

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



Option : Systèmes Intelligents et Multimédia (SIM)

TRAVAIL PERSONNEL ENCADRÉ (TPE)

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

Etudiant :

SAIDI ALLY AZARIA

Email : allysaidi64@gmail.com

Encadrants :

Dr Manh Hung Nguyen (IFI)

Email : nmh.nguyenmanhhung@gmail.com

Dr HO Tuong Vinh (IFI)

Email : ho.tuong.vinh@ifi.edu.vn

PROMOTION XXII

1 Novembre 2018

Table des matières

ANALYSE DU SUJET	4
INTRODUCTION	4
ETAT DE L'ART	6
1.1. Introduction	6
1.2. Les principaux polluants produits par le trafic routier	6
1.2.1. Définition	6
1.2.2. Modélisation numérique de la dispersion atmosphérique	7
1.2.3. Analyse critique de quelques travaux	10
1.2.4. QUELQUES TRAVAUX EFFECTUER SUR LE SUJET	11
1.2.5. Conclusion	13
PROPOSITION DE SOLUTION	14
3.1. Modèle proposé	14
3.1.1. Présentation et Description générale du modèle	14
3.1.2. Approche SMA (Système Multi-agent)	16
3.1.4. La phase de réalisation	17
IMPLEMENTATION	21
EXPÉRIMENTATIONS ET RESULTATS	25
5.1. ANALYSE DES RESULTATS	26
CONCLUSION ET PERSPECTIVE	28
Perspectives	28
Références	29

Table des figures

Figure 1 Les différentes approches de modélisation et leurs échelles associées.	10
Figure 1 définition de la boîte de calcul OSPM	15
Figure 2 . Schéma illustrant la solution proposée	17
Figure 3 diagrammes de Gantt.....	19
Figure 4 Plateforme GAMA.....	21
Figure 5 codes de l'Agent polluant	21
Figure 6 extrait du code de l'agent Vent	22
Figure 7 Extrait de code de l'agent Véhicule	22
Figure 8 Action des véhicules pour polluer	22
Figure 9 extraits de code d'affichage de la simulation.....	23
Figure 10. Simulation de la pollution	23
Figure 11. Un nuage de pollution	23
Figure 12.mesure de la pollution.....	24
Figure 13. JSON exporté	24
Figure 14. Graphique en forme de tarte.....	24
Figure 15.Environnement initiale	26
Figure 16. Mesure de la pollution avec 1000 véhicules.....	26
Figure 17.mesure de la pollution pour 10000 motos	27
Figure 18.mesure de la pollution pour 1000 bus.....	27

Liste des tableaux

Tableau 1 propriétés et actions des véhicules.....	18
Tableau 2 propriétés et action de l'agent polluant	18
Tableau 3 propriétés et actions de l'agent vent	19
Figure 4 diagrammes de classe.....	19
Tableau 5 planification du travail à réaliser	20

ANALYSE DU SUJET

« Une simulation pour étudier la pollution de l'air en ville : le cas de Hanoi »

INTRODUCTION

Afin de prévenir contre des dangers éminents de notre environnement due à des nombreux phénomènes naturels ou non, les Scientifiques ont souvent recourent à des simulations informatiques ou numériques. Les simulations informatiques ou numériques sont des séries de calculs effectués sur un ordinateur en vue de reproduire un phénomène physique [3]. 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.

Dans ce travail, il nous est demandé de simulé la pollution de l'air en ville, le cas de la ville de Hanoi et pour cela nous devons nous pencher sur trois questions :

- Comment se fait la pollution de l'air ?
- Quels agents favorisant le plus la pollution de l'air allons-nous étudier ?
- Quel outil utilisé pour simuler cette pollution ?

Ces trois questions vont nous permettre d'avancer dans la réalisation de ce projet, qui est en le rappelant de faire **Une simulation pour étudier la pollution de l'air en ville : le cas de Hanoi.**

1. Comment se fait la pollution de l'air ?

Dans cette section nous tenterons de répondre aux différentes préoccupations sur la pollution de l'air et de dépeindre quelques agents pollueurs ainsi que leur fonctionnement et leurs conséquences sur notre environnement.

2. Quels agents favorisant le plus la pollution de l'air allons-nous étudier ?

Dans cette section, nous allons étudier quelques agents pollueurs favorisant le plus la pollution Dans les grandes villes .nous dépeindrons ici ses différents agents afin de comprendre comment ils polluent l'air

3. Quel outil utilisé pour simuler cette pollution ?

Dans cette section nous allons parler de la simulation proprement dite, il sera donc question de réaliser cette simulation à l'aide d'un outil informatique choisit par nos soins. L'outil qui sera utilisé dans cette section est la plateforme **GAMA**.

GAMA est un environnement de développement de modélisation et de simulation pour construire des simulations spatialement explicites à base d'agents. D'où ce sujet touche principale le domaine Transversal, faisant appel non seulement à l'informatique (la modélisation) et mais aussi à la physique [5].

4. Résultat attendu

Ce sujet a pour but de proposer et implémenter un modèle qui permet 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.

En somme les conclusions de ce TPE pourront servir d'outil d'aide à la décision pour prévenir contre les pollutions de l'air

Chapitre 1

ETAT DE L'ART

1.1. Introduction

Toutes les recherches doivent avoir des bases existantes sur lesquelles s'appuyer pour éviter des risques de redondances et de perte de temps énorme. Il va de soi qu'il est dès lors important pour nous d'effectuer une recherche et étude des travaux déjà réalisés similaire ou non.

Dans cette section nous présenterons notre étude de l'art, qui sera basée principalement sur des travaux ayant trait à la simulation du trafic routier à l'aide de systèmes multi-agent et ayant utilisé des modèles numériques de la dispersion atmosphériques des polluants issues des véhicules, celui-ci étant l'un des agents le plus polluant en milieu urbain. 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.

1.2. Les principaux polluants produits par le trafic routier [1]

1.2.1. Définition

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 présents dans l'air, ayant des conséquences préjudiciables à la santé humaine, aux êtres vivants, au climat, ou aux biens matériels.

Ces polluants peuvent être d'origine diverses, telles que naturelle ou anthropique et concerne l'air atmosphérique et/ou l'air intérieur des espaces clos (véhicules, maisons, usines, bureaux). Ils constituent généralement des cocktails de polluants tels que des particules en suspension, ou autres substances dont la concentration et les durées de présence suffisent à produire un effet toxique et/ou écotoxique. Ils peuvent interagir avec la lumière (pollution photochimique).

