

## **LE MODÈLE TUREP<sup>1</sup> : UNE APPROCHE MICRO-LOCALE DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES PAR LA CIRCULATION AUTOMOBILE EN VILLE**

CHRISTOPHE DECOUPIGNY  
NESTEAR

### **1. INTRODUCTION**

Dans un contexte d'évaluation des impacts des aménagements urbains une approche fine des processus des émissions de polluants et des conditions de circulation doit être menée conjointement à une réflexion globale initiée par les Plans de Déplacements Urbains. On perçoit bien la nécessité d'une analyse multi-échelles répondant à l'adaptation des déplacements dans un cadre urbain en évolution.

La théorie classique des graphes (BERGE, 1970) utilisée pour décrire les réseaux de transport à travers les relations entre les sommets considère les carrefours de manière homogène se traduisant par leur représentation par un point. Or l'hétérogénéité de l'espace implique une forte variabilité des condi-

---

<sup>1</sup> Trafic URbain et Emissions de Polluants.

tions de circulation et donc des émissions. Une approche par les graphes cellulaires (LANGLOIS, PHIPPS, 1997) et les Systèmes Multi-Agents (SMA) (FERBER, 1997) est utilisée pour décrire finement l'espace et la dynamique des automobilistes. Cette association espace/comportement des agents permet d'affiner l'estimation et la localisation des émissions de polluant en milieu urbain.

La technique des graphes cellulaires (MATHIS, 2006) autorise la transformation algorithmique d'un graphe quelconque (arcs et sommets) en graphe cellulaire dont chaque cellule est de la taille moyenne d'un véhicule. Cette description fine du réseau permet de localiser des aménagements particuliers comme un dos d'âne ou une zone trente et de définir précisément le plan de circulation (stop, feux, cédez le passage...), ce qui permettra d'estimer les effets de ces différents éléments en matière d'émission.

Un SMA est développé pour simuler les déplacements des véhicules sur le graphe en fonction de règles de circulation basées sur le principe que l'objectif premier d'un agent est d'arriver à destination en vie tout en respectant l'intégrité du véhicule. L'avancement d'un agent sera conditionné par les contraintes variables imposées par le trafic dans l'environnement proche de l'agent (densité du trafic, vitesse du flux) et par les contraintes fixes imposées par le réseau (rayon de courbure, présence d'un feu ou d'un stop imposant une vitesse nulle au stop...). Cette approche permet de localiser très finement les émissions de polluants et de mesurer les impacts de certains aménagements de la voirie.

Notre démarche se démarque des modèles d'estimation des émissions comme Impact ADEME<sup>2</sup>, TURBAN (FLAVIGNY et al., 1996) ou encore STREET<sup>3</sup>, basés pour la plupart sur la méthodologie élaboré par COPERT<sup>4</sup>. Ces modèles, couplés ou non à un modèle de trafic ou à un Système d'Information Géographique (SIG) ont une résolution limitée (le tronçon). Ils associent une vitesse moyenne à un type de trafic (urbain lent ou autoroutier...) et affectent sur un espace les émissions estimées, en d'autres termes le trafic (conditions de circulation) conditionne la vitesse des véhicules. On part de l'hypothèse que le réseau (sa forme et son plan de circulation) contraint dans un premier temps la vitesse des véhicules, les conditions de circulation n'intervenant que dans un second temps.

Les exemples présentés dans cet article servent à illustrer l'approche théorique utilisée dans le modèle TUREP. Il faut préciser que les résultats n'ont pas été confrontés avec les données observées.

---

<sup>2</sup> Le logiciel IMPACT-ADEME permet de connaître, sur une voirie, les consommations énergétiques ainsi que les émissions de polluants et de gaz à effet de serre liées à la circulation routière.

<sup>3</sup> Street v4.1 : Targeting, Tumwelt Service 1999.

<sup>4</sup> *Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport*, European Environment Agency.

