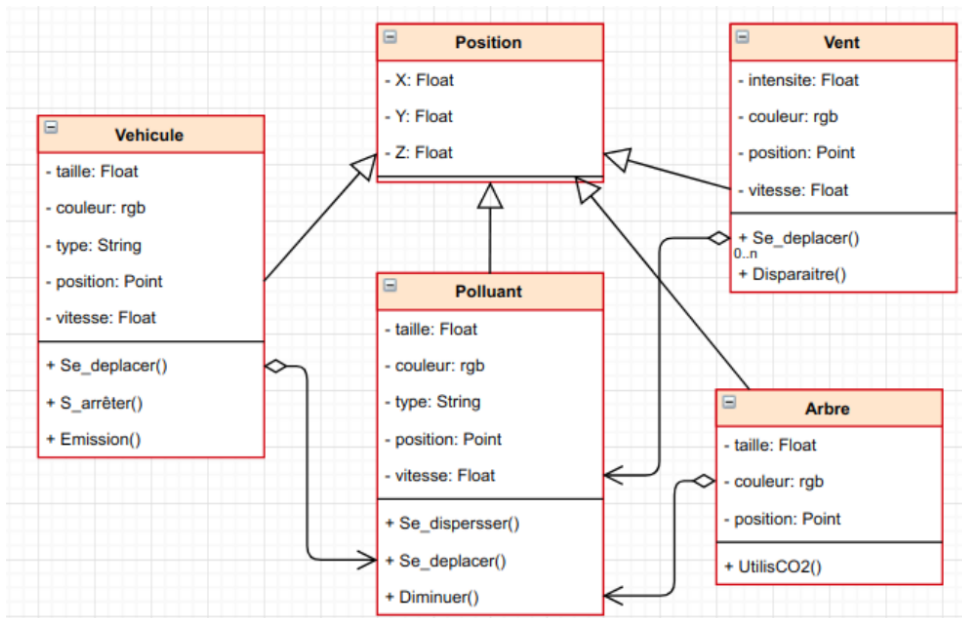


FIGURE 5 – Diagramme de classe du modèle réalisé

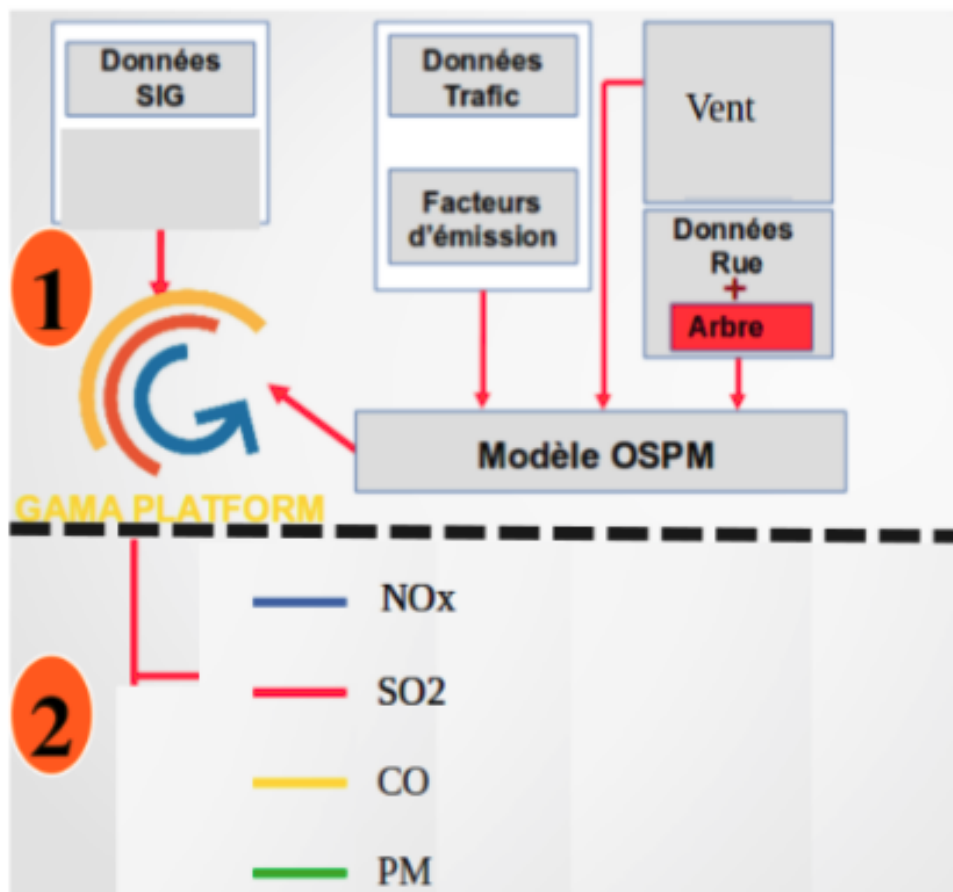


FIGURE 6 – Schéma du modèle simplifié (réalisé)



Paramètres d'entrés	Paramètre de sorties
<ul style="list-style-type: none"> <li>— Le nombre de Véhicule par type</li> <li>— Le temps de simulation</li> <li>— La vitesse et la direction du vent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Quantité de polluants par type</li> <li>— Graphes d'évolutions</li> <li>— Illustration des zones polluées</li> </ul>

TABLE 10 – Critères d'évaluations

- Créer des véhicules avec des destinations différentes ;
- Affecter une énergie à chaque véhicule
- Créer les arbres.

