

## Projet de Fin d'Études (PFE) 2019

### Modélisation routière : étude des impacts des véhicules autonomes et connectés sur l'écoulement du trafic et les émissions de polluants



Clémence Burgué sous la direction de Hervé Baptiste

*Source image : safecarnews.com*

# **Modélisation routière : étude des impacts des véhicules autonomes et connectés sur l'écoulement du trafic et les émissions de polluants**

**Directeur de recherche :** Hervé Baptiste

**Auteure :** Clémence Burgué

**Janvier 2019**

# Avertissement

---

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

# Formation par la recherche, Projet de Fin d'Études en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'École Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

**Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.**

# Remerciements

---

Je tiens à remercier mon tuteur pédagogique Hervé Baptiste, enseignant chercheur en Aménagement de l'espace et Urbanisme, pour son temps et ses conseils.

# Sommaire

---

<b>Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>Première partie.....</b>	<b>8</b>
<b>Généralités sur la modélisation routière .....</b>	<b>8</b>
<b>Échelle macroscopique - modèle continu.....</b>	<b>8</b>
Modèles du premier ordre (LWR).....	9
Modèles du second ordre (Generic Second Order Model) .....	10
<b>Échelle microscopique - modèle discontinu.....</b>	<b>10</b>
<b>Deux types de modèles .....</b>	<b>11</b>
Modèle longitudinal.....	11
Modèle latéral.....	13
<b>Échelle mésoscopique.....</b>	<b>14</b>
<b>Limites des modèles .....</b>	<b>14</b>
<b>Introduction à la diversité des comportements des conducteurs .....</b>	<b>15</b>
<b>Modélisation et simulation du trafic routier.....</b>	<b>16</b>
<b>Deuxième partie .....</b>	<b>19</b>
<b>Les véhicules autonomes et connectés.....</b>	<b>19</b>
<b>En terme de débit.....</b>	<b>21</b>
Fonctionnement du logiciel.....	21
Résultats de simulation du logiciel .....	24
<b>En terme d'émissions de polluants.....</b>	<b>28</b>
Différents types de polluants.....	28
Présentation du logiciel de simulation.....	28
Résultats des simulations.....	30
<b>Conclusion.....</b>	<b>32</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>33</b>
<b>Sources.....</b>	<b>34</b>

## Introduction

Les nouvelles technologies sont de plus en plus présentes dans notre quotidien. Le domaine de la mobilité et des transports en est un bon exemple. Les Systèmes de Transport Intelligents (STI) se développent et cherchent à répondre à une demande de mobilité toujours plus importante. Ces technologies s'appliquent à de nombreux domaines comme la billettique des transports en commun, la diffusion d'informations, la sécurité routière ou les véhicules autonomes et connectés.

Ces progrès pourraient conduire à des transformations importantes pour notre société. En effet, le domaine des transports est actuellement responsable du quart de la consommation mondiale d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. À l'échelle mondiale il y a un véhicule pour dix habitants (chiffre qui tend à augmenter). On estime qu'en 2050, 75% de la population mondiale vivra dans les villes<sup>1</sup>. En zone urbaine la question des déplacements et plus particulièrement de l'utilisation de la voiture individuelle va devenir un enjeu majeur. La conception de la voiture particulière va subir des modifications et son utilisation va être amenée à être repensée. Elle ne pourra pas continuer à être le mode de déplacement privilégié des habitants. Les véhicules autonomes et connectés permettront d'apporter des solutions concernant la question environnementale. De manière plus générale, les enjeux des Systèmes de Transport Intelligents sont ceux de la sécurité, de la fluidité, du confort et de l'environnement.

