
Le modèle SCAUP : Simulation multi-agents à partir de données de CApteurs Urbains pour la Pollution atmosphérique automobile

The SCAUP model: Multi-agent simulation from Urban sensors for traffic air pollution

Justin Emery, Nicolas Marilleau, Nadège Martiny et Thomas Thévenin

Les auteurs tiennent à remercier les évaluateurs anonymes pour les commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer grandement cet article.

Introduction

- 1 Congestion, augmentation des accidents, dégradation de la qualité de l'air, ces maux associés aux difficultés du trafic routier ont conduit les agglomérations à investir dès la fin des années 1990 dans des Systèmes de Transport Intelligents (STI). Ainsi, depuis plus de 20 ans, des centaines voire des milliers de capteurs enregistrent en continu les déplacements sur l'ensemble des axes routiers des agglomérations pour assurer la gestion des carrefours à feux et détecter les incidents repérés sur la voirie. Utilisé quotidiennement d'un point de vue opérationnel, ce patrimoine dormant d'une richesse spatiale et temporelle exceptionnelle (Batty, 2013) est principalement utilisé comme une simple variable d'ajustement des modèles de prévision de trafic.
- 2 Les leaders européens du marché des logiciels de prévision de trafic (macro-échelle), Visum ou Aimsun, utilisent les données de comptage pour calibrer la distribution des données des matrices Origine-Destination : O-D (Bonnell, 2010 ; Ortúzar, Willumsen, 2011 ; Commenges, 2013). Toutefois, la constitution de ces matrices O-D reste une opération délicate, souvent agrégée à l'échelle de vastes zones en heures pleines ou creuses de fréquentation des routes. D'autres modèles commerciaux

intègrent directement les comptages routiers mais sous la forme de matrice O-D permettant ensuite de simuler le trafic routier à l'échelle microscopique : Aimsun (Casas, Ferrer, Garcia, Perarnau, Torday, 2010), Paramics (Sykes, 2010) ou Vissim (Fellendorf, Vortisch, 2010). Ces différentes solutions, qui sont basées sur la constitution d'une matrice O-D, s'appliquent aisément sur des sections autoroutières ou des carrefours dont les entrées et sorties sont bien couvertes par des capteurs de comptages, mais elles montrent leurs limites dès lors qu'elles sont appliquées sur l'ensemble d'un réseau urbain (Antoniou *et al.*, 2014).

- 3 Pour s'affranchir de ces différentes contraintes, cet article propose de replacer les données de comptage au cœur du processus de simulation du modèle SCAUP : Simulation multi-agents à partir de données de CApteurs Urbains pour la Pollution atmosphérique automobile. L'objectif est de simuler un trafic routier observé pour une journée donnée, au pas de temps minute et à l'échelle intra-urbaine. Sa finalité est de cartographier la dynamique générée par le trafic routier en ville à un instant donné, afin de mieux comprendre la morphologie du trafic d'une part, et d'affiner les données d'entrées nécessaires aux calculs des émissions de polluants atmosphériques automobile d'autre part. En effet, le trafic routier est un contributeur majeur à la pollution urbaine (Host, Duchesne, 2017) et ses impacts sanitaires en font un risque important en milieu urbain (Khreis *et al.*, 2016). À cette fin, le parti-pris de cette approche est fondé sur cinq grands principes :

- La recherche d'un trafic émergent étant un objectif central, le cadre théorique des systèmes multi-agents est mobilisé tout au long de la démarche ;
- Il s'agit d'une démarche résolument guidée par les données (Hassan, Antunes, Pavón, Gilbert, 2010 ; Hassan, Pavón, Antunes, Gilbert, 2010) de comptages directement insérées en entrée du modèle (au contraire d'autres modèles microscopiques, ces données de comptage ne seront pas utilisées pour construire une matrice O-D) ;
- La formalisation d'un modèle agent permet d'adopter une approche stylisée du trafic routier à l'échelle urbaine, c'est-à-dire sans intégrer une description fine des interactions entre les véhicules, comme les distances inter-véhiculaires, mais en s'appuyant plutôt sur les interactions entre les véhicules et leur environnement (les axes routiers) à l'échelle urbaine ;
- Les données utilisées sont des comptages routiers issus de capteurs électromagnétiques dédiés au suivi du trafic routier (Borsu, 2004). Gérés par les services de régulation du trafic routier des collectivités territoriales, ces capteurs sont des dispositifs de mesures publics et déployés dans de très nombreuses villes (Buisson, Lesort, 2010) et facilement accessibles ;
- L'évaluation du modèle SCAUP vise à comparer la répartition du trafic simulé face à une répartition du trafic mesuré. Elle sera basée sur un cas d'étude contrôlé, fondé sur un réseau théorique comprenant 48 axes routiers sur lesquels 15 capteurs de comptage ont été répartis. Ces derniers sont issus des stations de comptage du poste de contrôle routier de Dijon Métropole. L'utilisation de ces données permet, par ailleurs, de se mettre dans des conditions quasiment similaires à un cas réel sur le format des données en entrée.

- 4 La description du modèle SCAUP sera basée sur les trames ODD (Overview, Design concepts, and Details : Grimm *et al.*, 2006, 2010) et VOYELLE (AEIOU pour Agents, Environnement, Interaction, Organisation, Utilisation : Demazeau, 2003). Nous détaillerons ensuite les tests de simulation effectués (reproductibilité, calibrage et évaluation) afin d'explorer la sensibilité de SCAUP à différents paramètres de simulation (temps de déplacement, choix des routes, etc.).

Vue d'ensemble du modèle SCAUP¹

- 5 Développée avec la plate-forme de simulation multi-agents Gama-platform (Grignard *et al.*, 2013 ; Taillandier, Grignard, Gaudou, Drogoul, 2014), le modèle SCAUP vise à reproduire les mouvements de trafic routier sur l'ensemble d'un réseau routier pour une période de 24h et à un pas de temps défini à la minute (soit 1440 pas de temps pour une simulation).

Paramètres et variables d'état de SCAUP

- 6 Dans un contexte de simulation multi-agent (SMA), le trafic routier se formalise à son niveau élémentaire (Benenson, Torrens, 2004 ; Daudé, 2004) qui pour le modèle SCAUP se structure autour de trois éléments clés des systèmes agents (Demazeau, 2003) : les agents, leur environnement d'évolution et les interactions à partir desquelles émergent un trafic routier (*agents - agents et agents - environnement*).
- 7 L'environnement décrit l'infrastructure de transport et joue un rôle déterminant pour l'émergence du trafic routier, en synthétisant les conditions de circulation par des attributs généraux spécifiques aux infrastructures de transport (vitesse de déplacement, hiérarchie du réseau routier, capacité, etc.). Il s'agit d'une composante spatiale fixe (invariante) du système multi-agents permettant de formaliser les conditions de déplacement des véhicules routiers, et donc des agents, à partir de leurs descriptions (sens et vitesse de déplacements, structuration et répartition du trafic routier sur les axes de circulation, etc.).
- 8 Les agents se distinguent par deux espèces (catégories) d'agents : les « capteurs » et les « véhicules ». Tous deux localisés sur le réseau routier, ils possèdent des comportements différents. En effet, les agents « capteurs » ont une position fixe dans l'espace et permettent de générer les agents « véhicules » à partir des données de comptage. Les agents « véhicules », quant à eux, sont des entités mobiles éminemment spatio-temporelles (Langlois, 2006 ; Cheylan, 2007). Ils se déplacent dans l'environnement en respectant les conditions de circulation types sur les axes routiers (sens et vitesse de déplacement).
- 9 Les interactions, quant à elles, sont de deux niveaux et se situent entre :
 - les agents « capteurs » et les agents « véhicules » (interaction agents-agents) pour créer une population de véhicules en accord avec la réalité ;
 - les agents « véhicules » en mouvement et l'environnement « réseau routier » (interaction agents-environnement) afin de contrôler le déplacement des agents « véhicules » sur le réseau routier. Notons ici que les interactions entre les véhicules ne sont pas prises en compte à une échelle individuelle permettant de simuler des processus d'écoulement sur les axes routiers comme l'accélération ou la décélération des véhicules simulés.
- 10 Sous cet angle, le trafic routier se qualifie autant dans l'espace que dans le temps par des agents « véhicules » évoluant dans leur environnement de simulation (le réseau routier). Le caractère génératif des SMA (Epstein, 1999) apparaît ici essentiel en vue de produire un trafic routier par l'interaction entre les agents « véhicules » comptabilisés par des agents « capteurs » d'une part, et avec le « réseau routier » (l'environnement) d'autre part. L'ensemble de ces éléments en interaction doit permettre d'observer les

flux de trafic routier sur un réseau routier urbain au cours d'une journée de comptage. Enfin, à partir des comptages routiers, la trajectoire des véhicules ne peut pas être appréhendée par la définition d'itinéraires origine-destination. C'est pourquoi, pour le modèle SCAUP, nous avons fait le choix d'établir un modèle par non-énumération des itinéraires ; c'est-à-dire ne s'appuyant pas sur des itinéraires définis entre l'origine et la destination des véhicules, mais en privilégiant plutôt un déplacement des véhicules d'une intersection vers une autre intersection. Les paramètres relatifs aux trois catégories suivantes sont détaillés dans le tableau 1 :

- Le réseau routier, utilisé lors de l'initialisation de l'environnement du système multi-agents, est généré lors de la simulation et supporte l'ensemble des caractéristiques techniques et des règles de circulation ;
- La localisation des capteurs tient compte de leurs implantations type sur le réseau routier, c'est-à-dire qu'elle est représentative de la circulation sur des axes de hiérarchie similaire entre des axes très fréquentés et des axes moins fréquentés ;
- Les données de comptage sont utilisées tout au long de la simulation pour générer les agents « véhicules » au fil de l'eau. En étant rattachées à chacun des capteurs, ces données permettent de comptabiliser le nombre de véhicules présents sur les infrastructures en un instant t . Estampillées dans le temps et dans l'espace, elles fournissent l'opportunité d'alimenter le modèle avec ces données d'entrée pour simuler le déplacement des véhicules routiers.