## 2. DESCRIPTION DU MODÈLE TUREP

Le modèle TUREP<sup>5</sup> permet d'estimer et de localiser les émissions de polluants des véhicules sur un réseau urbain. De nombreux modèles utilisent la vitesse moyenne pour estimer les émissions. L'utilisation de la vitesse moyenne apparaît pertinente à l'échelle annuelle ou sur un réseau autoroutier sur lequel les vitesses instantanées sont proches de la vitesse moyenne. La circulation en ville se caractérise par des vitesses variables s'étalant de zéro à 50 km/h sur de faibles distances. La vitesse instantanée apparaît plus pertinente pour rendre compte de l'impact des changements d'allures sur les émissions.

Les liens entre la description d'un réseau et la vitesse des véhicules sont abordés à travers un graphe cellulaire et un SMA.

### 2.1. GRAPHE CELLULAIRE ET RÉSEAU DE TRANSPORT

Le graphe sommital et la dualité des graphes (BERGE, 1970) sont utilisés pour modifier les éléments constitutifs d'un graphe classique (aussi bien les arcs que les nœuds) en graphe cellulaire proposant une description beaucoup plus fine d'un réseau de transport.

La longueur des cellules est fixée à cinq mètres, longueur moyenne de l'espace utilisé par une automobile à l'arrêt. Cette longueur tient compte de la longueur du véhicule mais également de l'espace réellement occupé par un véhicule à l'arrêt dans un trafic, malgré la taille variable des véhicules en fonction des gammes.

La longueur d'un arc est divisée par cinq, la partie entière du quotient donnant le nombre de cellules. La transformation des nœuds se base sur l'hypothèse que le nombre de cellules d'un nœud dépend du nombre d'arcs et/ou des voies connectés au sommet (MATHIS, 2003).

La Carte 1 traduit le résultat de cette transformation sur le réseau du quartier Prébendes de la ville de Tours. On y retrouve le graphe à l'origine de la transformation cellulaire (CHAPELON, 1997), et le graphe cellulaire lui-même. Le graphe classique détaillé dans le cartouche de la carte se compose de 103 nœuds ou carrefours et de 243 arcs. Le graphe cellulaire obtenu est orienté, non plan<sup>6</sup> et non planaire<sup>7</sup>.

La description de l'espace ne doit pas se restreindre aux caractères physiques du réseau comme la longueur ou le nombre de cellules par nœuds représentatifs du nombre de rues branchées sur l'arc mais également aux caractéris-

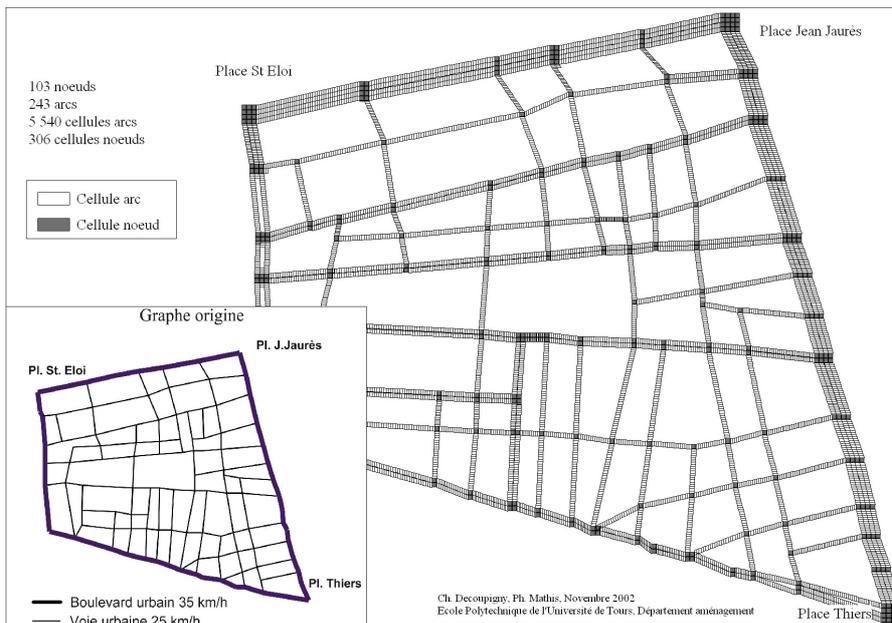
<sup>5</sup> Le modèle TUREP est une extension du modèle MAP d'Alain L'HOSTIS.