Ce Projet de Fin d'Études se divise en deux parties. Une première présente un état de l'art non exhaustif des modèles de trafic existants. Cette partie est organisée par échelle, les modèles de l'échelle macroscopique, puis microscopique et ensuite mésoscopique. L'accent est mis sur les modèles microscopiques car ils servent de base à la plupart des études et travaux actuels qui font l'objet de la deuxième partie de cet écrit. Celle-ci présente les travaux de recherche récents, les logiciels utilisés ainsi que les résultats obtenus. Ces travaux permettent d'apporter des réponses chiffrées quant aux impacts de la substitution des véhicules classiques par des véhicules autonomes et connectés en terme de fluidité de trafic et d'émissions de polluants. La première partie utilise une méthode d'exploitation bibliographique, conceptuelle, la deuxième partie utilise quant à elle une exploitation de résultats, appliquée. L'objectif de ce projet est de montrer à l'aide d'études scientifiques que les véhicules autonomes et connectés représentent une solution crédible aux problèmes actuels de congestions et de pollution environnementale.

---

<sup>1</sup> Source : INRIA, Livre Blanc VAC

<sup>2</sup> Source : cours n°4 – Le modèle séquentiel à 4 étapes, Hervé Baptiste

<sup>3</sup> Source : CEREMA <http://www.simulationdynamique.fr/spip.php?rubrique32>

## Première partie

### Généralités sur la modélisation routière

La modélisation routière est réalisée dans un but de planification et de prévision de la demande de transport. Les gestionnaires des réseaux routiers utilisent cet outil d'aide à la décision pour l'exploitation du trafic et la gestion des déplacements. Les enjeux sont très importants. En effet, la modélisation permet de prédire l'état du trafic et son évolution. En détectant les congestions ou les incidents, les temps de réaction et d'intervention se trouvent considérablement réduits.

Les déplacements sur un réseau routier peuvent être décrits selon deux types de modèles différents : les modèles statiques et les modèles dynamiques.

Le premier type permet de représenter de manière simplifiée les déplacements, sans prendre en compte les interactions ni les fluctuations, autrement dit, sans prendre en compte le temps. Il est plus particulièrement utilisé à l'échelle macroscopique et pour travailler sur des problématiques de planification à long terme.

Les modèles dits statiques sont composés de plusieurs "familles", cependant la plus largement utilisée est la modélisation classique à quatre étapes. Elle se compose des étapes séquentielles suivantes : génération de la demande de déplacement, distribution des déplacements, répartition modale et affectation des déplacements.<sup>2</sup>

Par opposition au premier modèle, le second prend en compte les modifications des conditions de circulation qui peuvent intervenir au cours du temps. Son utilisation est à l'échelle microscopique ou macroscopique et sert généralement à répondre à des problématiques opérationnelles. Les modèles dynamiques sont nombreux, ils peuvent être classés par l'échelle qu'ils utilisent. Certains des modèles s'intéressent à la dynamique des véhicules de manière individuelle et correspondent donc à une échelle microscopique. Tandis que les modèles s'intéressant à des phénomènes plus globaux et considérant la dynamique du trafic comme un ensemble, appartiennent à l'échelle macroscopique.

La plupart des modélisations font un rapprochement entre le trafic routier et la mécanique des fluides. Il est en effet possible d'identifier le comportement des véhicules à celui de particules constituant un fluide. L'étude des interactions entre véhicules a permis d'établir plusieurs lois de comportement utilisées dans la construction de modèles à différentes échelles : macroscopique, microscopique ou mésoscopique.

### Échelle macroscopique - modèle continu

A cette échelle, la représentation du trafic est la plus agrégée. Le trafic est considéré comme un flux, autrement dit, un seul ensemble de véhicules. Les caractéristiques étudiées sont le débit (nombre de véhicules pendant une période de temps), la concentration (nombre de véhicules par unité d'espace) et la vitesse (vitesse moyenne des véhicules).

---

<sup>2</sup> Source : cours n°4 – Le modèle séquentiel à 4 étapes, Hervé Baptiste

Les modèles présentés à cette échelle posent une hypothèse de continuité des éléments constituant le flux.

## Modèles du premier ordre (LWR)

Le modèle le plus largement utilisé est celui de Lighthill Whitham Richards ou modèle LWR (1955-1956). Il se fonde sur l'hypothèse d'équilibre du trafic : l'évolution se fait en passant d'un état à un autre. Ce modèle présente 3 variables qui sont la vitesse  $V(x,t)$ , le débit  $Q(x,t)$  et la densité  $D(x,t)$ .