Tableau 1 : Résumé des paramètres du modèle SCAUP

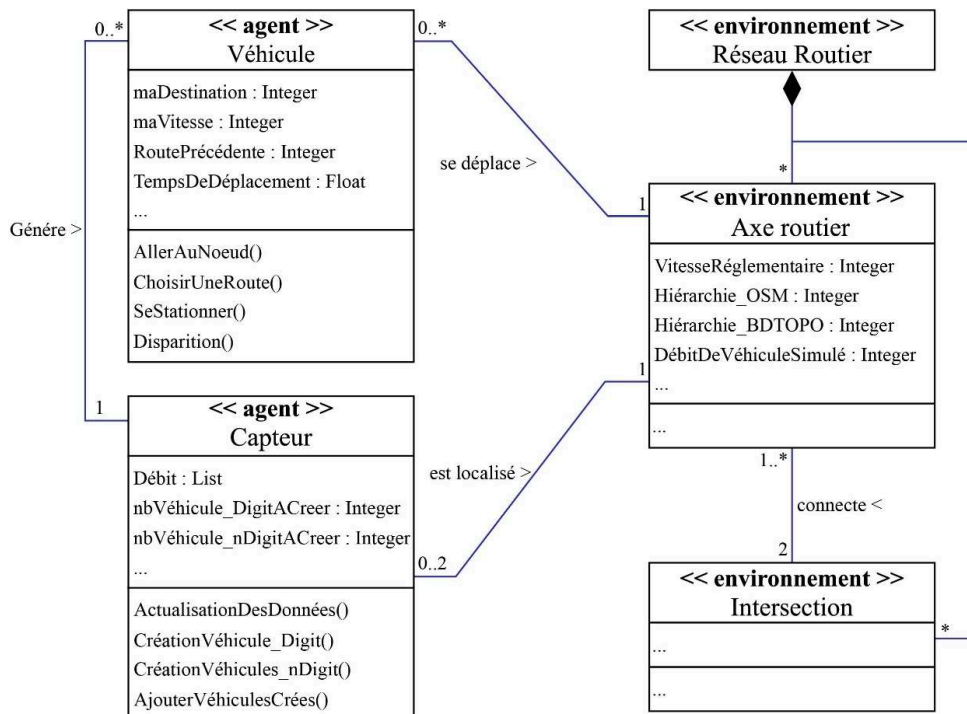
Entité	Nom des variables	Valeurs possibles	Description
Axes routiers << environnement >>	Sens de déplacement	{"B"; "FT"; "TF"}	Sens de circulation selon la digitalisation du réseau : B : Both, FT : FromTo, TF : ToFrom
	Vitesse réglementaire	{30 - 50 - 90 - 110 - 130} en km/h	Vitesse réglementaire de l'axe
	Type_OSM	[1 ;11]	Hiérarchie OpenStreetMap (des plus fortes aux plus faibles catégories) : De 1 = Autoroute à 11 = Route résidentielle
Véhicules << agent >>	Temps de déplacement	[0 ; +∞] en millisecondes	Temps de déplacement moyen du véhicule lors de la simulation
	Écart-type	[0 ; +∞] en millisecondes	Écart-type du temps de déplacement ²
	Choix des axes routier	{"Random"; "Hierarchy"}	Choix des axes à privilégier, deux choix : Aléatoire ou Hiérarchie OpenStreetMap
Capteurs << agent >>	Comptage	[0 ; +∞] en débit/ quart d'heure	Nombre de véhicules routiers par quart d'heure comptabilisé par chaque capteur électromagnétique

Global << modèle >>	Pas de temps	[0 ; 1440] en secondes	Pas de temps de la simulation (1440 secondes correspondent à 24 heures)
	TransitionChoice	[0 ; 100] matrice en %	Matrice de transition (en %) des choix routiers en lien avec les attributs "Type_OSM" des axes routiers : dimension de 11*11
	Sauvegarde	{"Yes" ; "No"}	Sauvegarde automatique de la fréquentation des axes par quart d'heure

Processus et étapes de simulation

- 11 La structure générale de SCAUP au format UML (Langage de Modélisation Unifié, ou Unified Modeling Language) est présentée en figure 1 : la dynamique temporelle est portée par les agents, à gauche, tandis que la dynamique spatiale est portée par l'environnement, à droite. Les caractéristiques spatio-temporelles du système multi-agents sont formalisées par la relation entre les agents (« capteurs » et « véhicules ») et leur environnement (« réseau routier »). Nous faisons ainsi l'hypothèse fondamentale que c'est la description du « réseau routier » (hiérarchie, vitesse réglementaire, sens de circulation, etc.) qui permet de définir les conditions de circulation et donc de déplacement des véhicules simulés. Le réseau routier est donc fondamental et central lors du processus de simulation.

Figure 1 : Diagramme UML représentant les classes du modèle SCAUP



(Auteur : Justin Emery)

Représentation de l'environnement (réseau routier) : les axes routiers et les intersections

- 12 L'environnement de simulation est constitué de l'ensemble des infrastructures de transport permettant le déplacement des véhicules routiers dans l'espace d'étude et exclut, par nature, l'ensemble des réseaux pédestres ou non carrossables de la zone d'étude. Le « réseau routier » se formalise par deux éléments : les « intersections » et les « axes routiers » (figure 1). Les « axes routiers » supportent l'ensemble des informations nécessaires aux déplacements des véhicules : sens de déplacement, vitesse de déplacement, hiérarchie du réseau routier, etc. Bien que contenues dans les données géographiques, par simplification, les caractéristiques morphologiques (largeur et nombre de voies) des routes ne sont pas intégrées explicitement dans le processus de simulation. Les « intersections » permettent de représenter les relations de connexité du réseau routier. Les relations entre les intersections et les axes routiers – parcours « de ... à » (From ... To) – sont formalisées en tenant compte du sens de circulation, et donc du déplacement des véhicules sur les axes. Par exemple, un axe à double sens est identifié par la valeur B mais sera représenté comme un même axe de circulation tandis qu'une voie à sens unique sera identifiée par la valeur FT ou TF (cf. tableau 1). Ainsi nous construisons un graphe orienté sur lequel se déplacent les agents. L'ensemble de l'environnement est généré lors de l'initialisation de la simulation en intégrant les informations relatives au réseau routier comme illustré en figure 1.

Représentation des agents : les capteurs et les véhicules

- 13 L'ensemble des éléments permettant d'intégrer les agents « véhicules » sur le réseau routier est porté par l'agent « capteur ». La génération des agents « véhicules » se fonde sur l'utilisation d'un réseau de capteurs électromagnétiques implanté sur le réseau routier permettant de comptabiliser un nombre de véhicules passant par tranche de temps (débit). Les données de comptage (débit par quart d'heure) sont stockées au sein d'un tableur, comprenant les données enregistrées par chacun des capteurs du réseau de mesure. Le « capteur » est alors conçu comme un agent à part entière sous la forme d'un générateur de véhicules (cf. classe agents, à gauche de la figure 1). Ainsi, le modèle de simulation et sa dynamique sont non seulement introduits mais aussi portés par les données de capteurs.