<sup>6</sup> Non plan : les arcs peuvent se couper en dehors des carrefours afin de tenir compte des ponts par exemple.

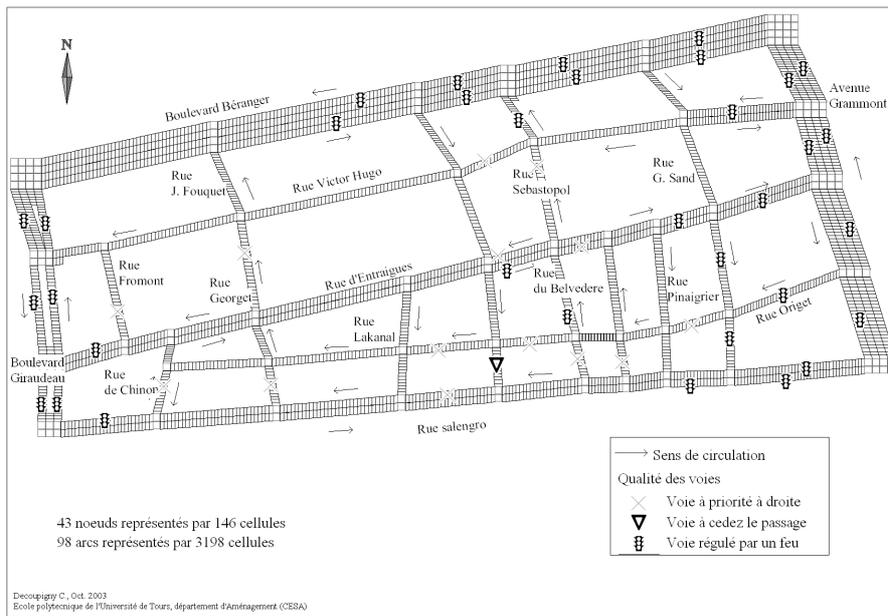
<sup>7</sup> Non planaire : l'existence d'un nœud entre plusieurs arcs ne signifie pas obligatoirement que les mouvements d'un arc à un autre soit possible.

tiques qualitatives pour prendre en compte le plan de circulation. La Carte 2 illustre le plan de circulation et la localisation des priorités sur une partie du réseau de la ville de Tours.

Carte 1 : Graphe cellulaire du quartier Thiers Prébendes à Tours



Carte 2 : Plan de circulation du graphe cellulaire du quartier Victor Hugo à Tours



Les carrefours ont à travers un graphe cellulaire une dimension spatiale supplémentaire reflétant leur taille et leur forme qui n'existe pas dans la théorie des graphes.

Par définition, un réseau de transport permet aux biens et aux personnes de relier des lieux entre eux. Dans le cas d'un réseau routier, la circulation se fait selon des règles imposées par le code de la route et la forme du réseau. Cet ensemble de règles s'intègre à un SMA qui va simuler l'avancement des véhicules sur le réseau.

## 2.2. LA CONDUITE : DES RÈGLES À RESPECTER

Par hypothèse, un trafic est composé **d'un ensemble discret** de conducteurs ou d'agents qui partagent **le même espace et le même objectif conditionnel**, celui d'arriver au point de destination sans accident, le temps de parcours ou la longueur du chemin suivi sont secondaires. On considère que l'automobiliste a un comportement **auto-centré**, puisqu'il adapte selon **son** environnement proche, **son** comportement à **son** objectif. Il tient compte des automobilistes le précédant, des contraintes imposées par l'espace (largeur de rue, rayon de courbure...) et de sa capacité à évaluer ces contraintes sans avoir de vision **rationnelle totale** du trafic.