## 2. REPETER

- Les véhicules circulent sur les différents chemins ;
- Chaque véhicule dégage des polluants
- L'énergie de chaque véhicule diminue avec le temps. Lorsque son energie finie, son trafic s'arrête ;
- Les feux tricolores changent de couleur ;
- Le vent se deplace suivant une direction ;
- En présence du vent, les polluants se déplacent suivant la direction de celui-ci.

## 2.2 Conditions d'arrêt

Pour un cas pratique, la condition d'arrêt dépendra du temps d'observation (ex : 1/2 journée). Mais dans notre cas, nous arrêtons la simulation après observation des résultats obtenus ;

## 2.3 Paramètres d'évaluation

Les paramètres d'évaluation sont les paramètres sur lesquels nous allons nous baser pour savoir si le modèle répond à nos besoins ou pas. Ils sont situés des deux cotés à savoir à l'entrée du modèle et à la sortie du modèle.

Lorsque l'on soumet des données à l'entrée du modèle, des résultats sont attendus à la sortie. Cependant, les résultats peuvent corroborer avec ceux attendus ou non. Ainsi nous définissons nos paramètres comme illustré dans le tableau 10.

## 3 Expérimentation et analyse des résultats

Dans cette partie, nous présentons les données qui nous ont permis d'expérimenter le modèle mis en place.



FIGURE 7 – Environnement de simulation (OpenStreetMap)

### 3.1 Présentation des données utilisées

Comme pour tout modèle paramétrique, nous avons toujours besoin de données de tests pour sa validation. Les données utilisées sont :

- Les véhicules : Dans notre modèle, nous définissons principalement quatre type de véhicules que sont : les camions, les voitures personnelles, les bus et les motobikes. Le choix de ces données est guidé par la réalité de la ville de Hanoi. En effet, la ville de Hanoi est principalement animée par ces quatre types de véhicules. Chaque type de véhicule est affecté par un facteur de .... qui permet de déterminer la participation de chacun dans l'émission des polluants. Nous avons pris en compte quatre type de polluants qui sont selon....les plus provoqués par la circulation routière. Le tableau ?? présente la contribution de chacun des véhicules cité dans l'émission des polluants.
  - Le vent : le vent est l'un des éléments principal qui entre dans la dispersion des polluants. En effet, en présence du vent, les polluants sont systématiquement redirigés vers la direction de ce dernier et se dispersent au fur et à mesure dans l'environnement. Ainsi, même les endroits dans lesquels il n'y a pas de forts flux de trafic, se retrouvent pollués dû au transport effectué par le vent. Les principales caractéristiques qui le distingue sont donc son intensité et sa direction.
  - les arbres : comme le vent, les arbres interviennent dans la dispersion des polluants d'une part et aussi favorisent la la génération de certains polluants comme le CO2 par le principe de la photosynthèse.
  - La carte routière : Elle constitue notre environnement de simulation. Nous avons extrait une partie de la ville de Hanoi à partir de OpenStreetMap que nous avons importé dans QGIS afin d'obtenir le fichier shape ou shapefile qu nous avons utilisé sous la plateforme GAMA. La figure 7 nous permet de voir la sélection sur OpenStreetMap.
- En plus de ces données, en tenant compte du modèle complet proposé dans la deuxième partie, il existe d'autres paramètres qui peuvent entrer en jeux mais que nous n'avons pas utilisé dans le modèle simplifié. Il s'agit de :