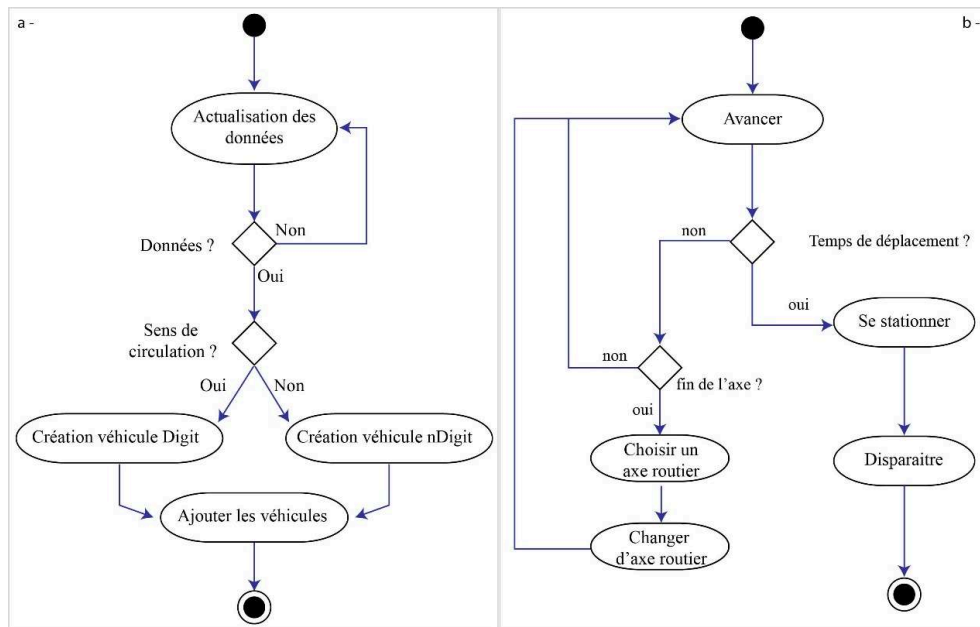
Les interactions : mise en mouvement du trafic routier

- 14 Pour illustrer la dynamique du modèle SCAUP, nous nous focaliserons sur les différents niveaux d'interactions permettant de mettre en mouvement les véhicules pris individuellement sur le réseau routier. Ces interactions sont de deux natures : entre les agents (« véhicules »/« capteurs »), entre les agents et l'environnement (« véhicules »/« réseau routier »). L'approche vise à observer un trafic routier à l'échelle d'un espace urbain. C'est pourquoi nous avons fait le choix d'adopter une approche générative ne prenant pas en compte des interactions entre les véhicules. C'est-à-dire que les interactions fines entre les agents « véhicules » comme les accélérations et décélérations ne sont pas intégrées.

Interaction entre les agents

- 15 Le premier niveau d'interaction s'opère entre les différents agents du système : les « capteurs » et les « véhicules ». La figure 2-a décrit, à travers un diagramme d'activité UML, le processus de génération des véhicules à partir des capteurs et des données associées. Le capteur permet, par le biais des débits comptabilisés qui lui sont affectés (figure 2-a), de créer les véhicules et de les localiser en tenant compte de leurs positions et de leurs sens de comptage sur le réseau routier : *digit* et *ndigit*. Ces informations correspondent au sens de comptage du capteur rapporté au sens de circulation de l'axe routier. Ainsi, quand un capteur comptabilise les véhicules en sens inverse de la digitalisation de l'axe, les agents véhicules se déplaceront en sens inverse du sens de digitalisation (*ndigit*) comme illustré en figure 2-a. Les capteurs permettent ainsi de générer les véhicules en concordance avec les débits mesurés *in-situ* (nombre de véhicules). Les données de débits étant au pas de temps quart horaire, pour affiner la résolution temporelle de la simulation à la minute, les véhicules sont uniformément générés tout au long d'un quart d'heure : par exemple, pour un débit de 15 véhicules, le capteur générera 1 véhicule toutes les minutes au lieu de 15 véhicules dès la première minute. De cette manière, le trafic routier est généré progressivement sur les axes par un processus d'accumulation des agents « véhicules » au cours de la simulation.

Figure 2 : Diagramme d'activité de la génération des véhicules à partir des capteurs (à gauche - a) et de la dynamique de déplacement des véhicules sur le réseau routier (à droite - b)



(Auteur : Justin Emery)

- 16 Cette première phase est primordiale en vue d'initialiser et de produire la temporalité du modèle SCAUP. À ce stade, les agents « véhicules » sont ajoutés et présents sur le réseau mais ne se déplacent pas. C'est l'interaction avec l'environnement qui permet le déplacement de ces agents suivant un schéma stimuli-réponse.

Interactions agents-environnement

- 17 Après leurs créations, les agents « véhicules » se déplacent sur l'environnement « réseau routier » en suivant trois comportements de déplacement sur les axes routiers décrits en figure 2-b : « avancer sur un axe routier », « choisir et changer d'axe routier », et « se déplacer et disparaître ».

« Avancer » sur un axe routier

- 18 Chaque agent « véhicule » avance sur un axe d'une intersection à l'intersection suivante en tenant compte des contraintes locales associées aux axes routiers (sens de déplacement et sens interdit, vitesses réglementaires, hiérarchie, etc.). Ainsi, les agents « véhicules » parcourent un axe routier jusqu'à la prochaine intersection puis ils choisissent et changent d'axe routier.

« Choisir et changer » d'axe routier

- 19 Le choix d'un axe routier (« choisir et changer » d'axe routier) s'appuie sur des choix probabilistes en fonction de la fréquentation mesurée et observée sur les axes routiers. Ce critère de déplacement est défini empiriquement en croisant deux informations : la fréquentation et la hiérarchie du réseau routier. En croisant ces informations, on peut alors affecter à chaque axe des catégories de fréquentation, de la plus forte (les autoroutes : catégorie 1) à la plus faible (les voies résidentielles : catégorie 4). Pour le cas d'application proposé ici, en croisant les données de capteurs (15 capteurs) selon la typologie des axes (4 catégories), on obtient une photographie de la répartition type du trafic routier pour chaque catégorie d'axe comme détaillé dans le tableau 2.

Tableau 2 : Fréquentation observée du trafic routier sur le cas d'étude proposé

Hiérarchie OpenStreetMap	Nombre de capteurs de comptage	Nombre total de véhicules/jour	Nombre moyen de véhicules/quarter d'heure	Volume observé de trafic en %
Catégorie 1	9	78867	1626,12	69 %
Catégorie 2	2	15191	313,22	13 %
Catégorie 3	3	14128	291,30	12 %
Catégorie 4	1	6344	130,80	6 %
Total général	15	114530	2361,44	100 %

(Auteur : Justin Emery)

- 20 D'une manière générale, en s'appuyant sur ces informations, on remarque que le trafic routier a tendance à se concentrer sur des axes de plus faible catégorie (catégorie 1, avec 69 % de volume observé). Le passage des valeurs de fréquentation (tableau 2 en deuxième et troisième colonnes) en variable de choix est alors appréhendé par la définition d'une matrice de transition. Chaque véhicule choisit un axe routier en

fonction de sa typologie et de la probabilité de fréquentation associée. Ainsi, pour un véhicule sur un axe X_n de catégorie i , il aura p_{ij} chance de se diriger vers un axe X_m de catégorie j à la prochaine intersection. En d'autres termes, la probabilité qu'un véhicule change de route à une intersection est donnée par la relation suivante :

$$P(X_n = i | X_m = j) = p_{ij}$$

- 21 L'ensemble des probabilités est synthétisé sous la forme d'une matrice de transition A (illustrée ci-dessous). La matrice de transition peut être un paramètre global, c'est-à-dire identique pour toutes les intersections d'un espace d'étude, ou un paramètre local, c'est-à-dire spécifique pour chaque intersection.

$$A = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots \\ p_{21} & p_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

- 22 Notons que : (i) les valeurs p_{ji} varient entre 0 et 1 en fonction des parts de trafic observées sur un espace ; (ii) la somme des valeurs sur une ligne i est égale à 1 pour toutes les catégories j (ou $\sum_j p_{ij} = 1$). Notons également que l'application d'une matrice de transition locale nécessite un volume de données couvrant toutes les intersections d'un espace. Ainsi, dans SCAUP, nous avons défini une matrice de transition pour l'ensemble des intersections de la zone d'étude, notée A_{exemple} et définie comme suit :

$$A_{\text{exemple}} = \begin{pmatrix} 0.95 & 0.03 & 0.02 & 0.01 \\ 0.58 & 0.3 & 0.08 & 0.05 \\ 0.55 & 0.10 & 0.25 & 0.10 \\ 0.65 & 0.10 & 0.15 & 0.10 \end{pmatrix}$$

- 23 À une intersection, un agent « véhicule » se déplaçant sur un axe de catégorie 2 (2^{ème} ligne de la matrice) a une probabilité de 0.3 de se rendre sur un axe de même catégorie (colonne 2 de la matrice) et une probabilité de 0.05 de se diriger vers un autre axe de catégorie 4 (colonne 4 de la matrice).
- 24 La matrice de transition A_{exemple} est calibrée par résolution inverse qui vise à approcher le poids de chaque colonne de la matrice A_{exemple} aux observations présentées dans le tableau 2. Par exemple, la somme des poids de la colonne 2 de la matrice A_{exemple} est égale à $(0.03 + 0.3 + 0.1 + 0.1) = 0.53/4 = 0.13$ (tableau 3), soit le volume observé de trafic pour les axes de catégorie 2, 13 % dans le tableau 2. Ainsi, les pourcentages présentés dans le tableau 3 doivent approcher les valeurs de fréquentation données dans le tableau 2. Actuellement, ce calibrage est réalisé manuellement.