Le modèle repose sur trois équations :

- la vitesse de flux, correspondant au rapport du débit sur la densité;
- la loi de conservation, correspondant à la conservation du nombre de véhicules sur une portion de route de longueur infinitésimale pendant un laps de temps donné;
- le diagramme fondamental, qui suppose la situation d'équilibre du trafic et son passage d'un état à un autre.

$$Q(x, t) = D(x, t) \times V(x, t)$$

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = 0$$

$$V(x, t) = V_e(D(x, t))$$

avec  $V_e$  la vitesse du trafic à l'équilibre

Source : thèse G. Corteseque

La résolution de ce système d'équations permet de déterminer la densité et de déduire les débits et vitesses des véhicules sur un réseau. Il existe différents diagrammes fondamentaux, tous permettant de répondre aux observations suivantes :

- quand la densité est faible, les interactions entre véhicules sont réduites, donc les véhicules adoptent une vitesse de croisière, le débit va augmenter. C'est une situation de régime fluide.
- quand la densité est importante, les interactions entre véhicules sont plus fortes, donc leur vitesse va diminuer. C'est l'entrée dans le régime congestionné.
- la densité est bornée à une certaine valeur correspondant à l'état où tous les véhicules sont à l'arrêt les uns derrière les autres.

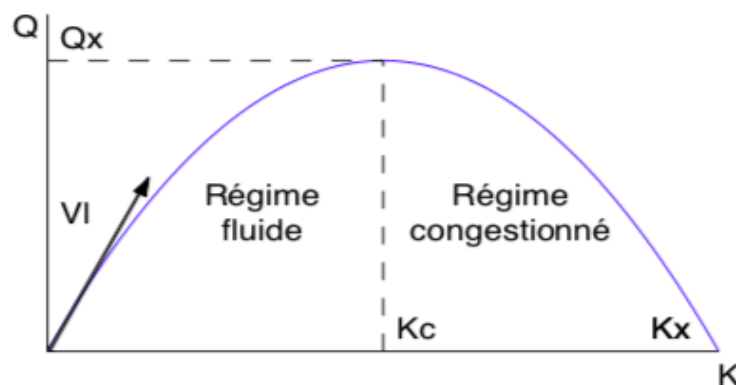


Figure 1 : Diagramme fondamental de Greenshields (débit en fonction de la densité)

Source : thèse E. Bourrel

## Modèles du second ordre (Generic Second Order Model)

Les modèles d'ordre supérieur ont été développés sur la base du modèle du premier ordre afin de décrire les phases transitoires, ils permettent de prendre en compte les états de non-équilibre. Dans le modèle décrit par Payne, une équation dynamique qui exprime l'accélération, vient remplacer l'équation d'équilibre utilisée dans le modèle du premier ordre. L'accélération est décrite par deux termes : la relaxation vers la vitesse d'équilibre ( $V_e$ ) et le terme de comportement individuel. L'intérêt est de pouvoir représenter le caractère individuel des conducteurs.