Le SMA définit un ensemble de règles qui s'organisent autour des variables microscopiques comme les vitesses instantanées, l'accélération ou bien la distance entre deux véhicules.

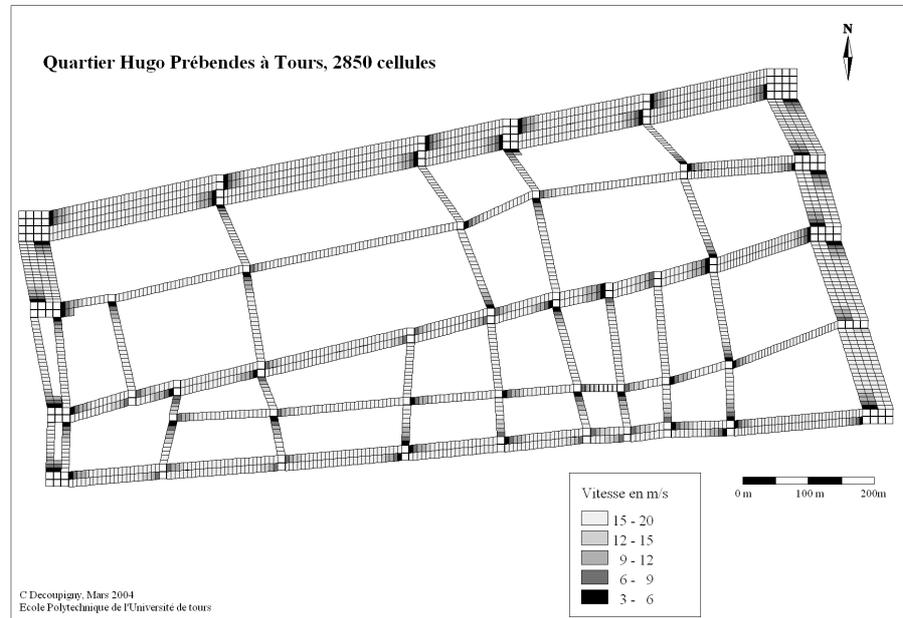
On a posé comme condition fondamentale que deux automobilistes **ne doivent pas, à un temps<sup>8</sup> donné, occuper le même espace**. Ceci implique d'une part que les situations d'accident sont dans un premier temps écartées et d'autre part que l'équation de la distance d'arrêt devient incontournable dans l'élaboration des règles de conduite.

On définit deux familles de règles (DECOUPIGNY, 2006) qui vont **régir ou guider** le comportement d'un automobiliste. La première, les **règles strictes**, combine les contraintes spatiales à certaines règles du code de la route à partir desquelles on définit un **comportement appelé limite** exprimé par des vitesses limites que les automobilistes ne peuvent pas dépasser afin de respecter le code de la route et l'intégrité du véhicule. La seconde, les **règles souples**, regroupe des règles liées à des comportements types tels que les règles de stationnement (en marche avant ou en marche arrière), de démarrage ou de dépassement. Souples, parce qu'elles offrent une liberté de choix selon le tempérament d'un conducteur. Ces deux familles de règles délimitent un espace de liberté dans lequel nos agents (les automobilistes) vont effectuer leurs trajets à différentes allures avec des comportements variés, certains limitant l'espace avec le véhicule précédent, d'autre respectant systématiquement les limites de vitesse.

<sup>8</sup> Il s'agit ici du temps employé comme un instant et non comme une durée.

Le respect des règles strictes impose aux agents une vitesse maximale en certains lieux du réseau. L'arrêt à un stop par exemple, suppose non seulement une vitesse nulle au niveau du stop mais aussi une vitesse n'excédant pas 50 km/h à 40 mètres du stop, cette distance est appelée la distance d'arrêt qui dépend principalement de la masse et de la vitesse des véhicules. On obtient alors une **représentation de la dynamique maximum des agents** sur le réseau comme le montre la Carte 3.