Tableau 3 : Paramétrage de la matrice de transition

	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Total
Catégorie 1	95 %	3 %	2 %	1 %	100 %
Catégorie 2	58 %	30 %	8 %	5 %	100 %
Catégorie 3	55 %	10 %	25 %	10 %	100 %
Catégorie 4	65 %	10 %	15 %	10 %	100 %

Total	273 %	53 %	49 %	26 %	400 %
% colonnes	68 %	13 %	12 %	6 %	100 %

(Auteur : Justin Emery)

- 25 Une fois que l'agent « véhicule » a choisi un axe routier en fonction de la matrice de transition, celui-ci continue son déplacement vers une nouvelle intersection (figure 2-b). Ce processus est répété à chaque fois que le véhicule rencontre une nouvelle intersection à moins que celui-ci ne disparaisse ou se stationne.

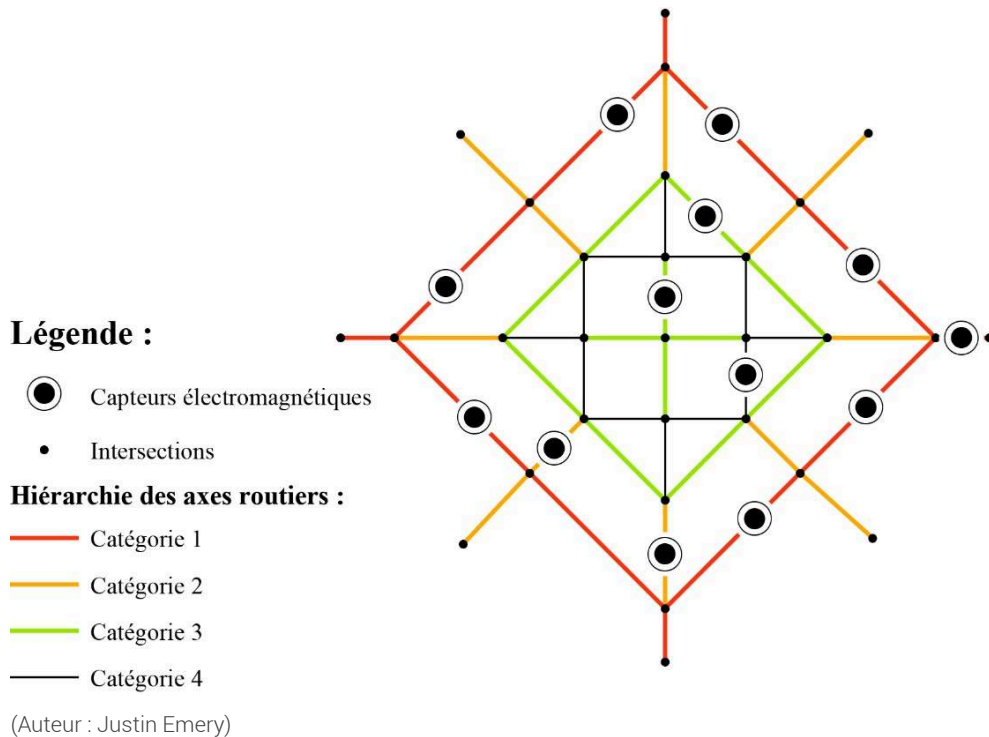
« Déplacement » et « disparition » des véhicules

- 26 Selon Hubert et Delisle (2010), il est rare de se déplacer plus d'une heure en ville. Afin d'éviter une accumulation trop importante des véhicules lors de la simulation SCAUP, il apparaît primordial de tenir compte de ce temps de déplacement en détruisant les agents « véhicules » qui ne répondent plus à cette temporalité. Deux hypothèses de sortie du réseau sont possibles (figure 2-b) : soit les véhicules disparaissent aux bordures du réseau routier (lorsque qu'ils quittent l'espace d'étude-disparition) ; soit ils se déplacent pendant un temps suffisant à l'intérieur du réseau urbain (temps de déplacement). Nous avons d'abord introduit un paramètre qualifiant la durée moyenne de déplacement des véhicules sur l'espace d'étude. Cette durée moyenne est identifiée par exploration (cf. section suivante). À sa création, chaque agent « véhicule » définit une durée de circulation par l'intermédiaire d'une loi normale centrée sur la valeur du paramètre associé à ce temps de déplacement. Ensuite, il circule sur l'environnement du système multi-agents pendant cette durée. Notons que : (i) la fin du temps de déplacement peut être assimilée à un stationnement ne tenant toutefois pas compte du nombre de places disponibles dans l'espace d'étude ; (ii) l'utilisation d'une loi normale par la définition d'un écart-type (tableau 1) ajoute de la variabilité nécessaire à une meilleure représentation des temps de déplacement des véhicules en ville (les véhicules n'ayant pas une durée de déplacement identique et ne disparaissant pas au même instant). Ce temps de « déplacement » correspond (au sens de l'implémentation) à une destruction du véhicule, alors que le premier cas (« disparition ») se rattache plutôt au trafic de transit qui traverse un espace urbain et disparaît.

Exploration et sensibilité du modèle SCAUP

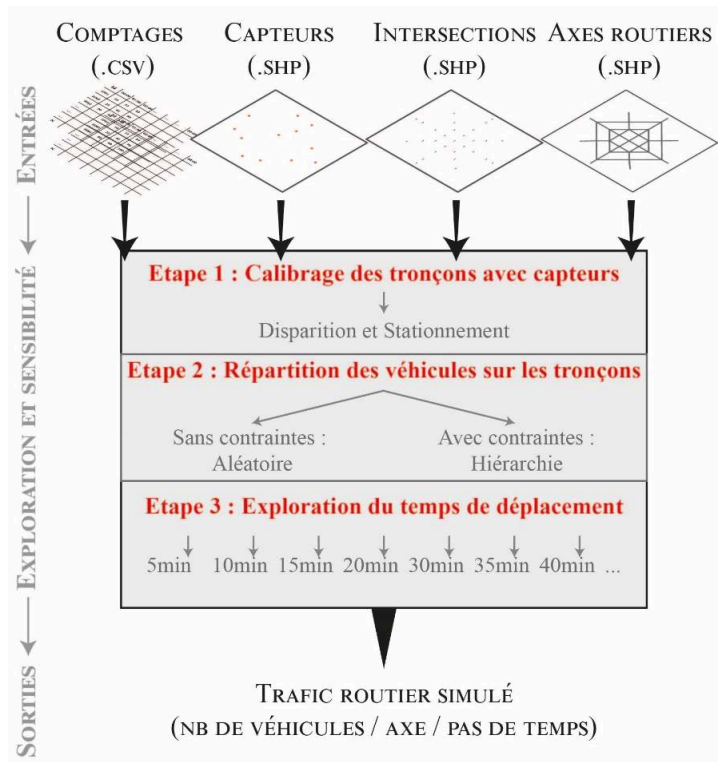
- 27 Dans cette section nous présentons le plan d'expérience qui nous a permis d'aboutir à une évaluation du modèle SCAUP. L'environnement de simulation utilisé pour cette évaluation est illustré en figure 3. L'ensemble du réseau routier présente des caractéristiques morphologiques et hiérarchiques radioconcentriques qui est « une forme relativement répandue des réseaux urbains » (Brunet, Ferras, Théry, 2005, p. 374). La couverture du réseau de comptages (30 %) correspond aux valeurs moyennes de mesures des principaux axes routiers en milieu urbain (Emery, 2016). Les données associées aux comptages sont issues d'un espace urbain réel et représentent la forme intra-journalière de fréquentation du trafic routier caractérisée en trois phases : le matin, le midi et le soir.

Figure 3 : Illustration de l'environnement de simulation utilisé pour l'exploration du modèle SCAUP



- 28 Le plan d'expérience visant à étudier la capacité et la sensibilité du modèle SCAUP à produire un trafic routier émergent dans son ensemble a été structuré en trois temps pour tester l'insertion progressive (pas-à-pas) des différents paramètres du modèle SCAUP (tableau 1 ; figure 4) :
- Étape 1 : Calibrer et contrôler la génération des véhicules au cours de la simulation et sur les axes équipés de capteurs, par l'intégration progressive des paramètres de « disparition » et de « temps de déplacement » ;
 - Étape 2 : Contraindre les déplacements des véhicules routiers sur le réseau routier par l'intégration de la matrice de transition en vue de « choisir un axe » ;
 - Étape 3 : Explorer l'impact du « temps de déplacement » au cours de la simulation.
- 29 Parallèlement, la simulation pour chacun des paramétrages est répliquée 30 fois (Edmonds, Hales, 2003) dans l'optique d'observer non seulement la stabilité du modèle à produire un trafic routier émergent à partir des capteurs, mais aussi d'apprécier ses capacités à produire un signal³ cohérent autant sur le plan spatial que temporel. Afin d'observer la sensibilité du modèle SCAUP, pour chacune des étapes du plan d'expérience, un échantillon dit témoin est établi. Ce dernier intègre des paramétrages de référence et constitue une simulation de référence pour observer la sensibilité du modèle à l'intégration des différents paramètres explorés ici.