Dans la plupart des villes Urbaines, une grande partie de la pollution atmosphérique est souvent du au produit d'un fort trafic routier. Ainsi, nous pouvons distinguer différents types de polluants tels que :

- L'ammoniac (NH_3) ;
- Le protoxyde d'azote (N_2O) ;
- Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO_2) ;
- L'ozone (O_3) ;
- Le dioxyde de soufre (SO_2) ;
- Les particules (PM 10 et PM 2,5) ;
- Le monoxyde de carbone (CO) ;
- Les oxydes d'azote (NO_x) ;
- Composés Organiques Volatils (COV)

En plus des polluants de nature gazeuse, il existe des métaux qui émettent par échappement ou non sous forme de particules, tel n'est pas le cas du mercure dont la forme nature est gazeuse, mais il émet en très faible quantité. Les principaux métaux polluants impliqués dans l'automobile sont :

- Le zinc (Zn)
- Le plomb (Pb)
- Le cadmium (Cd)
- Les métaux fer (Fe), cuivre
- (Cu), antimoine (Sb), chrome (Cr), nickel (Ni), sélénium (Se), baryum (Ba), arsenic (As), mercure (Hg), etc.

Etant donné que nous parlons de la pollution, il serait plus avantageux de parler de la façon dont celle-ci est modélisée, plus exactement de son modèle numérique de dispersion dans l'atmosphère sans entrer dans les détails

1.2.2. Modélisation numérique de la dispersion atmosphérique

L'un des buts de la modélisation de la dispersion atmosphérique est d'obtenir une estimation cartographiée des concentrations de substances gazeuses ou particulaires dans l'atmosphère, suffisamment précise et représentative des conditions réelles, dans le temps et dans l'espace. Afin d'estimer ces concentrations, des données d'entrée doivent être fournies aux modèles, telles que les variables météorologiques et les émissions, ou encore les conditions aux limites du domaine d'étude.

Sur ceux, deux grands types de modèles peuvent être distingués :

- ✓ les modèles online qui résolvent les lois de conservation et prennent en compte des couplages entre les équations décrivant l'écoulement et l'évolution des concentrations de polluants [7]. Ces modèles sont particulièrement utilisés en qualité de l'air car la

constitution de l'atmosphère, en particulier en particules, à une influence sur les circulations d'air et sur les forçages thermiques notamment radiatifs. Par contre en situation accidentelle ce couplage est de moindre importance, voire inexistant.

✓ les modèles offline qui ne résolvent que les lois de conservation de la masse et considèrent donc que l'influence des polluants sur les champs météorologiques est négligeable. Ceux-ci peuvent donc être pré-calculés et utilisés comme données d'entrée du modèle.

Parmi les modèles offline, diverses approches sont envisageables, suivant les situations (accidentelles, qualité de l'air) et surtout les échelles modélisées, c'est-à-dire la taille du domaine sur lequel les calculs de dispersion sont effectués. On distingue généralement l'échelle locale, l'échelle régionale, l'échelle continentale et l'échelle globale. Parmi les différentes approches possibles, nous avons choisi ceux qui sont les plus utilisées, notamment en situations opérationnelles, et qui permettent de couvrir les différentes échelles citées précédemment [8].

les modèles eulériens de chimie-transport à grande échelle et méso-échelle (CTM, Chemistry - Transport Model) : le domaine de simulation est discrétisé en une grille de calcul (ou maillage) , Il s'agit d'une approche déterministe, très utilisée en prévision de qualité de l'air, en étude d'impact ou en situation accidentelle et qui peut être utilisée à l'échelle régionale ou continentale, à condition de fournir en entrée du modèle des champs météorologiques pré-calculés à l'échelle correspondante.

Les modèles gaussiens : à l'échelle locale et sous certaines hypothèses simplificatrices. Ces modèles présentent l'avantage d'un coût de calcul très faible.

Les modèles de mécanique des fluides (CFD, Computational Fluid Dynamics) [15]: à l'échelle "très" locale, en particulier en milieu urbain ou plus généralement en présence d'obstacles qui perturbent l'écoulement d'air, la CFD permet de calculer, en résolvant les équations de Navier-Stokes sur un maillage fin et en prenant en compte la présence des obstacles, des écoulements complexes avec une bonne précision.

Les modèles lagrangiens particuliers : à partir d'une ou de plusieurs sources ponctuelles (ou récepteurs), un grand nombre de particules numériques sont émises. Le modèle suit alors la trajectoire de chaque particule, son mouvement étant composé d'une composante déterministe liée au champ de vent moyen et d'une composante stochastique qui décrit la variabilité due à la

turbulence. La concentration de polluants est ensuite évaluée en fonction de la répartition de ces particules numériques.

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

Le modèle CPBM (Canyon Plume Box Model) Le modèle CPBM (Ya Martino 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.

Type de modèle	Domaine de simulation	Applications
CFD (<i>online ou offline</i>)		
DNS	échelle très locale $\sim 1\text{km}$	Recherche (turbulence)
LES	échelle très locale $\sim 1\text{km}$	Recherche (turbulence)
RANS	échelle locale $\sim 1 - 10\text{km}$	Environnement complexe, urbain
Modèles <i>offline</i>		
Modèles gaussiens	échelle locale $\sim 1 - 10\text{km}$	Impact local, risque industriel
Modèles lagrangiens	échelle locale $\sim 10\text{km}$ échelle régionale $\sim 100\text{km}$ échelle continentale $\sim 1000\text{km}$	Risque industriel, biologique
Modèles eulériens de chimie-transport	échelle régionale $\sim 100\text{km}$ échelle continentale $\sim 1000\text{km}$	Prévision (photochimie) Impact à grande échelle
Modèles globaux	échelle globale $\sim 10000\text{km}$	Transport intercontinentale
Modèles <i>online</i> à grande échelle		
CTM couplé	échelle continentale	Recherche (photochimie)
GCM (Global Climate Model)	échelle globale	Impact climatique

Figure 1 Les différentes approches de modélisation et leurs échelles associées.

1.2.3. 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 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 à montrer 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 environnant. 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 finies). 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 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.

1.2.4. QUELQUES TRAVAUX EFFECTUER SUR LE SUJET

Ci-dessous nous présentons la liste des quelques travaux ainsi que leurs limites et leurs forces:

Articles	MODELES	DONNEES	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 spatiotemporelle 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 (1 ^{re} année pour apprentissage et 2 ^e 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]	Modèle de dispersion Gaussienne (modèle	Nombre de véhicules et leur vitesse moyenne	Bon rendement pour des mesures sur intersections Modélisation en temps réel	Moins efficace pour des fortes variations des

	parallèle à CALINE3 [3] mais permet de calculer les concentrations dans de petits espaces)	Données météorologiques	Intégration du modèle de trafic, conditions météorologiques, et modèles d'émissions Système réutilisable pour d'autres sources d'informations sur la pollution	conditions météorologiques Favorable pour des polluants non-réactifs
--	--	-------------------------	---	---

1.2.5. Conclusion

L'étude bibliographique faite ci-haut nous a menés autour des sujets qui ont permis de faire ressortir des cas d'études similaires, c'est à dire qui a dessiné les contours de notre sujet. La solution que nous allons proposer va se baser autour des solutions existantes et des modèles de dispersion atmosphérique cité ci-haut.