Carte 3 : Vitesses limites selon les trajectoires et le type de fin d'arc



Cette Carte localise les vitesses limites imposées par la forme du réseau (longueur des voies et rayon de courbure) et par le plan de circulation (stop, cédez le passage ou priorité à droite...). On n'a pas représenté sur cette carte les vitesses dans les nœuds. Dans une moindre mesure, la vitesse à l'entrée des arcs est dépendante du plan de circulation et du code de la route.

### 2.3. DE LA RELATION ENTRE L'ESPACE ET LES AGENTS AUX ÉMISSIONS

Avant d'envisager la présentation des résultats, il convient d'explicitier les relations entre le graphe cellulaire et le SMA du modèle TUREP permettant de localiser et d'estimer la quantité des émissions des polluants.

Les automobilistes vont se déplacer sur le réseau (graphe) selon les règles du code de la route et de comportements en utilisant les informations portées par le graphe comme la localisation des stops ou des feux qui vont déterminer sur le réseau les vitesses maximales (Cf. Carte 3).

Le calcul des émissions se réalise en quatre étapes, les trois premières servent

à déterminer la dynamique d'un agent dans son environnement, la dernière calcule et localise les émissions en fonction de la vitesse et de la distance parcourue.

#### *Première étape : état de l'espace*

Cette étape est l'analyse de l'état du réseau à un instant donné autour de l'agent simulé. Elle permet de localiser la position et de définir la dynamique des autres agents (vitesse instantanée, accélération, distance de freinage).

#### *Deuxième étape : dynamique de l'agent simulé*

Chaque agent fait partie d'une classe de comportement qui fixe l'accélération maximum et la distance de freinage minimum que chaque agent ne pourra dépasser. En fonction de la classe de comportement de l'agent simulé, on estime la vitesse instantanée, la distance de freinage et la distance parcourue pendant une seconde.

#### *Troisième étape : rétroactions entre l'espace et le SMA*

Cette troisième étape compare la vitesse et la distance parcourue par un agent avec les contraintes physiques imposées par le réseau et les contraintes imposées par les autres agents en posant la question suivante :

La dynamique de l'agent simulé peut-elle se réaliser dans l'espace en accord avec les règles du code de la route et du plan de circulation ?

La réponse à cette question est positive si :

- la vitesse simulée est inférieure aux vitesses limites des cellules parcourues, sinon la vitesse est définie telle qu'elle soit inférieure aux vitesses limites des cellules traversées,
- la somme de la distance parcourue entre (t et t+1) et la distance de freinage à l'instant (t+1) de l'agent simulé est inférieure à la somme de la distance de freinage observée à l'instant (t+1) de l'agent qui le précède et de la distance séparant les deux véhicules.

Ces deux conditions constituent le corpus conditionnel de base pour l'avancement d'un agent sur un arc. En fonction des actions de l'agent simulé, des conditions supplémentaires peuvent s'ajouter. A l'approche d'une priorité à droite par exemple, un algorithme estime la possibilité de passer ou non le carrefour en fonction de la dynamique des véhicules à proximité de la priorité.

Si ces conditions sont respectées alors le modèle passe à l'étape suivante, dans le cas contraire on retourne à l'étape deux.

#### *Quatrième étape : calcul des émissions*

On connaît la vitesse instantanée, l'accélération et la distance parcourue pendant une seconde de l'agent simulé. L'émission estimée à partir du couple vitesse accélération est affectée de façon homogène sur les cellules parcou-

rues pendant une seconde.

Les émissions sont calculées à partir des formules donnant les émissions en fonction de la vitesse instantanée et de l'accélération issue des recherches de l'université de Hong-Kong (CHAN et al., 2002). En Europe les données d'émissions en fonction de la vitesse proviennent du programme MEET<sup>9</sup> qui donne uniquement les émissions des véhicules en fonction de la vitesse moyenne. L'utilisation de la vitesse moyenne ne permet pas de différencier finement les émissions dans l'espace en fonction des conditions de circulation. Dans ce sens, la recherche européenne ARTEMIS<sup>10</sup> (continuité du programme MEET) s'attache entre autre à évaluer les émissions en fonction de la vitesse instantanée et de l'accélération, néanmoins les résultats ne sont pas encore publiés.