Figure 4 : Plan d'exploration et de sensibilité des paramètres du modèle SCAUP



(Auteur : Justin Emery)

- 30 À partir de ce plan d'exploration, nous avons réalisé 2 400 simulations sur le cluster du Centre de Calcul de l'Université de Bourgogne (CCUB). Chaque simulation durant en moyenne 5 minutes, le plan d'expérience a nécessité près de 200 heures de calcul. Les sorties sont ensuite exploitées et développées plus bas en vue d'analyser la reproductibilité du modèle SCAUP, le calibrage des axes routiers équipés de capteurs, l'intégration de la matrice de transition et les variabilités de fréquentation des axes routiers dues à l'insertion du temps de déplacement.

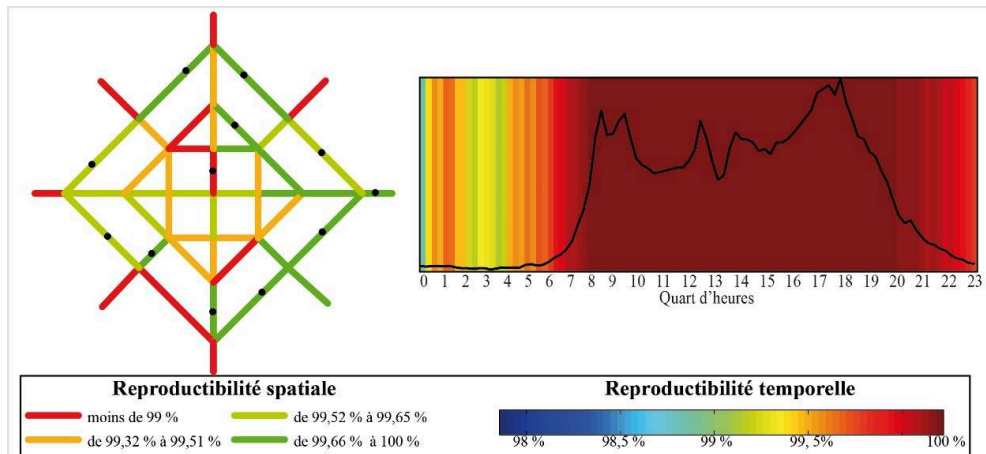
Reproductibilité spatio-temporelle du modèle SCAUP

- 31 Il s'agit d'analyser la stabilité et la sensibilité du modèle à reproduire un trafic routier similaire à celui observé par les capteurs de trafic routier. Pour cela, les répliques des différents paramétrages testés (figure 4) sont comparées et leur reproductibilité analysée. Un signal est alors dit reproductible, lorsque le même signal de trafic routier (un même nombre de véhicule simulé par axe et par quart d'heure) est observé pour chaque simulation. L'indice de reproductibilité de ce signal tend alors vers 100 %. À l'opposé, la non-reproductibilité du trafic routier se caractérise par une différence marquée entre les simulations face à la variance totale de l'ensemble des simulations (indice tendant vers 0 %). En d'autres termes, la reproductibilité est calculée comme un ratio signal sur bruit, entre la variance d'une réplique et la variance totale de toutes les répliques : l'indice de reproductibilité habituellement utilisé en climatologie pour analyser la sensibilité des modèles de climat à reproduire des phénomènes climatiques (par exemple Pohl, 2015) a été adapté ici pour analyser la sensibilité du modèle SCAUP. Il permet d'évaluer la robustesse des sorties autant sur le plan spatial que temporel.

$$\text{Reproductibilité} = \frac{\text{Variance moyenne de l'ensemble (1 réplication)}}{\text{Variance totale (N réplifications)}}$$

- 32 La synthèse de ces premiers résultats (figure 5) indique une reproductibilité moyenne du trafic routier simulé de 95,3 % sur le plan spatial (à gauche) et de 94,6 % sur le plan temporel (à droite). D'une manière générale, ce premier constat montre une performance satisfaisante du modèle SCAUP.

Figure 5 : Analyse de la reproductibilité spatiale (à gauche) et temporelle (à droite) du modèle SCAUP (30 réplifications)



(Auteur : Justin Emery)

- 33 De manière plus détaillée, le modèle présente une reproductibilité que l'on peut qualifier de stable, autant sur le plan spatial (indice allant de 99 % à 100 %) que temporel (de 80 % à 100 %). Spatialement, l'indice montre que la fréquentation des axes routiers reste relativement similaire en termes de variance entre les différentes réplifications. Dans ce sens, les débits simulés sur les axes routiers entre chaque membre présentent des valeurs de fréquentation qui sont reproduites dans plus de 99 % des simulations répliquées. Ainsi, le caractère stochastique présente un impact modéré sur les simulations. Malgré tout, on observe que les valeurs de reproductibilité se répartissent de manière hétérogène sur les axes routiers, sans présenter de logique spatiale. Ce constat est à nuancer dans le sens où les valeurs inférieures à 99 % (en rouge) présentent un taux de reproductibilité qui demeure de bonne qualité, en étant toujours supérieur à 97 % de reproductibilité.
- 34 Sur le plan temporel, on observe deux périodes distinctes : la première période correspond à l'initialisation et au lancement de la simulation ; la seconde période représente les périodes de fréquentation. L'augmentation de l'indice de reproductibilité (période 1) tend à illustrer le processus d'accumulation progressif des véhicules lors du processus de simulation. Pour ces deux périodes, on observe un différentiel entre la nuit (de 20 h à 6 h, avec une faible fréquentation) et la journée (de 6 h à 20 h, avec une plus forte fréquentation), ce qui fait naturellement diminuer l'indice de reproductibilité en termes de variance entre ces deux moments de la simulation. Ce dernier résultat montre que les conditions initiales de simulation divergent jusqu'à ce que le trafic routier augmente en début de journée. Ensuite, l'ensemble des simulations

apparaît stabilisé en termes de fréquentation temporelle, illustrant la capacité du modèle à reproduire la dynamique intra-journalière du trafic routier.

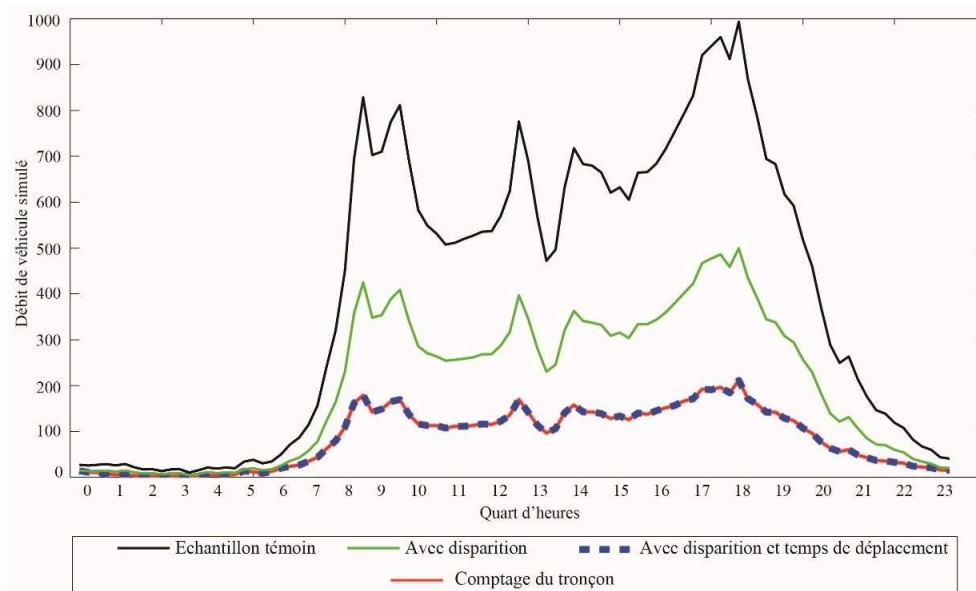
- 35 De surcroît, l'indice de reproductibilité, permettant d'observer l'amplitude des courbes intra-journalières entre chaque réplication, montre que le phasage des courbes matin, midi et soir est appréhendé d'une façon similaire. Ce dernier constat est à relier à la génération des véhicules. En effet, les conditions d'initialisation et de simulation du modèle étant reliées à la dynamique des comptages, les simulations suivent forcément la forme générale de la courbe intra-journalière. On peut alors en conclure qu'au niveau temporel le modèle conserve et reproduit correctement le signal issu des comptages routiers lors du processus de simulation. Cette première expérimentation nous a montré que le modèle SCAUP est stable et reproductible en termes de nombre de véhicules simulés.
- 36 Malgré tout, si la stabilité du modèle de simulation est excellente (proche de 100 %), il apparaît que le nombre de véhicules simulés sans paramètre est 5 fois plus important que le nombre de véhicules comptés sur un axe équipé d'un capteur fixe. Dans la suite, la simulation du nombre de véhicules sur un axe avec capteur constituera une référence pour les tests de sensibilité suivants. L'objectif est ici d'observer les réponses du modèle à l'intégration de différents paramètres présentés en tableau 1 et en figure 4.