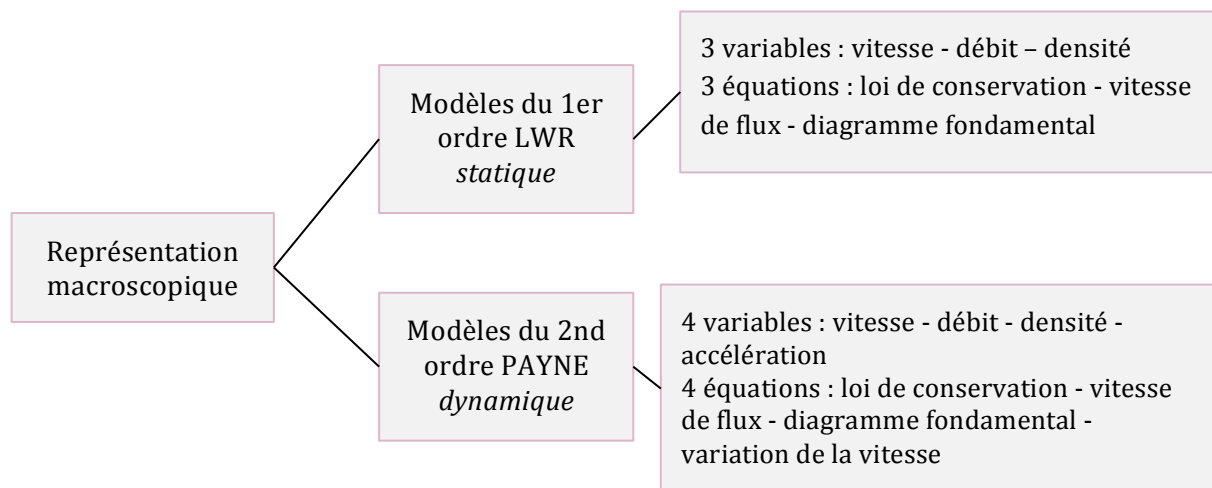


Figure 2 : Classification des modèles de représentation macroscopique

Source : thèse M. Uzunova (p23)

Réalisation : Clémence Burgué

## Échelle microscopique - modèle discontinu

À cette échelle, tous les véhicules sont étudiés de manière individuelle. Le trafic est considéré comme un système de particules, on utilise le terme flot de véhicules. Les modèles cherchent à reproduire le mieux possible le comportement réel des véhicules en prenant en compte le comportement des conducteurs. Le résultat recherché par ces modèles est la trajectoire individuelle des véhicules. Les paramètres en jeu sont la position des véhicules, la vitesse, la distance inter véhicules ou la densité de chaque véhicule.

La principale vocation des modèles microscopiques est de décrire les comportements individuels des conducteurs pour deux types de situation de conduite.

Le premier type est celui du comportement de poursuite ou voiture-suiveuse, il correspond aux réactions du conducteur en réponse aux actions du véhicule devant lui.

Le deuxième type de situation est celui de changement de voie, il comprend toutes les manœuvres d'insertion ou de dépassement.

## Deux types de modèles

### Modèle longitudinal

Ce modèle est fondé sur l'analyse simplifiée de la conduite et plus particulièrement sur les hypothèses liées aux décisions des conducteurs. Les nombreuses études sur le sujet ont dégagé certains principes, la conduite des conducteurs peut être divisée en plusieurs étapes : tout d'abord le prélèvement de l'information concernant l'environnement, le traitement de l'information, puis la prise de décision et enfin l'action. Cette dernière étape peut se traduire par deux réactions différentes : le contrôle de l'accélération ou celui de la direction. C'est du contrôle de l'accélération qu'il est question dans le modèle longitudinal, on parle aussi de comportement de poursuite ou de modèle voiture-suiveuse. Ce type de comportement a été décrit par plusieurs modèles prenant en compte des éléments tels que les stimulus, la distance de sécurité ou la vitesse.

Dans l'étude des comportements de poursuite, on peut distinguer deux types de conduite. La conduite libre, quand le trafic est assez faible et qu'il permet aux véhicules de circuler avec une interdistance suffisamment importante pour que le conducteur puisse circuler à une vitesse désirée.

La conduite avec présence d'un véhicule leader, quand un véhicule suiveur adopte une vitesse plus faible que sa vitesse désirée à cause des interactions liées au véhicule leader.

Il existe plusieurs types de modèles de poursuite :

#### *Modèle à distance de sécurité*

Ce modèle décrit la dynamique d'un véhicule en fonction de la distance de sécurité qu'il entretient avec le véhicule le précédant. Il a été établi par Pipes en 1953, et suppose "une bonne règle pour suivre un véhicule à une distance sûre est de laisser au moins l'équivalent d'une longueur de son propre véhicule tous les 10 miles/heure [16,1 km/h]". Ainsi, la formule suivante permet de déduire la distance de sécurité qui sépare un véhicule roulant à une vitesse  $v$  d'un autre.

$$D_n(t) = L_n(1 + \frac{v(t)}{16,1})$$

avec :  $D_n$ , la distance de sécurité

$L_n$ , la longueur du véhicule

$v$ , la vitesse du véhicule

Dans ce modèle, la distance minimale de sécurité est proportionnelle à la vitesse.