### 3. EXEMPLE DE SIMULATION DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS

On présentera les résultats directement issus de l'application du modèle comme la localisation des émissions de monoxyde de carbone du trafic.

La simulation prise comme exemple a été réalisée avec 20 agents pendant 100 secondes partant du dernier arc modélisé de l'avenue Grammont. Les carrefours situés aux intersections entre la rue Salengro et l'Avenue Grammont (feu 1), la rue Salengro et la rue George Sand (feu 2), la rue George Sand et la rue d'Entraigues (feu 3) possèdent un feu en fin de section fixé au vert au départ de la simulation. Il existe également une priorité à droite à respecter sur le trajet entre la rue Salengro et Pinaigrier.

Le modèle permet de localiser les émissions de polluant générées par la circulation de ces agents comme le montre la Carte 4.

Les émissions se concentrent aux extrémités des rues correspondant aux phases d'accélération ou d'arrêt pour celle située proche d'un feu rouge par exemple. La quantité de polluants émis dépend de la dynamique des agents mais aussi de leur nombre.

Les émissions dans les carrefours sont comme pour les arcs très différentes selon la localisation. Le nombre de véhicules intervient puisque l'on observe de fortes disparités entre le carrefour à fort trafic (avenue Grammont) et celui à faible trafic (rue d'Entraigues). La Carte 5 donnant le nombre d'agents traversant les cellules au cours de la simulation permet de le comprendre.

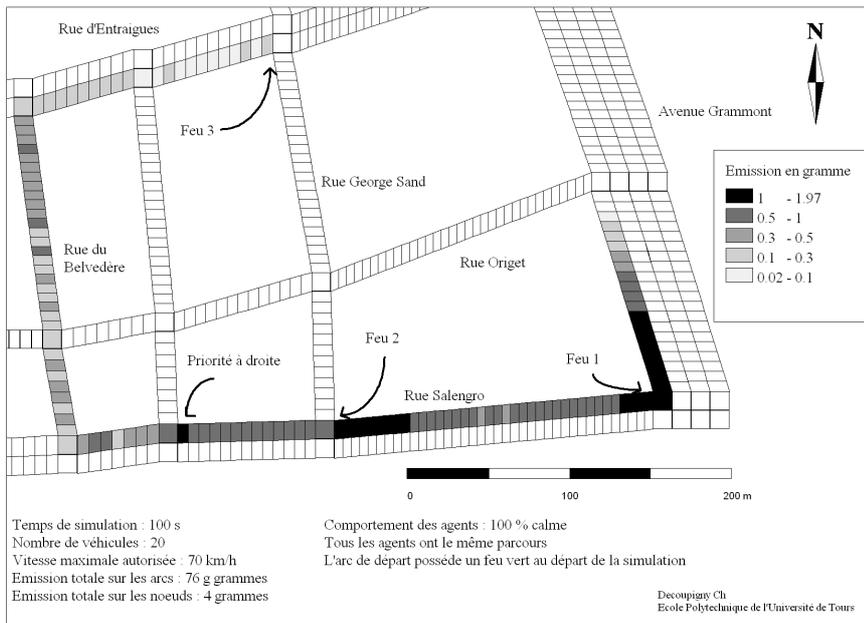
La totalité des agents est parvenue au deuxième feu. Par la suite on observe une diminution du débit par cellule, seul le premier véhicule atteint le troisième feu totalisant un parcours de 782 mètres pour une vitesse moyenne

<sup>9</sup> *Methodologies for estimating air pollutant from transport* (MEET), Commission Européenne.