Calibrage et évaluation des données produites aux capteurs

- 37 Il s'agit de calibrer et de s'assurer que le modèle produit le bon nombre d'agents « véhicule » sur les axes routiers pour lesquels on dispose des données de comptage. Pour cela, nous réalisons une analyse croisée en supprimant un capteur du modèle et en comparant le nombre d'agents « véhicule » circulant sur l'axe routier par rapport aux données du capteur qui a été retiré lors de la simulation. Le calibrage des axes routiers a été réalisé pas-à-pas, par validation croisée, en analysant la capacité du modèle à conserver la mesure exacte associée à un axe équipé du capteur (illustrée en tirets bleus en figure 6). Chacune des courbes illustre l'introduction d'un nouveau paramètre lors du processus de simulation (figure 4 et 6) : en noir, la simulation est réalisée sans « disparition » et sans « temps de déplacement » (échantillon témoin) ; en vert, la « disparition » des véhicules est introduite ; en rouge, l'insertion du temps de « déplacement » des véhicules défini pour les premiers tests à 30 minutes pour 24 heures de simulation.
- 38 Tout d'abord, on remarque que la prise en compte de la « disparition » permet de mieux maîtriser les entrées et les sorties des véhicules sur le réseau. On note ainsi une diminution du débit de véhicules simulé d'un facteur 2. L'introduction du temps de déplacement permet quant à lui de diminuer de nouveau de moitié le débit de trafic entrant sur le réseau routier. La combinaison des deux paramètres permet d'ajuster les valeurs de trafic simulées aux valeurs de trafic observées à travers les capteurs. Ainsi, pour chaque axe équipé de capteur de trafic, le degré de liberté du modèle de simulation est progressivement contraint dans l'optique d'être en adéquation avec les données de comptage utilisées en entrée de la simulation. C'est une illustration du calibrage d'une simulation guidée par les données qui, à notre sens, ne peut être qu'envisagé par une analyse exploratoire. Ainsi, chacun des tests permettent d'affiner le calibrage des paramètres associés au modèle. Pour finir, cette seconde

expérimentation montre qu'il est important d'intégrer la « disparition » et le « temps de déplacement » au sein du modèle SCAUP.

Figure 6 : Calibrage des axes possédant des stations de mesure (moyenne des 15 axes équipés de capteurs)

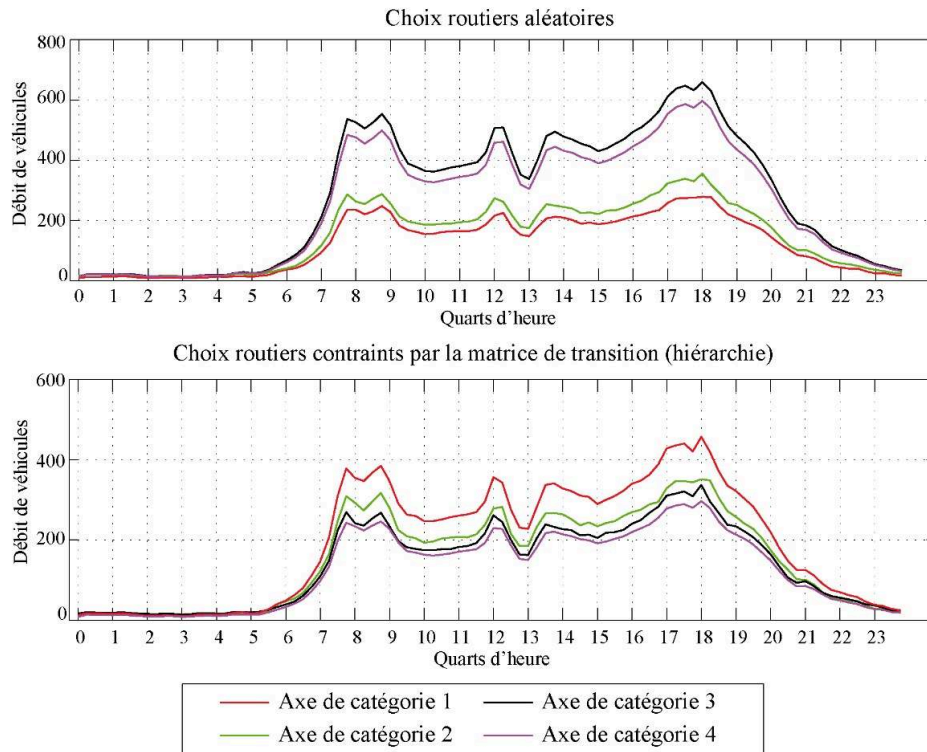


(Auteur : Justin Emery)

Analyse des comportements de choix des axes routiers par les agents « véhicules »

- 39 Il s'agit ici d'analyser l'impact et le calibrage de la matrice de transition sur le comportement des agents « véhicules » afin qu'ils se répartissent et fréquentent au mieux les axes routiers. Pour cela, nous comparons les résultats des simulations produites avec comportement de déplacement « aléatoire » (échantillon témoin), de celles produites avec un comportement « hiérarchisé » par matrice de transition. Nous nous focalisons uniquement sur les résultats de simulations avec « disparition » et « temps de déplacement » (cf. section précédente). Par souci de comparabilité, les deux tests ont été réalisés avec les mêmes conditions initiales, en insérant les paramètres de « disparition » et de « temps de déplacement » (définis par défaut à 30 minutes) explorés précédemment. La synthèse de ces tests de simulation par typologie est présentée en figure 7, où chaque courbe correspond au débit simulé pendant 24 heures par catégorie d'axe routier.

Figure 7 : Simulation du trafic routier sans (en haut) et avec (en bas) contraintes des choix routiers (moyenne des débits simulés pour les 30 répliques)



(Auteur : Justin Emery)

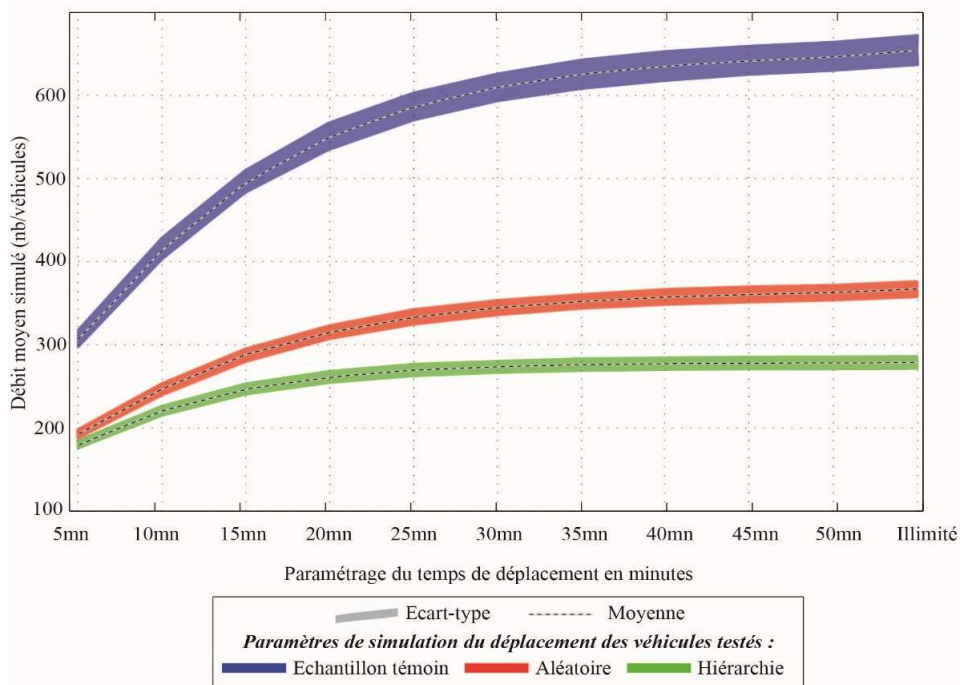
- 40 Le premier test avec choix aléatoire des axes routiers (figure 7 en haut) montre un résultat contre-intuitif car les axes de plus faible catégorie (3 et 4), qui devraient concentrer le moins de trafic, concentrent trois fois plus de véhicules que les autres catégories. En somme, on ne retrouve que peu de cohérence via ce premier test de simulation. Ici, l'insertion des choix routiers (figure 7 en bas) montre que la contrainte liée aux préférences des véhicules permet de hiérarchiser de manière satisfaisante les axes fréquentés par les véhicules, en allant des axes de plus forte catégorie vers ceux de plus faible catégorie. De surcroît, le nombre de véhicules fréquentant les axes est plus homogène que lors du test précédent. L'erreur relative moyenne entre la répartition des véhicules par catégorie de route passe de $-45,7\%$ à $-14,25\%$ avec l'introduction de la matrice de transition. Ce premier constat est à nuancer car si nous nous focalisons sur l'erreur relative en fonction de chaque catégorie d'axe, l'indicateur nous montre que la répartition spatiale des véhicules n'est pas parfaite, en particulier sur les axes de catégorie 2 dont l'erreur relative passe seulement de -75% à -69% . Tandis que pour les routes de catégorie 4, l'indicateur présente des résultats plus commodes avec une erreur relative passant de -53% à -19% . Enfin, pour les routes de catégorie 1 et 3, les erreurs relatives montrent des résultats moins tranchés avec une erreur relative respective de $+19\%$ et $+15\%$. On note qu'à l'inverse des deux autres estimations le trafic routier simulé sur ces axes est supérieur aux données d'observation. Ce résultat montre que le modèle reproduit correctement la répartition des flux de trafic routier sur plusieurs axes mais plus difficilement sur l'ensemble du réseau routier. Néanmoins, cette troisième phase d'expérimentation montre l'intérêt et l'importance de la matrice de transition afin de mieux répartir les agents « véhicules » sur le réseau routier. Il

apparaît primordial de considérer un déplacement des agents « véhicules » qui ne soit pas aléatoire et donc contrôlé. Les contraintes du réseau routier, associées aux déplacements des véhicules, permettent de mieux appréhender leurs destinations par cette interaction entre agents et environnement. Il est à noter que l'introduction de la matrice de transition augmente sensiblement le temps de simulation passant de 3 minutes à 6 minutes, soit 100 % de temps de simulation supplémentaire. En effet, à chacune des intersections, chaque véhicule interroge, d'une part, les axes qui sont à sa disposition, et d'autre part, la matrice de transition pour choisir l'axe routier qui lui est le plus adéquat.