Chapitre 3

PROPOSITION DE SOLUTION

Dans la partie précédente nous avons parlé quelques modèles de dispersion atmosphérique et avons cité quelques grands travaux réalisés sur le sujet. Toute fois pour proposer une solution à base d'un système multi agents, il va de soi qu'il nous faut d'abord parler du model de dispersion à utiliser.

Ainsi comme le dit AIRPARIF [24] « *toutes les portions de voiries représentent 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* ».

Ce qui signifie qu'il est très difficile de connaître avec certitude les taux d'expositions réelles de chaque citoyen.

Suite à une étude approfondie sur les modèles de dispersion des polluants, nous avons opté pour le model **OSPM (OPERATIONAL STREET POLLUTION MODEL)** [25] qui est un modèle adapté pour la ville de Hanoi. Cette partie de notre travail se consacre à la proposition d'une solution qui nous conduira à la réalisation de notre travail. Dans les lignes qui suivent, nous ferons une présentation succincte, suivie d'une discussion du modèle proposé, et nous terminerons par la phase de réalisation notre du modèle.

3.1. Modèle proposé

3.1.1.Présentation et Description générale du modèle [24]

Le modèle **OPERATIONAL STREET POLLUTION MODEL(OSPM)** a été développé par le NERI (National Environmental Research Institute, Department of Atmospheric Environment). Il est distribué, sous format Windows, sous le nom de WINOSPM directement par le NERI.

Le modèle **OPERATIONAL STREET POLLUTION MODEL(OSPM)** est un modèle analytique de qualité ou de mesure de qualité de l'air à l'échelle de la rue. Il est fondé sur des considérations physiques simples mais rigoureuses caractérisant l'écoulement dans une rue canyon [26]. La concentration est représentée comme la somme de deux contributions : la contribution directe du panache émis par le trafic, et une contribution de recirculation due à l'entraînement des polluants par le tourbillon à l'intérieur de la rue. Ci-dessous se trouve une image illustrative :

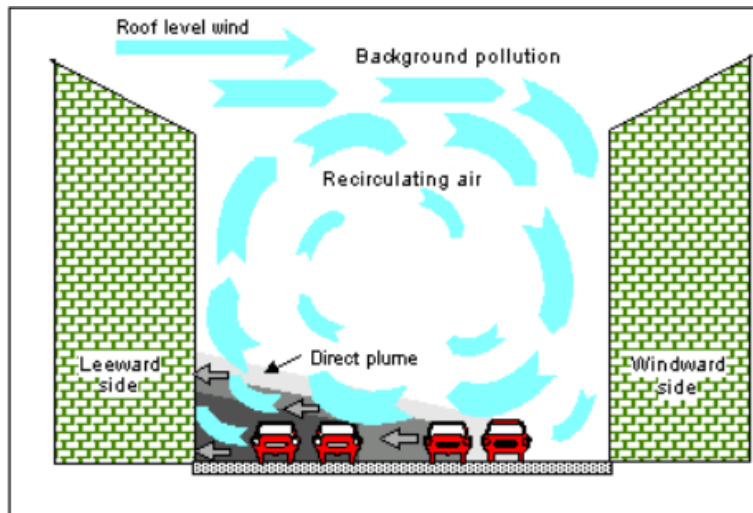


Figure 2 définition de la boîte de calcul OSPM

Dans les lignes qui suivent nous utiliserons la notion en sigle **OSPM** au lieu et place d'écrire **OPERATIONAL STREET POLLUTION MODEL**.

Le modèle **OSPM** incorpore un module analytique de chimie afin de prendre en compte de façon simplifiée les interactions entre **NO**, **NO₂** et **O₃**. D'un point de vue temporel, le modèle **OSPM** peut être mis en œuvre pour des pas de calcul de l'ordre de l'heure, c'est-à-dire ne nécessitant pas des jours ou des mois pour avoir des résultats.

3.1.1.1. Formulation [36]

Les émissions sont traitées comme des sources linéiques perpendiculaires à la direction du vent au niveau de la rue. Elles sont supposées se distribuer d'une manière uniforme dans la rue. La contribution directe de ces émissions est calculée selon un modèle de panache gaussien. La concentration de recirculation est calculée à l'aide d'un modèle de boîte appliqué à une zone trapézoïdale dans laquelle s'étend le tourbillon (Figure 1) La turbulence est décrite comme la résultante de deux composantes : une partie fonction de la vitesse de vent et une partie liée au mouvement des véhicules.

3.1.1.2. Paramètres [36]

Ci-dessous sont cités les paramètres utilisés dans un model OSPM :

- ✓ Géométrie de la rue : largeur (m), hauteur (m) des bâtiments de part et d'autre de la rue (H1 et H2), longueur (m)
- ✓ Données météorologiques : vitesse et direction du vent (m/s), rayonnement global (W/m²), hauteur de mélange (m), humidité relative (%)
- ✓ Données de trafic : nombre de véhicules par type et par heure et vitesse moyenne. Facteurs d'émission associés.
- ✓ Concentrations de fond des polluants (µg/m³) : **NO_x**, **NO₂**, **O₃**, **PM**, **CO**

3.1.2. Approche SMA (Système Multi-agent)

En informatique , un **système multi-agent (SMA)** est un système composé d'un ensemble d'agents situés dans un certain environnement et interagissant les uns des autres selon certaines relations. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome. Un agent peut être un robot, un être humain, un processus, etc.

Un **Système Multi-Agent** comme le laisse sous-entendre son nom, indique une approche qui nous permet de simuler différentes réalités de la vie quotidienne afin de prévenir et d'étudier leurs impacts sur notre mode de fonctionnement ou de vie. Dans notre cas, le milieu d'interaction se situe au niveau la rue sur laquelle les agents mobiles (véhicules) se déplacent. Quant aux autres agents, ils représentent tout ce qui entre dans la constitution de notre modèle. Chaque agent possède ses caractéristiques propres. Dans notre système nous pouvons distinguer deux types d'agents : les agents immobiles (inertes) et les agents mobiles.

3.1.2.1. Les agents inertes

Comme nous l'avons dit précédemment, voici la liste de nos agents inertes :

- ✓ 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).

3.1.2.2. Les agents mobiles

Les agents mobiles sont des agents qui ont la capacité ou le réflexe de se mettre en mouvement. Ci-dessous, voici la liste de nos 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, gasoil) 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.