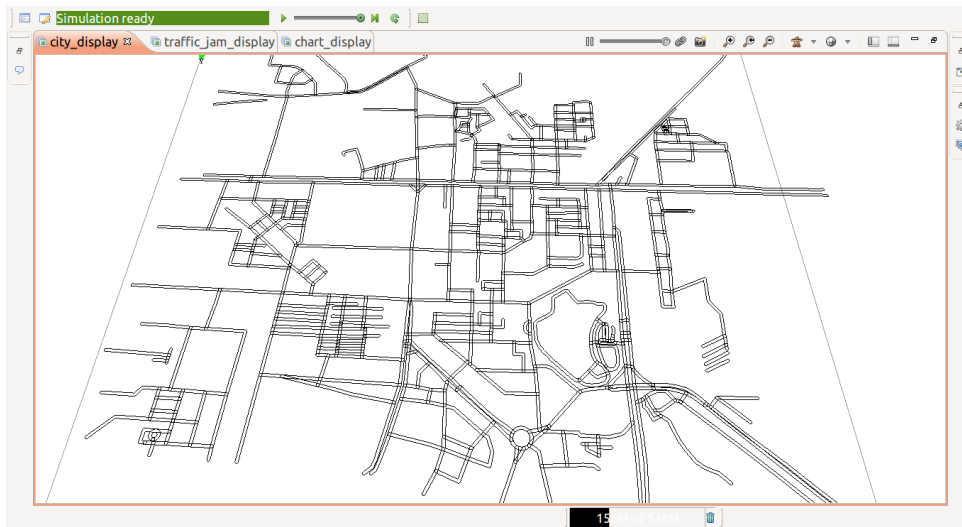


FIGURE 8 – *Environnement à l'initial*

- La taille des batiments qui se trouvent tout au long de chaque rue ;
- La largeur de la rue :elle permet de d'estimer le nombre de véhicules qu'elle peut contenir et de déduire aussi les cas de congestion.

### 3.2 Analyse des résultats

A l'initiale, c-à-d avant de lancer la simulation, notre environnement se présente comme présenté dans la figure 8

La figure 9 présente l'ensemble des agents présents dans notre environnement une fois la simulation lancée. Comme mentionné ci-dessus, nous avons tenu compte de quatre types de véhicules que sont les voitures personnelles, les bus, les camions et les motobikes. Quant aux polluants, nous notons également les quatre types de polluants que sont le NOx, le CO, le PM et le SO2.

Comme indiqué dans la partie des scénarios, nous simulons la dispersion des polluants en tenant compte principalement de trois cas.

1. Le premier cas est celui dans lequel nous considérons un vent assez stable ou un vent dont la direction n'est pas précise.

Nous constatons que les polluants se dispersent autour de l'environnement, mais sans former par exemple une agglutination à un endroit donné. De plus, les zones dans lesquels il n'y a pas de véhicules sont également touchées car les polluants se dispersent de un peu partout. Nous pouvons constater cela dans la figure 10.

2. Le deuxième cas est lorsque nous tenons compte du fait que très souvent, le vent possède une direction et se dirige avec une vitesse qui peut également être variée. Nous avons pris deux directions différentes dans cette partie. Les résultats obtenus figures 11 et 12 nous présentent comment les polluants évoluent en fonction de la direction.