Explorer les temps de circulation sur le réseau routier

- 41 Il s'agit ici d'explorer le paramétrage du « temps de déplacement » afin de connaître sa valeur optimale et son impact sur le nombre de véhicules simulé. Pour cela, nous avons exploré une gamme de valeur pour plusieurs échantillons : (i) échantillon témoin, avec mouvement aléatoire et sans temps de déplacement et disparition ; (ii) aléatoire, avec mouvement aléatoire, temps de déplacement et disparition ; (iii) hiérarchique, avec mouvement fondé sur la matrice de transition, temps de déplacement et disparition.
- 42 Défini par défaut à 30 minutes, il apparaît important d'étudier la pertinence de ce choix de temps de déplacement. Un dernier test a ainsi été mis en place en faisant progressivement varier ce paramètre de temps par pas de temps de 5 minutes, pour les trois conditions d'échantillons testés (figure 8). Si le débit de véhicules simulé augmente sensiblement à mesure que le paramètre de temps de déplacement augmente (en abscisse de la figure 8), on observe qu'à partir de 30 minutes le débit simulé tend à se stabiliser pour les trois conditions initiales de simulation testées. Ceci est d'autant plus vrai pour l'échantillon associé à la hiérarchie du réseau routier (en vert).
- 43 Lorsque ce temps n'est pas établi (« illimité » en figure 8), le débit simulé est proche de celui simulé à 30 minutes de déplacement. Ainsi, si ce paramètre a un impact sur le nombre de véhicules simulés, dans le cas de ce réseau routier d'une taille de 48 axes, le temps de déplacement maximal de 30 minutes semble tout à fait justifié. Cette dernière expérimentation nous a alors permis de définir une valeur par défaut du temps de déplacement qui s'élève à 30 minutes. En effet, le calcul du taux d'évolution du débit moyen simulé entre un stationnement défini à 15 minutes et un stationnement de 30 minutes est de l'ordre de 20 % ; alors que le taux d'évolution du débit moyen simulé entre un stationnement défini à 30 minutes et un de 45 minutes est de l'ordre de 5 % quel que soit les conditions initiales testées. Par conséquent, au-delà de 30 minutes, plus le temps de stationnement augmente plus cette différence de débit diminue.
- 44 Notons que la taille du réseau routier sur lequel les véhicules se déplacent est ici de taille réduite (48 axes) ; ce qui peut aussi avoir une conséquence non-négligeable lors du processus de déplacement et de disparition des véhicules positionnés en marge du réseau routier. Un temps de déplacement plus important est alors préconisé lors de tests sur un réseau routier plus important.

Figure 8 : Variation du temps de déplacement (en abscisse) pour trois conditions initiales de simulations (moyenne des débits simulés pour les 30 répliques)



(Auteur : Justin Emery)

- 45 La figure 8 apporte également une information relative au paramètre des choix routiers. En effet, si on observe la courbe de choix hiérarchique (en vert) par rapport aux deux autres conditions initiales de simulation, on peut voir que l'écart-type reste très faible par rapport aux deux autres conditions initiales de simulation. Le débit moyen de véhicules simulé est également deux fois moins important que lors d'un mouvement totalement aléatoire des véhicules. Ce dernier résultat tend à montrer que les débits de trafic routier se répartissent plus uniformément sur l'ensemble du réseau routier que lors des deux autres conditions initiales de déplacement des véhicules. On remarque d'ailleurs que le taux d'évolution du débit de véhicules simulé est faible lorsque le réseau est hiérarchisé, et ce, même lorsque l'on considère des temps de déplacement inférieurs à 30 minutes. Le modèle montre ainsi de nouveau sa sensibilité à l'insertion de la matrice de transition, qui permet de mieux en mieux appréhender la répartition spatiale des véhicules sur le réseau routier.

Conclusion

- 46 Cet article présente une approche expérimentale de simulation multi-agents du trafic routier en milieu urbain en s'appuyant sur un réseau de comptages routiers issu de capteurs urbains. Le modèle SCAUP (*Simulation multi-agents à partir de données de CApteurs Urbains pour la Pollution atmosphérique automobile*), présenté ici, s'appuie sur une vision élémentaire du trafic routier qui se conceptualise autour de véhicules en mouvement sur le réseau routier. L'un des objectifs heuristiques de l'approche SCAUP vise à dépasser les limites liées à la constitution d'une matrice O-D habituellement employée et plus difficilement accessible, au profit de données de comptage issues des capteurs placés sur les infrastructures routières et plus facilement accessibles. L'intérêt

de SCAUP comparativement à une approche classique réside aussi dans le fait que ce modèle ne requiert l'utilisation que d'un seul type de données en entrée (comptages routiers). Son application est alors rendue plus aisée dans tous les espaces urbains disposant de comptages routier. En cela, le modèle SCAUP permet d'offrir une alternative intéressante pour simuler le trafic routier lorsqu'aucune donnée d'enquête de type O-D n'est disponible sur un territoire, notamment dans les pays en développement. Le modèle SCAUP s'inscrit ainsi dans l'optique d'une démarche généralisable et applicable à d'autres espaces urbains.

- 47 Cette approche guidée par les données a toutefois nécessité d'ajuster et d'explorer les paramètres du modèle par la simulation, en particulier pour appréhender le temps de déplacement et la répartition des véhicules sur le réseau routier. À ce niveau, les étapes de calibrage et d'évaluation proposées ont permis de montrer que le modèle SCAUP est capable de simuler/reproduire le trafic routier de manière réaliste à l'échelle d'un réseau de trafic, ici de taille modérée – 48 axes fictifs. Ces observations constituent un premier aboutissement de l'approche proposée. Dans le modèle SCAUP, les données de comptage sont employées tout au long du processus de simulation autant pour l'initialisation, le paramétrage que l'évaluation de SCAUP. En décomposant ainsi l'utilisation des données issues des capteurs, l'approche SCAUP permet de reproduire un trafic routier émergent sur une journée complète de comptage à une granularité temporelle fine : la minute. La simulation du trafic routier pourra ensuite être affinée en intégrant, par exemple, des règles de conduite (accélération, décélération) afin de considérer les phénomènes de congestion. Il est également très important d'optimiser le calibrage de la matrice de transition afin d'améliorer son impact sur la répartition des flux de véhicules sur le réseau routier.
- 48 Pour finir, il est important de replacer le modèle SCAUP dans son contexte. En effet, il s'inscrit, à terme, dans une optique opérationnelle visant à estimer les niveaux d'émissions de polluants atmosphériques associés au trafic routier. Des premiers tests encourageants ont été réalisés sur les villes de Dijon (Emery, 2016) et Marrakech (Emery *et al.*, 2017), à l'occasion de la COP22.

BIBLIOGRAPHIE

- Antoniou C., Barcelo J., Brackstone M., Celikoglu H., Ciuffo B., Punzo V., *et al.*, 2014, "Traffic Simulation : Case for guidelines", <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/30680>
- Batty M., 2013, "Big data, smart cities and city planning", *Dialogues in Human Geography*, vol. 3, num.3, 274-279. <http://dhg.sagepub.com/content/3/3/274>
- Benenson I., Torrens P.M., 2004, "Geosimulation: object-based modeling of urban phenomena", *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 28, 1-8. <https://www.wiley.com/en-fr/Geosimulation%3A+Automata+based+modeling+of+urban+phenomena-p-9780470843499>