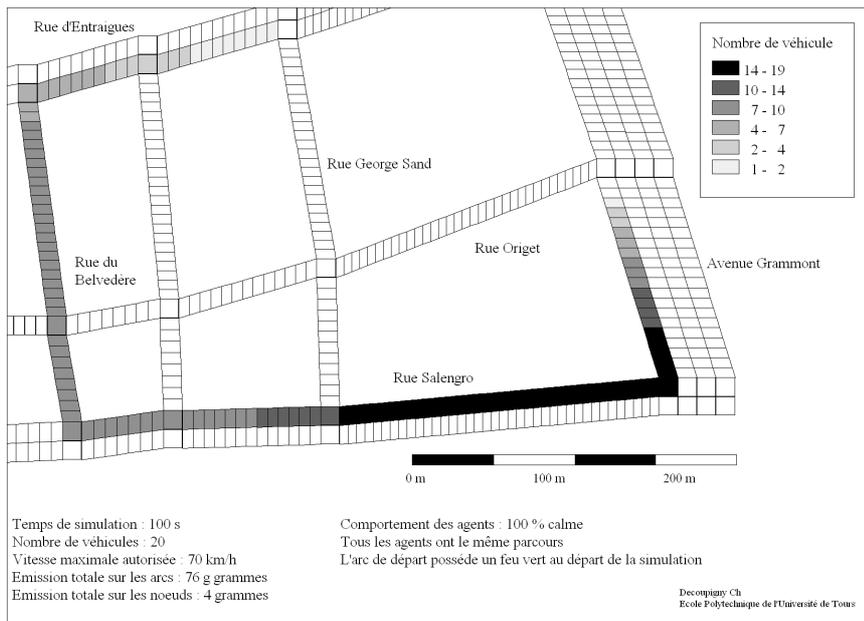
<sup>10</sup> *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems* (ARTEMIS) 1999-RD.

de 28 km/h, contre 323 mètres à une vitesse moyenne de 11,5 km/h pour le dernier véhicule.

Carte 4 : Emission de monoxyde de carbone par cellule



Carte 5 : Nombre de véhicules ayant traversé une cellule



Le premier véhicule est soumis uniquement aux contraintes liées au réseau (forme et plan de circulation), le second est soumis aux mêmes contraintes auxquelles s'ajoutent les contraintes liées au véhicule qui le précède. Deux agents faisant parti du même groupe de comportement vont avoir la même attitude face au même stimulus. Néanmoins dans un trafic, les contraintes qui s'exercent à un temps donné sur deux agents qui se suivent ne sont pas identiques. Bien que les agents circulent sur le même chemin avec le même comportement, ils présentent des dynamiques fortement différentes expliquant ainsi l'hétérogénéité de la localisation et de l'intensité des émissions.

On voit bien dans cet exemple que le nombre, la densité des agents, leur comportement à un instant donné, associés au plan de circulation modulent les interactions entre les agents et règlent l'avancement d'un flux ou d'un groupe d'agents.

Les résultats montrent que deux facteurs agissent sur la dynamique des véhicules et les émissions dans le cas où tous les individus sont mus par un même comportement :

- **les vitesses limites**, définies à partir du plan de circulation et de la forme du réseau,
- le nombre d'agents présents dans l'environnement proche des conducteurs.

Le plan de circulation, le respect des règles du code de la route vont donc brimer la vitesse des agents alors même que le véhicule est seul sur le réseau indépendamment de la densité du trafic.

#### 4. CONCLUSION

La méthode de transformation en graphe sommital puis en graphe cellulaire initiée par MATHIS (2006) et la recherche d'algorithmes de généralisation de cette méthode comme support à un SMA permet d'améliorer la localisation et l'estimation des émissions sur un réseau. De plus cette approche offre la possibilité de mesurer l'impact des réseaux sur les émissions et la dynamique des agents. Elle s'applique aussi bien à des formes simples de graphe qu'à des formes plus complexes, qu'à des graphes planaires ou non planaires, tout en respectant la théorie des graphes.

Le choix de l'échelle spatiale d'étude est une étape importante dans l'analyse des déplacements et des émissions de polluants. A l'échelle européenne, la vitesse moyenne peut être utilisée pour le calcul des émissions, en revanche à l'échelle urbaine son utilisation est plus discutable. Le graphe cellulaire permet une description fine des caractéristiques du réseau (nombre de voies, tourne à gauche, dos d'âne...), de localiser précisément les priorités afin de tenir compte du plan de circulation. L'association à un SMA offre la possibilité de localiser très finement sur le réseau les émissions de polluants et les conditions de circulation au regard de la forme du réseau et du plan de

circulation.