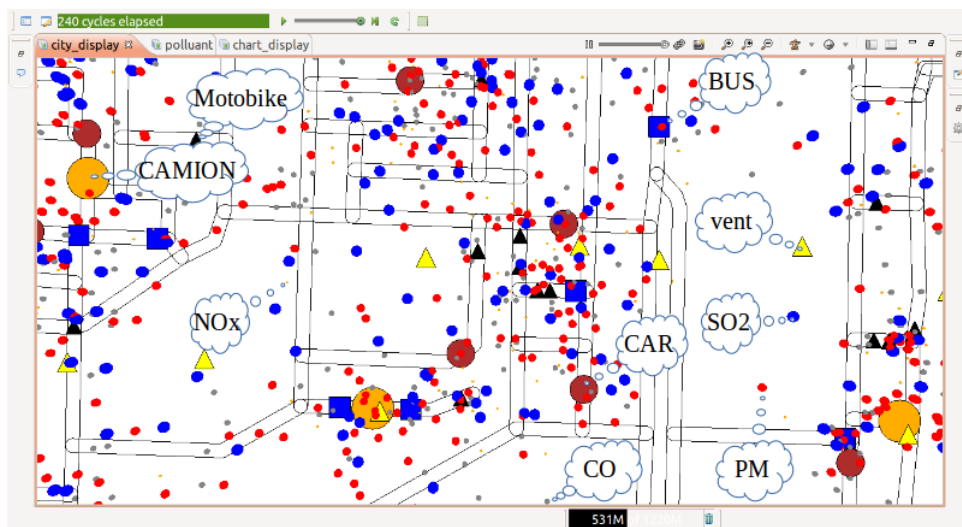


FIGURE 9 – Présentation des agents sur la carte

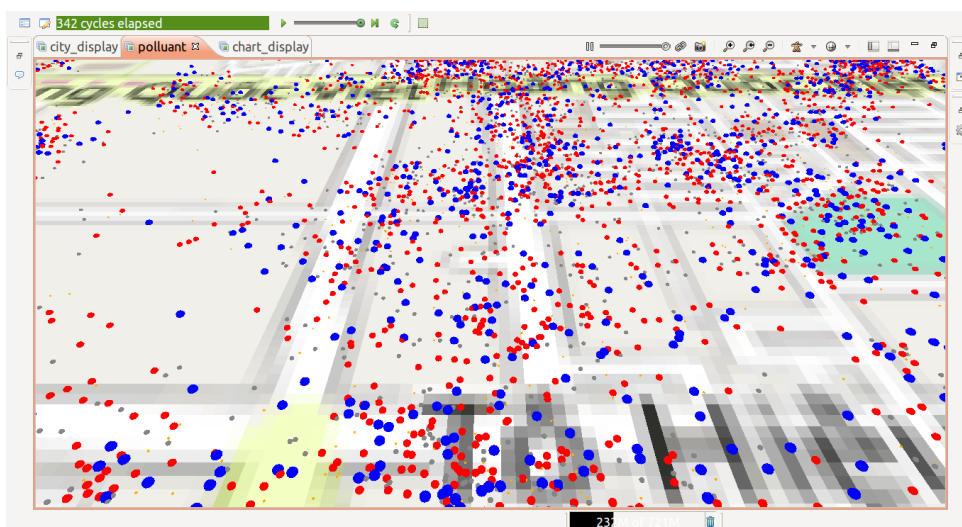


FIGURE 10 – Carte de pollution dans le cas d'un vent instable (direction non définie)

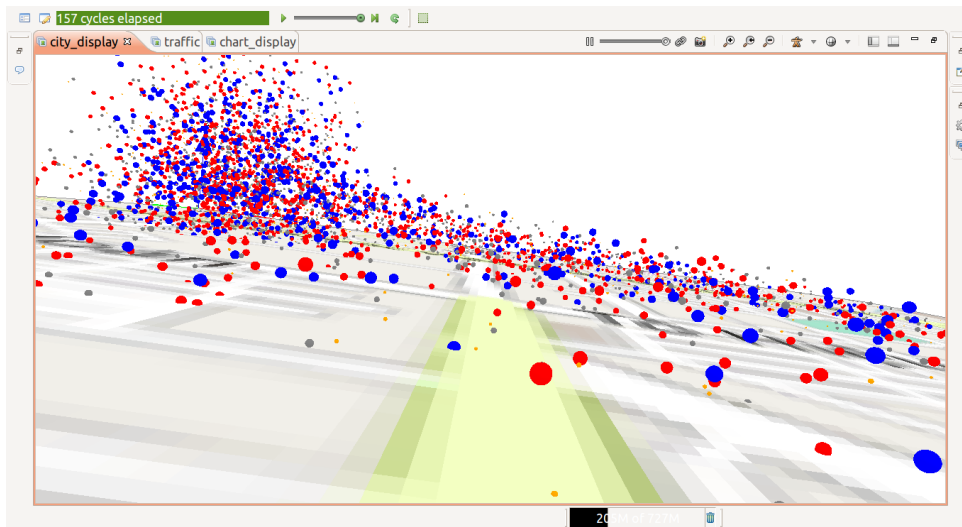


FIGURE 11 – Carte de pollution avec un vent directionnel 1

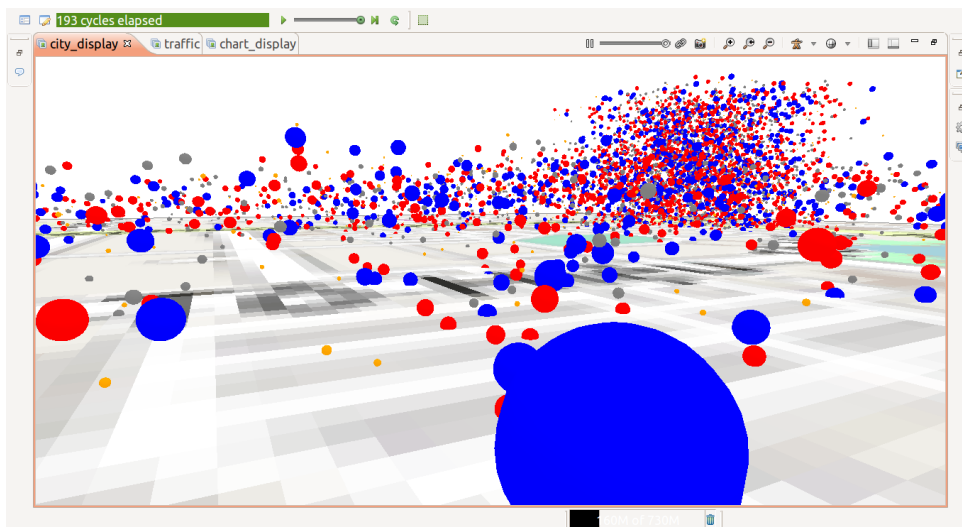


FIGURE 12 – Carte de pollution avec un vent directionnel 2

Nous remarquons que lorsque le vent se déplace avec une direction précise, l'un des points très important est que même les endroits où il n'y a pas de fort trafic ou par exemple les zones d'habitations se retrouvent inondées avec de fortes quantités de polluants. Le vent favorise donc non seulement la dispersion, mais aussi le transport de la pollution des endroits à fort trafic vers les endroits quasiment 'sains'.