- Bonnell P., 2010, "Estimer la demande de transport", 109-144 in *Système de transport urbain : caractérisation de l'offre et estimation de la demande*. Traité de l'IGAT. Paris, Hermes science : Lavoisier (Traité IGAT).
- Borsu M., 2004, *Les apports des nouvelles technologies pour le recueil des données de trafic*. Paris, ENTPE. http://www.cotita.fr/IMG/pdf/Rapport_Etudes_Panorama_systemes_recueil_donnees_trafic_2012.pdf
- Brunet R., Ferras R., Théry H., 2005, *Les mots de la géographie : Dictionnaire critique*. Montpellier ; Paris, La Documentation Française, 518 p.
- Buisson C., Lesort J.B., 2010, *Comprendre le trafic routier : Méthodes et calculs*. Lyon, CERTU.
- Casas J., Ferrer J.L., Garcia D., Perarnau J., Torday A., 2010, "Traffic Simulation with Aimsun", 173-232 in J. Barceló (Éd.), *Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research & Management Science. Springer New York. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-6142-6_5
- Cheylan J.P., 2007, "Les processus spatio-temporels : quelques notions et concepts préalables à leur représentation", *Les dossiers de Mappemonde « Cartographie animée »*, vol. 3, No.87-3, 21. <http://mappemonde.mgm.fr/num15/articles/art07303.html>
- Commenges H., 2013, "Socio-économie des transports : une lecture conjointe des instruments et des concepts", *Cybergeo : European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/25750?lang=fr>
- Crétat J., Macron C., Pohl B., Richard Y., 2011, "Quantifying internal variability in a regional climate model: a case study for Southern Africa", *Climate Dynamics*, vol. 37, num.7-8, 1335-1356. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-011-1021-5>
- Daudé E., 2004, "Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion", *Cybergeo : European Journal of Geography*. No.255, <https://journals.openedition.org/cybergeo/3835>
- Demazeau Y., 2003, "Créativité émergente centrée utilisateur", *Techniques et Science Informatiques*, vol. 22, No.4, 31-36. https://www.researchgate.net/publication/220575311_Creativite_emergente_centree_utilisateur
- Edmonds B., Hales D., 2003, "Replication, Replication and Replication: Some Hard Lessons from Model Alignment", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6 (4), num.4. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/11.html>
- Emery J., 2016, *La ville sous électrodes : de la mesure à l'évaluation de la pollution atmosphérique automobile*. Dijon, Université Bourgogne Franche-Comté, 412 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01436123/document>
- Emery J., Marilleau N., Martiny N., Thévenin T., Nguyen-Huu T., Badram M.A., et al., 2017, "MarrakAir : Une simulation participative pour observer les émissions atmosphériques du trafic routier en milieu urbain", Besançon, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01530981/document>
- Epstein J.M., 1999, "Agent-based computational models and generative social science", *Complexity*, vol. 4, No.5, 41-60. [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-0526\(199905/06\)4:5<41::AID-CPLX9>3.0.CO;2-F/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-0526(199905/06)4:5<41::AID-CPLX9>3.0.CO;2-F/abstract)
- Fellendorf M., Vortisch P., 2010, "Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM", 63-93 in J. Barceló (Éd.), *Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research & Management Science. Springer New York. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-6142-6_2

- Grignard A., Taillandier P., Gaudou B., Vo D.A., Huynh N.Q., Drogoul A., 2013, "GAMA 1.6: Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation", 117-131 in G. Boella, E. Elkind, B.T.R. Savarimuthu, F. Dignum, & M.K. Purvis (Éd.), *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-44927-7_9
- Grimm V., Berger U., Bastiansen F., Eliassen S., Ginot V., Giske J., *et al.*, 2006, "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models", *Ecological Modelling*, vol. 198, No.1-2, 115-126. <https://miami.pure.elsevier.com/en/publications/a-standard-protocol-for-describing-individual-based-and-agent-bas>
- Grimm V., Berger U., DeAngelis D.L., Polhill J.G., Giske J., Railsback S.F., 2010, "The ODD protocol: A review and first update", *Ecological Modelling*, vol. 221, No.23, 2760-2768. <https://miami.pure.elsevier.com/en/publications/the-odd-protocol-a-review-and-first-update>
- Hassan S., Antunes L., Pavón J., Gilbert N., 2010, "Stepping on Earth: A Roadmap for Data-driven Agent-Based Modelling", in *Proceedings of the 5th Conference of the European Social Simulation Association (ESSA08)*. Brescia, Italy. <http://epubs.surrey.ac.uk/1601/>
- Hassan S., Pavón J., Antunes L., Gilbert N., 2010, "Injecting Data into Agent-Based Simulation", 177-191 in K. Takadama, C. Cioffi-Revilla, & G. Deffuant (Éd.), *Simulating Interacting Agents and Social Phenomena*. Agent-Based Social Systems. Springer Japan. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-99781-8_13
- Host S., Duchesne L., 2017, "Quantification de l'impact sanitaire des mesures de réduction de la pollution atmosphérique : apport de la littérature scientifique", <http://irevues.inist.fr/pollution-atmospherique>. No.235, <http://lodel.irevues.inist.fr/pollutionatmospherique/index.php?id=6366&format=print>
- Hubert J.P., Delisle F., 2010, "L'allongement des déplacements quotidiens contribue à l'émergence d'espaces urbains multipolaires, tandis que la mobilité baisse au centre des grandes agglomération", 49-64 in *La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*. Service de l'Observation et des Statistiques (SOES) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD).
- Khreis H., Warsow K. M., Verlinghieri E., Guzman A., Pellecuer L., Ferreira A., *et al.*, 2016, "The health impacts of traffic-related exposures in urban areas: Understanding real effects, underlying driving forces and co-producing future directions", *Journal of Transport & Health*, vol. 3, No.3, 249-267. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214140516301992>
- Langlois P., 2006, "Approche conceptuelle de l'espace : structuration de l'espace, du temps et des objets dans un contexte de modélisation multi-agent", 363-384 in *Modélisation et Simulation Multi-agents Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*. Paris, Hermes Science Publications.
- Ortúzar J. de D., Willumsen L.G., 2011, *Modelling Transport*, Chichester, West Sussex, United Kingdom, Wiley, 606 p.
- Pohl B., 2015, *Variabilité Climatique Régionale en Afrique Australe : Observations, Modélisation*. Dijon, Université de Bourgogne, 258 p. https://pohlben.files.wordpress.com/2018/11/hdr_bpohl_annexes.pdf
- Pohl B., Douville H., 2011, "Diagnosing GCM errors over West Africa using relaxation experiments. Part II: intraseasonal variability and African easterly waves", *Climate Dynamics*, vol. 37, No.7-8, 1313-1334. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-011-1106-1>

Sykes P., 2010, "Traffic Simulation with Paramics", 131-171 in J. Barceló (Éd.), *Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research & Management Science. Springer New York. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-6142-6_4

Taillandier P., Grignard A., Gaudou B., Drogoul A., 2014, "Des données géographiques à la simulation à base d'agents : application de la plate-forme GAMA", *Cybergeo : European Journal of Geography*, No.671, <http://cybergeo.revues.org/26263>

NOTES

1. Le code informatique du modèle SCAUP (.gaml) et les données associées (*includes*) sont téléchargeables à l'adresse suivante : https://github.com/je208836/SCAUP_GeOpenMod
2. L'écart-type permet d'estimer le temps de déplacement de manière aléatoire en fonction du temps de déplacement moyen et ainsi d'éviter la disparition des véhicules de manière simultanée dans le modèle. Par exemple, pour une durée de déplacement de 15 minutes et un écart-type de 5 minutes, le stationnement d'un véhicule sera sélectionné aléatoirement entre 10 et 20 minutes.
3. Un signal est défini ici comme étant le débit de véhicules simulés sur les axes routiers et par pas de temps.

RÉSUMÉS

Cet article présente le modèle SCAUP (*Simulation multi-agents à partir de données de CAPteurs Urbains pour la Pollution atmosphérique automobile*). Son objectif est de simuler un trafic routier au plus proche de la mesure (approche *data-driven*) sur l'ensemble d'un réseau routier en se fondant sur les données de comptage du trafic fournies par des capteurs urbains électromagnétiques. Ce modèle à base d'agents a pour objectif de simuler le trafic routier à l'échelle d'un réseau routier théorique et contrôlé. L'article présente une vision d'ensemble des paramètres, du processus de simulation et des analyses réalisées afin de juger des capacités du modèle à simuler le trafic routier avec peu de données d'entrée : un réseau routier et des données de comptage

This paper presents the SCAUP model (*Multi-Agents Simulation from Urban sensors data for traffic Air Pollution*). SCAUP aims at simulating a road traffic based on a data-driven approach in order to be close to observation on a wide set of theoretical road network. The data used in SCAUP are based on automatic traffic counting measurements done by electromagnetic loop sensors. The purpose of the proposed agent-based model is to simulate road traffic at the scale of a theoretical and controlled road network. In this paper, we present an overview of the sets of parameters, the overall simulation process and its analysis tests, in order to evaluate the SCAUP capacities to simulate a traffic flow pattern with two main input data: road network and traffic counting data.

INDEX

Mots-clés : simulation multi-agents, trafic, transport urbain, données, modélisation intra-urbaine

Keywords : multi-agent simulation, traffic, urban transportation, data, intra-urban modelling

AUTEURS

JUSTIN EMERY

UMR 6049 ThéMA, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté, France, justin.emery@u-bourgogne.fr

NICOLAS MARILLEAU

UMI 209 UMMISCO, IRD/UPMC, Ingénieur de Recherche, France, nicolas.marilleau@ird.fr

NADÈGE MARTINY

Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté, France nadege.martiny@u-bourgogne.fr

THOMAS THÉVENIN

UMR 6049 ThéMA, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté, France, thomas.thevenin@u-bourgogne.fr