3.1.4. La phase de réalisation

Dans cette section nous allons définir les outils et les données nécessaires pour la réalisation du modèle.

3.1.4.1. Plateforme et outils nécessaires

Notre travail fait appel à plusieurs disciplines dont le **SMA**, d'où il exige des outils de **simulation** des **systèmes multi-Agents** qui intègrent des caractéristiques et des performances nécessaires pour prendre en compte les critères et les exigences de notre modèle. Cependant Il existe plusieurs plateformes de simulations auxquelles nous pouvons faire recours.

Cependant, elles n'ont pas toutes les mêmes caractéristiques et leur portabilité varie d'une à l'autre. Dans ce travail, il nous est imposé le choix de la plateforme de **simulation multi-agents GAMA** qui est de nos jours l'une des plateformes la plus utilisée et la plus portable. **GAMA** intègre de grandes capacités en ce qui concerne l'utilisation des données des **systèmes d'informations géographiques (SIG)** qui est un besoin primordial pour l'importation des données des rues qui seront utilisées au sein de notre simulation. Le langage de programmation utilisé est le GAML qui est le langage de la plateforme GAMA.

3.1.4.2. Les Difficultés

Dans ce travail, nous avons rencontré plusieurs difficultés à relever. L'une des difficultés principales était le temps qui nous était imparti dans lequel nous étions tenu de réaliser le projet. La deuxième difficulté fut l'obtention des données réelles. Pour l'instant, nous prévoyons de 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'appareil mobile AQI qui donne le niveau de la pollution de l'air en temps réel. Par conséquent, nous illustrons notre modèle à travers le schéma suivant :

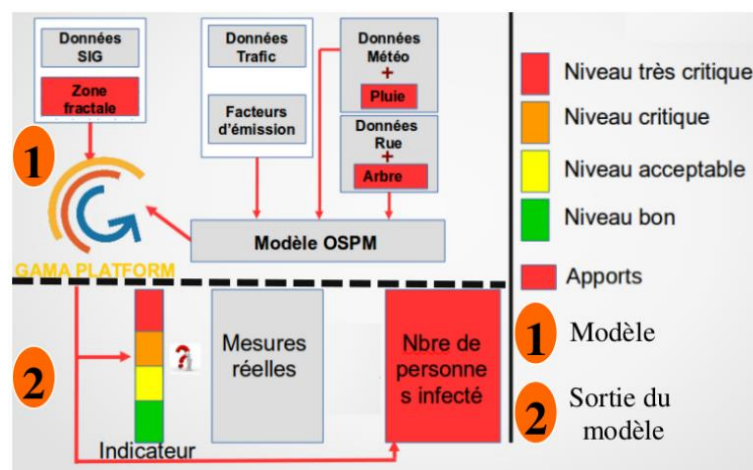


Figure 3 . Schéma illustrant la solution proposée

Notre modèle se constitue essentiellement des agents suivants :

1. Agent véhicule

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. Chaque véhicule a une vitesse aléatoire et il y a une certaine distance entre eux. Chacun d'entre eux génèrent des polluants au fur et à mesure qu'ils se déplacent. Cependant, le type et la quantité de gaz généré dépend du moteur ce dernier, cependant nous ne prendrons pas en compte ce facteur. Voici quelques propriétés et actions de cet agent :

propriétés	Actions
Les coordonnées (x, y) La taille La couleur La vitesse Le type Le facteur d'émission	Se déplacer (accélérer, ralentir) Produire des polluants S'arrêter

Tableau 1 propriétés et actions des véhicules

2. Agent polluant

Les polluants sont les gaz générés par les véhicules. Ils sont de diverses natures. Nous distinguons entre autre le CO, le NOx, 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 congestion, la vitesse moyenne des véhicules diminue considérablement provoquant ainsi une forte concentration dans le dit milieu. Ci-dessous est présenté quelques actions et propriétés de cet agent :

propriétés	Actions
Les coordonnées (x, y, z) La taille La couleur La vitesse Le type	Se disperser Suivre la trajectoire du vent Disparaître

Tableau 2 propriétés et action de l'agent polluant

3. Agent vent

Le vent est un agent qui agit sur la dispersion des polluants en fonction de sa vitesse de déplacement et de sa direction. Ci-dessous nous présentons quelques propriétés et actions de l'agent vents :

propriétés	Actions
Les coordonnées (x, y, z) La taille La couleur La vitesse L'intensité La direction	Se déplacer Suivre la direction Disparaître

3.1.4.2. Diagramme de classe du modèle proposé

Le diagramme de classe est souvent utilisé pour montrer les interactions entre les classes dans UML, par interactions nous voulons parler des liens entre les différentes classes, dans ce cas-ci ce sont des interactions entre les différents agents de la simulation

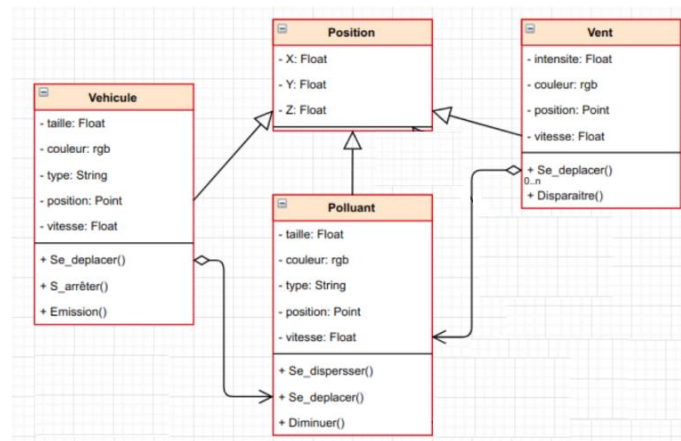


Figure 4 diagrammes de classe

3.1.4.3. Planification

Ci-dessous nous vous présentons notre planification :