3. Le troisième cas que nous avons illustré est la congestion du trafic routier. En effet, la congestion liée au trafic routier est l'un des phénomènes récurrents que nous constatons au quotidien. Plusieurs situations peuvent expliquer la congestion. Elle peut être due, soit aux heures de pointes ou de descentes durant lesquelles le nombre d'utilisateurs devient très important, ou soit à un dysfonctionnement des feux tricolores ou encore soit à la largeur de la voie. Dans le cas présent, nous nous focalisons sur le premier et le deuxième cas.

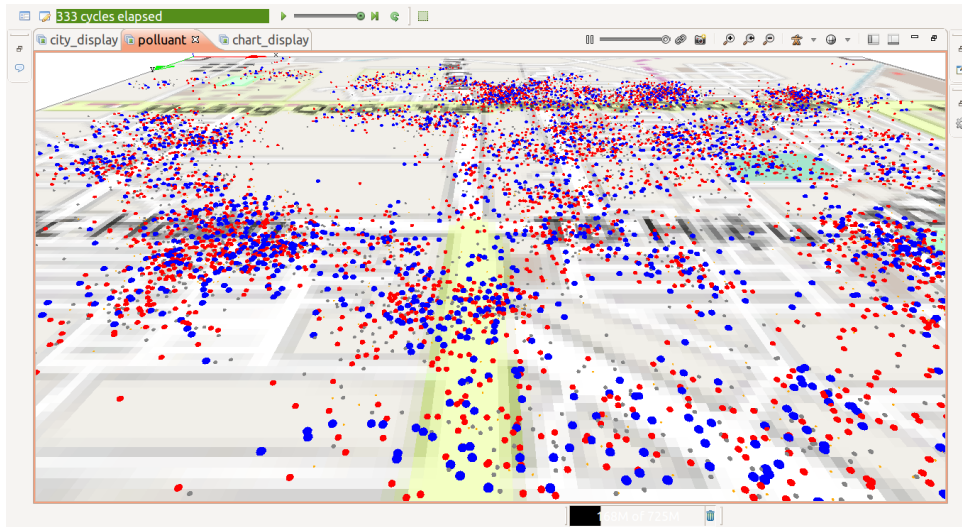


FIGURE 13 – Carte d'illustration d'un cas de congestion

Nous avons pu constater avec les résultats obtenus que une hausse du niveau de polluants au niveau des intersections. En effet, le nombre de véhicules est considérable à ces endroits et le flux de la circulation devient très lent. Chaque véhicule se déplace à une vitesse très réduite et dégage énormément de particules provoquant donc une grande quantité de pollution au niveau des intersections. Nous présentons un cas de simulation dans la figure 13.

Pour mieux suivre l'impact du trafic sur le niveau de la pollution, nous avons procédé à établissement d'un suivi sous forme statistique. Durant la phase de la simulation, nous avons évalué au fur et à mesure le nombre de particules dégagés pour l'ensemble des véhicules sans distinction en fonction au cours du temps. La figure 14 nous présente l'évolution de chaque polluants en fonction du temps et la figure 15 nous montre le nombre de particules générés au cours de la simulation. Nous constatons que au fil du temps, le nombre de véhicules augmente et provoque une croissance du niveau de polluants. La variation du nombre de véhicule en circulation induit directement sur la quantité de polluants produite.

Dans cette partie nous pouvons retenir à l'issue des résultats obtenu que le vent est un facteur très important qui entre dans le principe de la dispersion des polluants. Lorsqu'il se déplace avec une direction précise, cela conduit à un transport des polluants dans les zones d'habitations de même que dans les endroits ne connaissant pas de fort trafic. En plus de cela, nous avons pu faire ressortir que plus le nombre de véhicules est élevé dans un endroit, plus la circulation tourne au ralentie et plus ces endroits connaissent une forte élévation en niveau de pollution.