Il apparaît qu'une meilleure évaluation des émissions passe par une meilleure estimation de la vitesse. Les accélérations et distances de freinage fixées en relation avec des classes de comportements des agents ne reflètent pas la réalité, néanmoins cela permet de donner une image du potentiel d'un réseau à induire des émissions plus ou moins fortes. Le programme ARTEMIS visant entre autre à inventorier les émissions instantanées des véhicules permettra à ce type de modèle d'étoffer les polluants pris en compte. Partant du constat que les émissions sont proportionnelles au nombre de véhicules circulant sur **un espace**, la connaissance du potentiel d'émissions de cet espace est intéressant en termes **de prospective et d'évaluation**.

Force est de constater que la définition de règles simples de circulation des agents dans un réseau de transport finement décrit donne des résultats encourageants.

On rappelle que le but d'un modèle d'aide à la décision est de décrire l'existant en fonction d'hypothèses de travail comme le changement de feux, les priorités afin d'offrir la possibilité d'évaluer tel ou tel changement dans l'aménagement de l'espace. Il est clair qu'un modèle ne décrira que partiellement la réalité sans jamais pouvoir l'atteindre, néanmoins la mise à jour des processus amenant à une situation peut être en termes de prévision très appréciable pour l'aménagement d'un espace.

#### **BIBLIOGRAPHIE**

ADEME (2004) **Logiciel Impact Ademe**. 72 p. (Coll. connaître pour agir).

BERGE C. (1970) **Graphie**. Paris, Dunod, 400 p.

CHAN T.L., DONG G., NING Z., HUNG WT, CHEUNG C.S., LEUNG W. (2002) On-road sensing of petrol vehicle emissions measurement and emission factors estimation for urban driving patterns in Hong Kong. **Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities**, 16 Décembre.

CHAPELON L. (1997) **Offre de transport et aménagement du territoire, évaluation spatio-temporelle des projets de modification de l'offre par modélisation multi-échelles des systèmes de transport**. Tours, Université de Tours, Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement, 558 p (Thèse d'Aménagement et d'Urbanisme).

DECOUPIGNY C. (2006) **Modélisation fine des émissions de polluants issues du trafic en milieu urbain**. Tours, École Polytechnique de l'Université de Tours, 393 p. (Thèse d'Aménagement et d'Urbanisme).

DOBIAS G. (2003) **Vers la voiture automate ; circulation et sécurité**. Paris, Hermès, 298 p.

FERBER J. (1995) **Les systèmes multi-agents**. Paris, Inter Edition, 522 p.

FLAVIGNY P.O., HUBERT J.P., JOUMARD R., LEJEUNE B. (1996) **Organisation du logiciel Turban. Logiciel de calcul des émissions de polluants dus aux transports dans les agglomérations, Outils et Méthodes N°2.** Paris, Inrets.

HIVERT L. (1999) **Le parc automobile des ménages, études en fin d'année 1999 à partir de la source «Parc Auto » SOFRES.** Rapport de convention ADEME-INRETS, 180 p.

JOUMARD R. (1999) **Methods of estimation of atmospheric emissions from transport European scientist network and scientist state of the art.** Inrets report n°LTE 9901, Bron and Européan Commission, DG transport, 158 p.

L'HOSTIS A. (1997) **Images de synthèse pour l'aménagement du territoire : la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapide.** Tours, Université de Tours, Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement (Thèse d'Aménagement et d'Urbanisme).

MATHIS Ph. (2003) **Graphes et réseaux : modélisation multiniveaux.** Paris, Editions Hermès, 360 p. (Première édition).

MATHIS Ph (2007) **Graphs and networks: multilevel modelling.** Paris, Editions Hermès, 320 p. (Seconde édition).