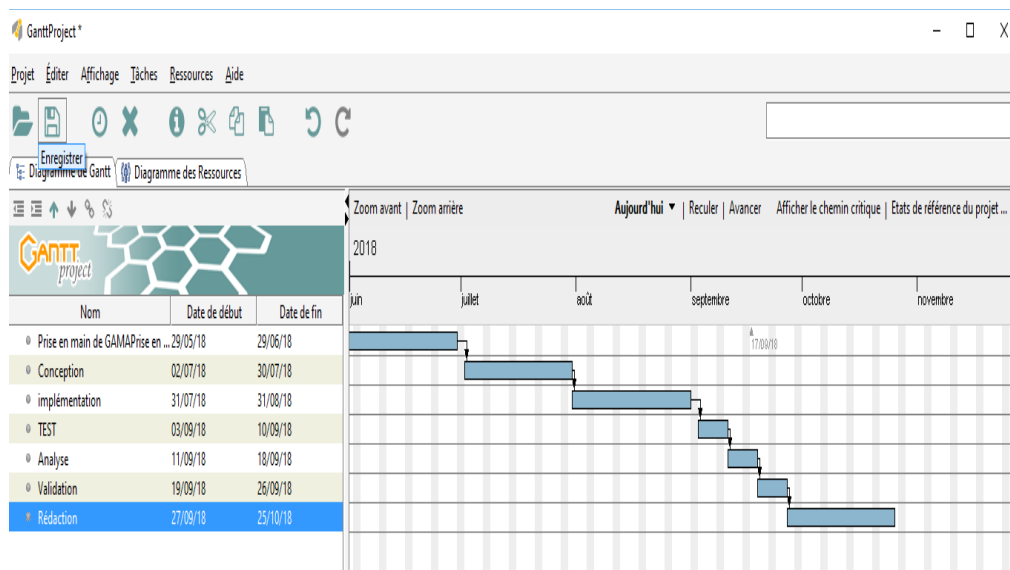


Figure 4 diagrammes de Gantt

ACTIVITES	DUREE
Prise en main de GAMA	3 semaines
Conception	2 semaines
implémentation	3 semaines
TEST	1 semaine
Analyse	1 semaine
Validation	1 semaine
Rédaction	3 semaines

Tableau 5 planification du travail à réaliser

Chapitre 4

IMPLEMENTATION

Dans cette section nous allons montrer les implémentations de chaque entité ainsi que de leurs reflex et attributs. Ci-dessous nous vous présentons la plateforme **GAMA** :

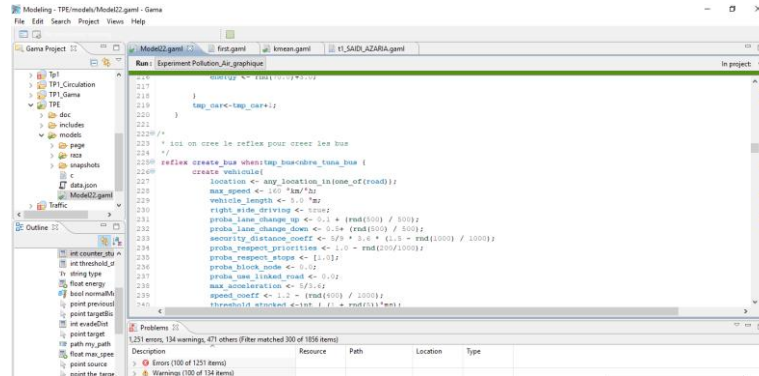


Figure 5 Plateforme GAMA

Dans la figure suivante nous vous présentons un extrait de code de l'agent polluant :

```
Run: Experiment Pollution_Air_graphique

294 species pollutant_grid skills:[moving] {
295   float direction1;
296   string type;
297   float speed max: maximal_speed;
298   float range <- minimal_distance * 2;
299   point velocity <- {0,0,0};
300   list others update: ((pollutant_grid at distance range) - self);
301   point mass_center update: (length(others) > 0) ? (mean (others collect (each.location))) : location;
302
303   reflex separation when: apply_separation {
304     point orientation <- {0,0,0};
305     loop pollutant over: (pollutant_grid at distance (minimal_distance)) {
306       orientation <- orientation - ((location of pollutant) - location);
307     }
308     velocity <- velocity + orientation;
309   }
310
311   action bounding {
312     if (location.z) <= 0 {
313       location <- {location.x, location.y, 0};
314     } else if (location.z) > z_max {
315       location <- {location.x, location.y, z_max};
316     }
317   }
318
319   reflex follow_goal when: apply_goal {
320     velocity <- velocity + ((goal - location) / cohesion_factor);
321   }
322
323   reflex wind when: apply_wind {
324     velocity <- velocity + wind_vector;
325   }
```

Figure 6 codes de l'Agent polluant

Dans l'extrait de code nous pouvons apercevoir le reflex « *reflex follow_goal* », ici le reflex n'est rien d'autre que l'équivalent de méthode dans la programmation orientée Object.

```

400 */
401@species Wind skills: [moving] {
402   float direction;
403   float intensity;
404   point target;
405   float speed max: maximal_speed <- maximal_speed;
406
407   init {
408     float x_cord <- max([0.0, min([1000.0, gauss(( 500, 50 ))]))];
409     float y_cord <- max([0.0, min([1000.0, gauss(( 500, 50 ))]))];
410     location <- { x_cord, y_cord };
411     intensity <- max([0.0, min([100.0, gauss(( 50, 15 ))]))];
412   }
413   const range type: float init: 20.0;
414   const size type: float init: 10.0;
415   aspect basewind {
416     draw triangle(10) color: # yellow;
417   }
418 }
419/*
420 * le reflex de deplacement du vent-----
421 */
422@reflex deplacement when: intensity > 0 {
423   do goto target: target speed: speed;
424   //self.location <- { self.location.x + cos(self.direction), self.location.y - sin(self.direction) };
425   self.location <- { self.location.x + cos(self.direction), self.location.y - sin(self.direction), self.location.y - rnd(sin(self.location.x) <= 0 {
426     location <- { location.x, location.y, 0;
427   }
428   } else if (location.x) > x_max {
429     location <- { location.x, location.y, x_max;
430   }
431   }
432   intensity <- intensity * 0.1;

```

Figure 7 extrait du code de l'agent Vent

```

Run: Experiment Pollution_Air_graphique In project
485@species vehicule skills: [advanced_driving] {
486   int counter_stucked <- 0;
487   int threshold_stucked;
488   string type;
489   float energy;
490   bool normalMove <- true;
491   point previousLoc <- nil;
492   point targetBis <- nil;
493   int evadeDist <- 200;
494   point target;
495   path my_path;
496   float max_speed;
497   point source;
498   point the_target <- nil;
499   /**
500    * reflex pour le deplacement de l'engin-----
501    */
502
503   @reflex deplacement when: normalMove{
504     previousLoc <- copy(location);
505     do goto target: target on: the_graph speed: speed;
506     switch location {
507       match target {
508         target <- any_location in (some_of(road));
509         sbGoalisAchieved <- sbGoalisAchieved +1;
510       }
511     }
512   }
513
514   @reflex EvadeMove when: !(normalMove){
515     do goto target: targetBis on: the_graph speed: speed;
516     switch location {