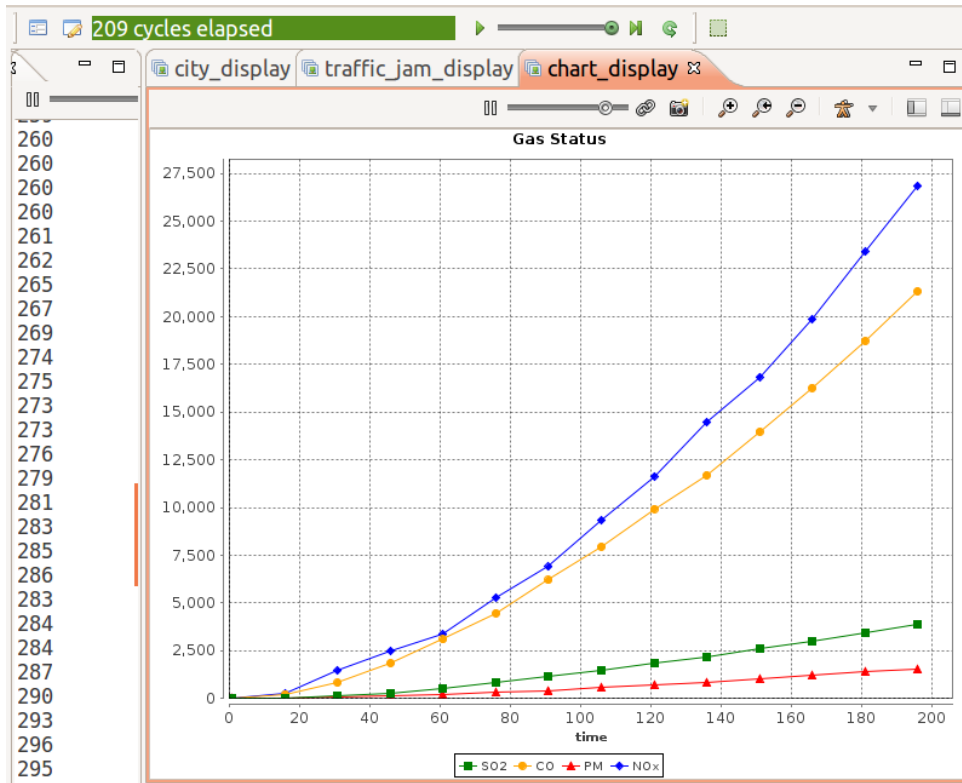


FIGURE 14 – Evolution des polluants en fonction du temps

Parameters		Monitors
Quantite de PM 1000	00 X	
Quantite de CO 1794	00 X	
Quantite de SO2 1423	00 X	
Quantite de NOx 2466	00 X	

FIGURE 15 – Quantité de polluants par types générée au cours de la simulation

## Cinquième partie

# Conclusion Générale et Perspectives

La pollution atmosphérique que connaît les ville de nos jours est en grande partie liée au trafic routier. Au cours de ce travail, nous avons pu étudier les principes d'émission et de dispersion des polluants dégagés par les véhicules. Dans la partie consacrée à l'étude théorique, nous nous sommes imprégné des différentes techniques et modèles déjà existants pour la modélisation de la pollution. A l'issu de ces modèles, nous avons proposé le modèle OSPM qui est l'un des modèles le plus utilisé pour les cas d'étude en milieu urbain. En plus des paramètres qu'intègre par défaut le modèle, nous avons tenu à ajouter un d'autres telsque les arbres et la pluie dans le but de d'étudier de prêt leur contributions dans la dispersion des polluants.

Les résultats obtenus nous ont permis de mettre en évidence l'impact du trafic routier sur la pollutin atmosphérique et aussi des phénomènes qui favorisent à leur dispersion. Cpendant, il reste beaucoup à faire car le modèle que nous avons réalisé jusqu'à présent n'est qu'une version simplifiée du modèle OSPM proposé au départ.

## 1 Difficultés rencontrées

Au cours de notre travail, nous avons eu à rencontrer quelques obstacles qui du moins n'ont pas favorisés l'évolution de la mise en oeuvre du projet. Ces difficultés peuvent être liées à/aux :

- la complexité du modèle OSPM ;
- la non maitrise du langage GAML ;
- les difficultés liées à la planification.

## 2 Perspectives

Pour une amélioration du travail effectué, nous préconisons l'application ou la mise en oeuvre des points suivants :

- Une représentation des polluants sous forme de cloud. En effet, dans le travail déjà réalisé, les polluants que nous avons simulé, chacun a été représenté comme étant un agent, ce qui alourdit le système. Afin de le rendre optimale, il serait donc nécessaire de représenter l'ensemble sous la forme d'un nuage tout en faisant varier la couleur de ce dernier en fonction de la quantité de chacun des polluants afin de pouvoir les mettre en évidence. Cette approche permettra de résumer tous les polluants en un seul agent, ce qui contribuera à reduire fortment le temps de calcul.

Pour sa mise en oeuvre, l'un des options possible serait de couvrir toute la zone par une grille. Ensuite, il faudra effectuer un mappage entre chaque cellule de la grille avec les véhicules qui se trouvent. Comme chaque véhicule produit plusieurs catégories de polluants, nous pouvons donc colorer chauqe cellule en fonction des types de véhicules qui s'y trouvent à partir de la couleur attribuée à chacun des polluants. A partir de là, nous