```

Figure 8 Extrait de code de l'agent Véhicule

Dans l'agent véhicule, nous définissons un type qui prendra comme valeur camion, moto, voiture ou bus. Ainsi de cette manière nous pourrions connaître le nombre exacte des différents véhicules dans la circulation de Hanoi mais aussi en fonction de ce type nous pourrions faire varier le nombre de chaque véhicules enfin de savoir lequel de ce dernier pollue le plus la ville.

```

586 * action en cas d'emission des bus
587 */
588@action Emission_de_Bus {
589   create pollutant_grid {
590     location <- myself.location; // point ([rnd (500), rnd (500), 350]);
591     if (flip(0.25)){
592       type <- "PM";
593       particule_so2_3 <- pollutant_grid count (each.type = "PM")*1.5;
594     }
595     else if (flip(0.25)){
596       type <- "CO";
597       particule_co_3 <- pollutant_grid count (each.type = "CO")*3.1;
598     }
599     else if (flip(0.25)){
600       type <- "SO2";
601       particule_pm_3 <- pollutant_grid count (each.type = "SO2")*0.64;
602     }
603     else if (flip(0.25)){
604       type <- "NOx";
605       particule_nox_3 <- pollutant_grid count (each.type = "NOx")*7.6;
606     }
607   }
608 }
609/*
610 * action pour les motobike en cas d'emission-----
611 */
612@action Emission_de_Motobike {
613   create pollutant_grid {
614     location <- myself.location; // point ([rnd (500), rnd (500), 350]);
615     if (flip(0.25)){
616       type <- "PM";
617       particule_so2_3 <- pollutant_grid count (each.type = "PM")*1.5;

```

Figure 9 Action des véhicules pour polluer

Dans l'extrait de code ci-dessus, nous définissons une quantité des polluants que dégage chaque type de véhicules et ensuite nous faisons la somme de chaque type de polluant (de même espèce).

```

702 */
703 experiment Pollution_Air_graphique type: gui {
704   /*
705    * parametres de nombre de voiture-----
706    */
707   parameter "le nombre de bus:" var:nbre_tuna_bus category:"Nombre de vehicules";
708   parameter "le nombre de camions:" var:nbre_tuna_cam category:"Nombre de vehicules";
709   parameter "le nombre de motos:" var:nbre_tuna_moto category:"Nombre de vehicules";
710   parameter "le nombre de voiture:" var:nbre_tuna_voiture category:"Nombre de vehicules";
711   output {
712
713   /*
714    * l'affichage pour les bouchons du trafic
715    */
716   display bouchons refresh_every: 1 {
717     species road aspect: traffic_jam ;
718     species vehicule aspect:base;
719   }
720
721   /*
722    * affichage pour la pollution dans la ville de Hanoi
723    */
724   display affichage_ville type:opengl refresh_every:1 {
725     image ".../includes/images/city.jpg" refresh: false;
726     species pollutant_grid aspect:base;
727   }
728   /*
729    * parametre de l'application-----
730    */
731   monitor "Taux de polluant SO2" value: pollutant_grid count (each.type = "SO2");
732   monitor "Taux de polluant PM" value: pollutant_grid count (each.type = "PM");
733   monitor "Taux de polluant CO" value: pollutant_grid count (each.type = "CO");

```

Figure 10 extraits de code d'affichage de la simulation

Dans la figure suivante nous vous présentons les polluants qui se dégage des véhicules et qui se dirige suivant la direction du vent

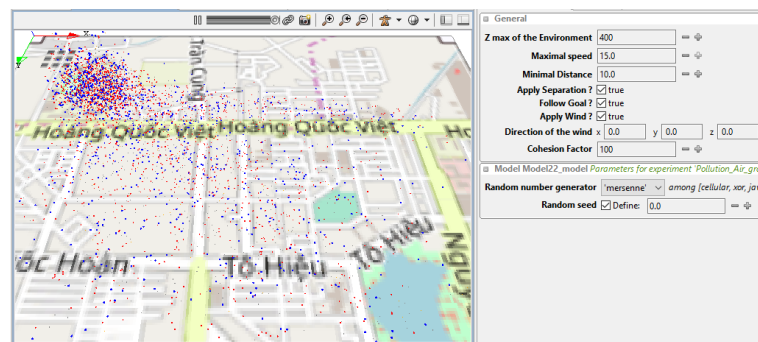


Figure 11. Simulation de la pollution

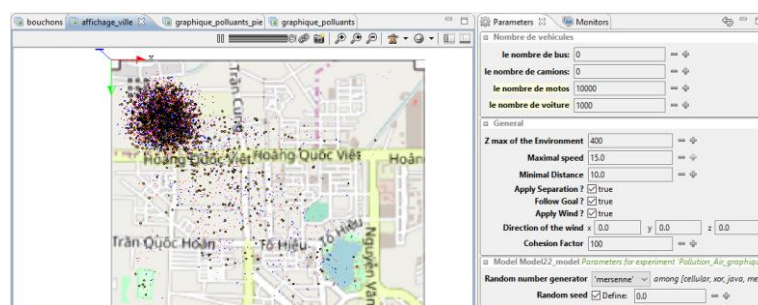


Figure 12. Un nuage de pollution

Dans la figure suivante, nous vous présentons la mesure de cette pollution dans la ville de Hanoi en utilisant un graphique montrant la quantité de chaque polluant