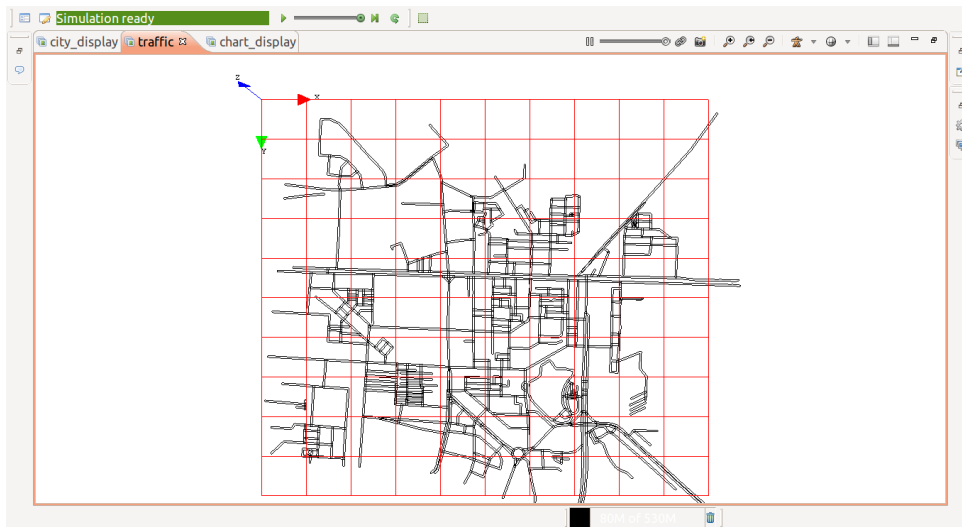


FIGURE 16 – Représentation de la pollution par une grille évolutive

pourrions avoir une grille multicolors dont la couleur varie au file du temps en fonctions du flux que connaît le trafic et même reperer les endroits les plus pollués. La figure 16 nous présente un aperçu de la grille sur la carte.

- Une augmentation du nombre de véhicules. Lorsque le nombre de véhicules est élevé, les résultats seront encore plus convaincants et pourrions nous aider à tirer de conclusions plus fiables.
- Une prise en compte du parc automobile. Il est sans doute que le type de combustible (essence, diesel) qu'utilise le véhicule induit considérablement sur les types et la quantité de polluants que dégage le véhicule. Il serait donc nécessaire de les distinguer afin d'obtenir des résultats plus fins et plus plausibles.
- Disposer des données de terrains pour l'alimentation et la validation du modèle. En effet, les résultats que nous obtenons à la sortie de notre modèle sont fortement liés aux données utilisées pour la simulation du modèle. Des données de terrain seront donc un plus pour la construction d'un modèle proche de la réalité. Par exemple un comptage des types de véhicules, les mesures sur les données météorologiques (vent, humidité..), et l'ensemble des autres paramètres du modèle d'origine (OSPM). Quant à la validation du modèle, des mesures de fonds prises sur le terrain permettront de faire une comparaison avec les résultats obtenus à la sortie du modèle.

# Références

## Références

- [1] airparif. Les différents polluants et leur évolutions. <https://www.airparif.asso.fr/pollution/differents-polluants>, consultée le 8 juin 2017.
- [2] airparif. qualité de l'air à hanoi : signature d'un accord de partenariat entre la municipalité de hanoi et airparif. <https://www.airparif.asso.fr/actualite/detail/id/172>, Le lundi 05 septembre 2016, consultée le 11 juin 17.
- [3] futura tech. Simulation informatique. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-simulation-informatique-11319/>, consultée le 11 juin 2017.
- [4] wikipedia. Pollution de l'air. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution\\_de\\_l'air](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution_de_l'air), consultée le 11 juin 2017.
- [5] leparisien. Système multi-agents. <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/système%20multi-agents/fr-fr/>, consultée le 5 juin 2017.
- [6] Sotiris Vardoulakis, Bernard EA Fisher, Koulis Pericleous, and Norbert Gonzalez-Flesca. Modelling air quality in street canyons : a review. *Atmospheric environment*, 37(2) :155–182, 2003.
- [7] B Owen, HA Edmunds, DJ Carruthers, and DW Raper. Use of a new generation urban scale dispersion model to estimate the concentration of oxides of nitrogen and sulphur dioxide in a large urban area. *Science of the total environment*, 235(1-3) :277–291, 1999.
- [8] Rajni Dhyani, Anil Singh, Niraj Sharma, and Sunil Gulia. Performance evaluation of caline 4 model in a hilly terrain—a case study of highway corridors in himachal pradesh (india). *International Journal of Environment and Pollution*, 52(3-4) :244–262, 2013.
- [9] HC Eerens, CJ Sliggers, and KD Van den Hout. The car model : the dutch method to determine city street air quality. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 27(4) :389–399, 1993.
- [10] J Den Boeft, H\_C Eerens, WAM Den Tonkelaar, and PYJ Zandveld. Car international : a simple model to determine city street air quality. *Science of the total environment*, 189 :321–326, 1996.
- [11] Guocheng Zhu, Peng Zhang, Tiroyaone Tshukudu, Jun Yin, Gongduan Fan, and Xuxu Zheng. Forecasting traffic-related nitrogen oxides within a street canyon by combining a genetic algorithm-back propagation artificial neural network and parametric models. *Atmospheric Pollution Research*, 6(6) :1087–1097, 2015.
- [12] Robert J Yamartino and Götz Wiegand. Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon. *Atmospheric Environment (1967)*, 20(11) :2137–2156, 1986.
- [13] AT Buckland. Validation of a street canyon model in two cities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 52(1-2) :255–267, 1998.