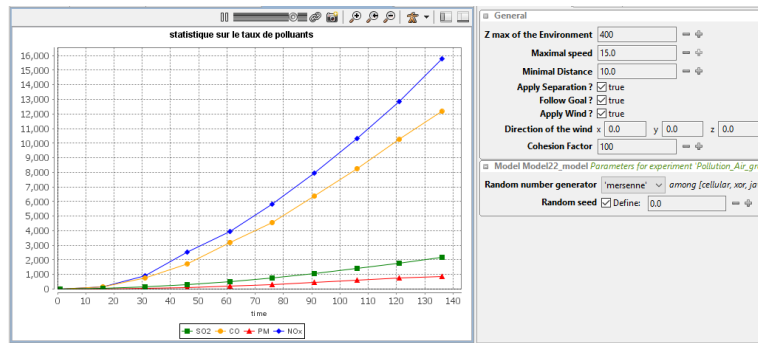


Figure 13. mesure de la pollution

Et enfin nous finissons avec un graphique de tarte (pie) qui montre une autre mesure de la quantité de polluants au sein de la ville de Hanoi et nous avons écrit un petit script qui permet de voir le même graphique sur une page web, les données exportées sur la page web sont en format JSON et elles se présentent ainsi :

```
1 [{"name": "SO2", "quantity": 10.0, "time": 10.0, "color": "green"},
2 [{"name": "CO", "quantity": 10.0, "time": 10.0, "color": "orange"},
3 [{"name": "PM", "quantity": 10.0, "time": 10.0, "color": "red"},
4 [{"name": "NOx", "quantity": 10.0, "time": 10.0, "color": "blue"}]
5
6
7
8
9 [{"name": "SO2", "quantity": 10.0, "time": 11.0, "color": "green"},
10 [{"name": "CO", "quantity": 10.0, "time": 11.0, "color": "orange"},
11 [{"name": "PM", "quantity": 10.0, "time": 11.0, "color": "red"},
12 [{"name": "NOx", "quantity": 10.0, "time": 11.0, "color": "blue"}]
13
14
15
16 [{"name": "SO2", "quantity": 10.0, "time": 12.0, "color": "green"},
17 [{"name": "CO", "quantity": 10.0, "time": 12.0, "color": "orange"},
18 [{"name": "PM", "quantity": 10.0, "time": 12.0, "color": "red"},
19 [{"name": "NOx", "quantity": 10.0, "time": 12.0, "color": "blue"}]
20
21
22
23 [{"name": "SO2", "quantity": 10.0, "time": 13.0, "color": "green"},
24 [{"name": "CO", "quantity": 10.0, "time": 13.0, "color": "orange"},
25 [{"name": "PM", "quantity": 10.0, "time": 13.0, "color": "red"},
26 [{"name": "NOx", "quantity": 10.0, "time": 13.0, "color": "blue"}]
27
28
29
30 [{"name": "SO2", "quantity": 10.0, "time": 14.0, "color": "green"},
31 [{"name": "CO", "quantity": 10.0, "time": 14.0, "color": "orange"},
32 [{"name": "PM", "quantity": 10.0, "time": 14.0, "color": "red"},
33 [{"name": "NOx", "quantity": 10.0, "time": 14.0, "color": "blue"}]
34
```

Figure 14. JSON exporté

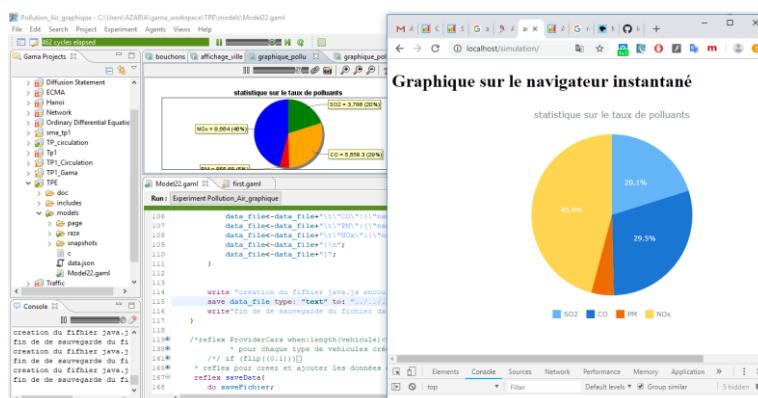


Figure 15. Graphique en forme de tarte

Chapitre 5

EXPÉRIMENTATIONS ET RESULTATS

Ci-dessous une description de la configuration de l'environnement de développement et d'expérimentation :

✓ **Environnement matériel**

Ordinateur portable Dell, modèle Inspiron-N4010

CPU : 2.5 GHz

— Mémoire de masse : 600 Go

— Mémoire vive : 8Go de RAM

* *Environnement logiciel :*

— Linux ou Windows 10 64 bits, Ubuntu 64 bits, version 4.4.0-104-generic

✓ **Langage de programmation et outils utilisés**

Les langages de programmation utilisés principalement sont Gaml et JavaScript ainsi que la plateforme multi agent **GAMA**.

✓ **Période de collecte des données**

Les expérimentations avec le système obtenu sont menées sur une période de temps allant du 03 Septembre 2018 au 11 Septembre 2018

Présentation des données utilisées

dans presque tous les modèles paramétriques, on a besoin de données de tests pour sa validation. Les données utilisées sont :

✓ **Les véhicules :** Dans notre modèle, nous distinguons quatre types de véhicules dans les chapitres précédents, ce choix des données est guidé par la réalité de la ville de Hanoi. Chaque type de véhicule est affecté par un facteur qui permet de déterminer sa participation dans chaque émission des polluants. Nous avons pris en compte quatre types de polluants qui sont les plus courants dans la circulation routière à savoir NOx, CO, PM10 et SOx.

✓ **Le vent :** le vent est l'un des éléments principaux 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

✓ **La carte routière :** Elle constitue notre environnement de simulation. Nous avons extrait une partie de la ville de Hanoi à partir de la plateforme OpenStreetMap que nous avons importé dans QGIS afin d'obtenir un ensemble des fichiers Shape file que nous avons importé dans la plateforme **GAMA**.

Il existe d'autres paramètres qui peuvent entrer en compte mais que nous n'avons pas utilisés dans le modèle simplifié. Il s'agit de la hauteur des immeubles et de la longueur des routes.

Ci-dessous, nous vous présentons l'environnement initial de la simulation :

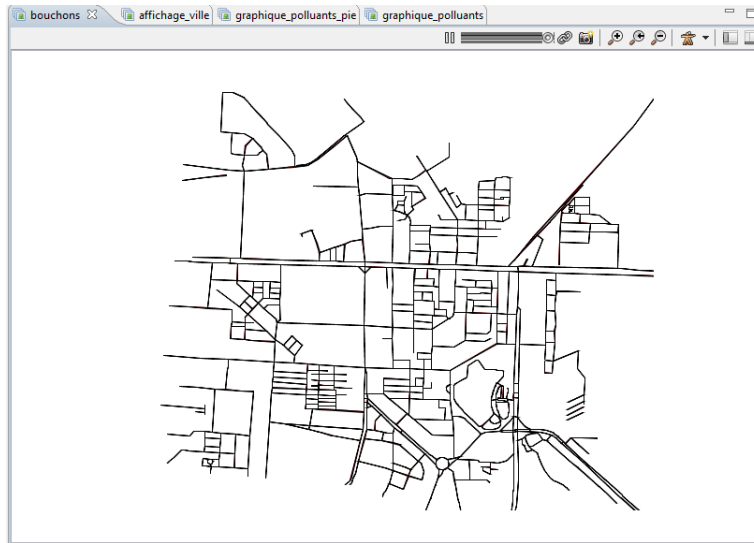


Figure 16. Environnement initiale

5.1. ANALYSE DES RESULTATS

Dans cette section nous présenterons certains résultats issus de notre expérimentation en faisant varier le nombre de chaque type de véhicules. Comme mentionné plus haut, nous avons tenu compte de quatre types de véhicules que sont les voitures personnelles, les bus, les camions et les motos. Quant aux polluants, nous notons également les quatre types de polluants que sont le NOx, le CO, le PM et le SO2.

1. Lorsque le nombre de véhicules est le même (1000) nous constatons que la moitié de la quantité total de la pollution en ville est constitué de particules NOx comme le montre la figure suivante :

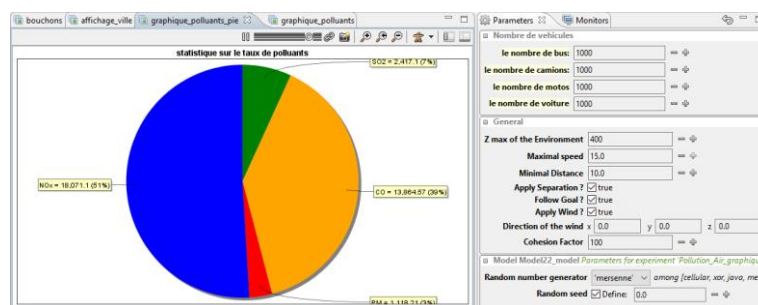


Figure 17. Mesure de la pollution avec 1000 véhicules

2. Lorsque le nombre des véhicules sont inégaux, avec 10000 moto et 1000 voitures personnelles, nous remarquons le pourcentage de CO passe à 54% et celle du NOx 43% et 3% pour le reste des polluants. Cela est dû au fait que les motos dégagent plus des particules de CO que les autres particules comme l'illustre l'image suivante :

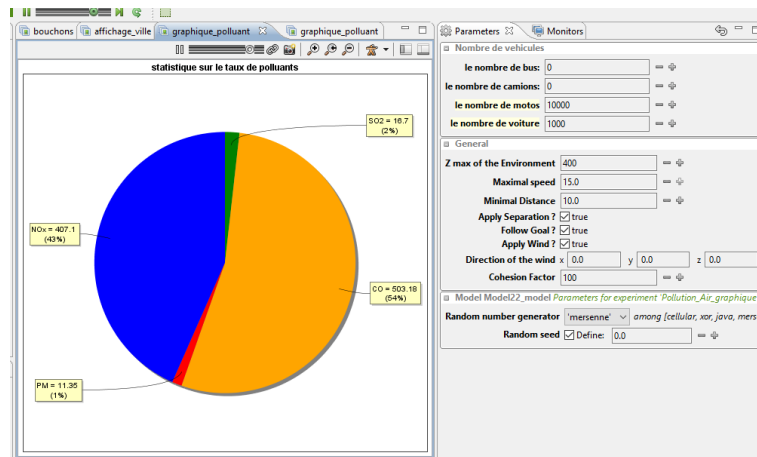


Figure 18.mesure de la pollution pour 10000 motos

3. Lorsque nous mettons le nombre de bus à 1000, le nombre de voiture 0 et le reste de véhicules à 100, on constate que le pourcentage de SO₂ a augmenté 10% par rapport aux expériences précédentes comme le montre l'image suivante :

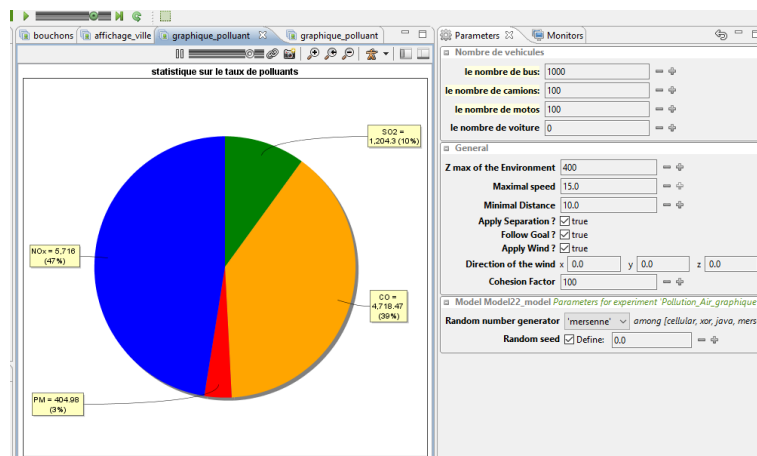


Figure 19.mesure de la pollution pour 1000 bus

Dans cette partie nous pouvons retenir à l'issu des résultats obtenu que le nombre des véhicules aussi grand ou petit soit-il pour chaque type influence sur la pollution de l'air en ville de Hanoi.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Au cours de ce travail, nous avons étudié quelques principes d'émission et de dispersion des polluants dégagés par les véhicules. Dans l'état de l'art nous avons parlé des différentes techniques et modèles existants pour la modélisation de la pollution. Des tous ces modèles, nous avons choisi le modèle **OSPM** qui est l'un des modèles le plus utilisé dans les cas d'étude des milieux urbains à cause de son échelle adapté pour ce type de milieu, en plus des paramètres qu'il intègre en son sein.

Les résultats obtenus nous ont permis de mettre en évidence l'impact du trafic routier sur la pollution atmosphérique ainsi que les phénomènes qui favorisent leur dispersion. Cependant, il reste beaucoup à faire car le modèle que nous avons réalisé jusqu'à présent n'est pas parfait, car étant une version simplifiée du modèle **OSPM**.

Perspectives

Dans une optique d'amélioration du travail effectué, nous préconisons la mise en œuvre des points suivants :

- ✓ La prise en compte des différents types de moteur des véhicules car tous les moteurs ne dégagent pas les mêmes quantités des polluants, c'est un facteur qui pourrait permettre aussi de dire : *« quel type de véhicules ou quel type de moteur pourrais circuler dans telle zone pour réduire le risque d'une pollution massive »*.
- ✓ La prise en compte d'un module web qui permet d'avoir des inputs depuis une page web

Références

- [1] airparif. Les différents polluants et leurs évolutions.
<https://www.airparif.asso.fr/pollution/differents-polluants>, consultée le 8 juin 2018.
- [2] airparif. Qualité de l'air à Hanoï : signature d'un accord de partenariat entre la municipalité de Hanoï et airparif.
<https://www.airparif.asso.fr/actualite/detail/id/172>, consultée le 11 juin 2018.
- [3] futura tech. Simulation informatique.
<https://www.futurasciences.com/tech/definitions/informatique-simulation-informatique-11319/>, consultée le 11 juin 2018.
- [4] wikipedia. Pollution de l'air.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution_de_l'air, consultée le 11 juin 2018.
- [5] leparisien. Système multi-agents.
[Http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/systeme%20multiagents/fr-fr/](http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/systeme%20multiagents/fr-fr/), consultée le 15 juin 2018.
- [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, İlhan 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 Sorensen, 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 2018.
- [27] Konstantinos E Kakosimos, Ole Hertel, Matthias Ketznel, 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 biomonitoring and spectral analysis. *Atmospheric Environment*, 141 :347–360, 2016.
- [36] le model OSPM <http://www.dmu.dk/International/Air/Models/OSPM/>, consultée le 12 juin 2018.