- [14] Thomas G Dzubay, Robert K Stevens, Glen E Gordon, Ilhan Olmez, Ann E Sheffield, and William J Courtney. A composite receptor method applied to philadelphia aerosol. *Environmental science & technology*, 22(1) :46–52, 1988.
- [15] AD Gosman. Developments in cfd for industrial and environmental applications in wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81(1-3) :21–39, 1999.
- [16] Ruwim Berkowicz, Ole Hertel, SE Larsen, NN Sørensen, and M Nielsen. Modelling traffic pollution in streets. *National Environmental Research Institute, Roskilde, Denmark*, 10129(10136) :20, 1997.
- [17] Justin Emery. *La ville sous électrodes : de la mesure à l'évaluation de la pollution atmosphérique automobile. : vers une simulation multi-agents du trafic routier en milieu urbain*. PhD thesis, Dijon, 2016.
- [18] Justin Emery, Nicolas Marilleau, Nadège Martiny, Thomas Thévenin, and Julien Villery. L'apport de la simulation multi-agent du trafic routier pour l'estimation des pollutions atmosphériques automobiles. In *Douzièmes Rencontres de Théo Quant*, 2015.
- [19] M Khalesian, P Pahlavani, and MR Delavar. Gis-based multi-agent traffic micro simulation for modelling the local air pollution. 2008.
- [20] Sabri Ghazi, Julie Dugdale, and Tarek Khadir. Modelling air pollution crises using multi-agent simulation. In *System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on*, pages 172–177. IEEE, 2016.
- [21] Amrit Kumar, Rajeev Kumar Mishra, and SK Singh. Gis application in urban traffic air pollution exposure study : a research review. *Suan Sunandha J Sci Technol*, 2(1) :1–13, 2014.
- [22] Samitha Samaranayake, Steven Glaser, David Holstius, Julien Monteil, Ken Tracton, Edmund Seto, and Alexandre Bayen. Real-time estimation of pollution emissions and dispersion from highway traffic. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(7) :546–558, 2014.
- [23] Masoud Fallah Shorshani. *Modélisation de l'impact du trafic routier sur la pollution de l'air et des eaux de ruissellement*. PhD thesis, Paris Est, 2014.
- [24] Marion Carteret, Michel André, and Anaïs Pasquier. Évaluation de la composition du parc automobile en ile-de-france pour le calcul des émissions de polluants liés au trafic routier. *2268-3798*, 2014.
- [25] Karen Albertsen, Anne Helene Garde, Kirsten Nabe-Nielsen, Åse Marie Hansen, Henrik Lund, and Helge Hvid. Work-life balance among shift workers : results from an intervention study about self-rostering. *International archives of occupational and environmental health*, 87(3) :265–274, 2014.
- [26] Infociments. Construire de nouvelles infrastructures routières. <http://www.infociments.fr/publications/route/collection-technique-cim beton/ct-t32>, consultée le 12 juin 2017.
- [27] Konstantinos E Kakosimos, Ole Hertel, Matthias Ketzel, and Ruwim Berkowicz. Operational street pollution model (ospm)—a review of performed application and validation studies, and future prospects. *Environmental Chemistry*, 7(6) :485–503, 2010.

- [28] P Kastner-Klein, R Berkowicz, and EJ Plate. Modelling of vehicle-induced turbulence in air pollution studies for streets. *International Journal of Environment and Pollution*, 14(1-6) :496–507, 2000.
- [29] GM Raducan. Pollutant dispersion modelling with ospm in a street canyon from bucharest. *Romanian Report in Physics*, 60 :1099–1114, 2008.
- [30] Ole Hertel. *Operational Street Pollution Model (OSPM). Evaluation of the model on data from St. Olavs street in Oslo*. Danmarks Miljøundersøgelser, 1989.
- [31] Gilles Maignant. Modélisation de la dispersion de polluants à l’échelle intra-urbaine, mise en place d’indicateurs morphologiques. 2006.
- [32] Ngo Tho Hung. *Urban air quality modelling and management in Hanoi, Vietnam*. National Environmental Research Institute, Aarhus University, 2010.
- [33] SS Jensen, M Ketzel, J Brandt, T Becker, MW Fuglsang, M Plejdrup, M Winther, T Ellermann, JH Christensen, OK Nielsen, et al. Air quality at your street-public digital map of air quality in denmark.
- [34] Sotiris Vardoulakis, Marios Valiantis, James Milner, and Helen ApSimon. Operational air pollution modelling in the uk—street canyon applications and challenges. *Atmospheric Environment*, 41(22) :4622–4637, 2007.
- [35] Lazar Lazić, Mira Aničić Urošević, Zoran Mijić, Gordana Vuković, and Luka Ilić. Traffic contribution to air pollution in urban street canyons : Integrated application of the ospm, moss bio-monitoring and spectral analysis. *Atmospheric Environment*, 141 :347–360, 2016.