En 1974, Kometani et Sasaki proposent leur modèle de prévention des accidents (*Collision Avoidance*). Ils cherchent à déterminer la distance de sécurité minimale à adopter pour qu'en cas de changement de comportement de conduite du véhicule leader (cas de freinage imprévu) toute collision puisse être évitée.

Cette interdistance peut être calculée par cette équation qui s'appuie elle-même sur les équations du mouvement de Newton :

$$D_n(t) = \alpha \cdot v_{n-1}^2(t) + \beta \cdot v_n^2(t + T) + \gamma \cdot v_n(t + T) + \delta$$

avec  $\alpha$  et  $\beta$  respectivement l'inverse de la capacité maximale de décélération du véhicule leader et du suiveur;

$\gamma$ , l'inverse du temps de réaction ou sensibilité du conducteur;

$\delta$ , une distance;

$T$ , temps de prise en compte du changement de vitesse du véhicule leader.

### **Modèle de réponse à un stimulus (GHR)**

Avec ce modèle, l'idée est de considérer un retard sur la réaction du conducteur suiveur sur la commande de son véhicule. Le comportement du conducteur est défini comme tel : dans un premier il y a perception d'un stimulus à l'instant  $t$  et il y a ensuite réaction avec un décalage temporel représenté par  $T_r$ . Cette réaction est proportionnelle au stimulus reçu ainsi qu'à la sensibilité du conducteur.

$$\text{réponse}(t + T_r) = \text{sensibilité} \times \text{stimulus}(t)$$

Source : thèse G. Corteseque

En 1958, Chandler propose un modèle dans lequel il décrit le stimulus comme étant la différence de vitesse entre deux véhicules qui se suivent.

$$a_n(t + T_r) = \alpha \cdot (v_{n-1}(t) - v_n(t))$$

avec  $\alpha$ , le coefficient de sensibilité supposé constant

$T_r$ , le temps de réaction du conducteur

L'expression de Chandler permet ainsi de calculer l'accélération du véhicule suiveur en fonction de la sensibilité du conducteur à la différence de vitesse entre son véhicule et celui qu'il suit et d'un temps de réaction.

Ce coefficient de sensibilité a été complexifié par Gazis, Herman et Rothery (1961), ils le définissent comme suit :

$$\text{sensibilité} = \beta \frac{v^m(t + T_r)}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^l}$$

Ici, le terme exprimant la sensibilité est inversement proportionnel à la distance entre véhicules. Aussi, la sensibilité augmente d'autant plus que la distance inter véhicules diminue. L'expression de la réponse, ou accélération est la suivante :

$$a_n(t + T_r) = \beta \frac{v^m(t + T_r)}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^l} \cdot (v_{n-1}(t) - v_n(t))$$

Modèle de Gipps, 1981

Les coefficients  $\beta$ ,  $l$  et  $m$  sont à déterminer. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur le sujet afin d'établir les meilleures combinaisons possibles.

### Modèle à vitesse optimale

Le modèle de la vitesse optimale est l'un des plus répandu dans le domaine, il a été formulé par Newell en 1961. Ici, le conducteur est supposé adopter une vitesse qui est fonction d'une vitesse dite optimale et de la distance qu'il entretient avec le véhicule suivi. L'expression de la vitesse est la suivante :

$$v_n(t + dt) = V_{opt}(x_{n-1}(t) - x_n(t))$$

avec  $V_{opt}$ , la vitesse optimale jugée satisfaisante pour le conducteur  
 $dt$ , l'intervalle de temps nécessaire au changement de vitesse du véhicule

Contrairement aux modèles précédents, celui-ci ne considère pas le temps comme un temps de réaction mais comme le temps nécessaire pour adapter la vitesse du véhicule. Autrement dit, le conducteur est supposé modifier sa vitesse de manière instantanée.

### Modèle latéral

Le modèle latéral décrit le comportement de changement de voie des véhicules dans le cas d'une infrastructure multivoies. C'est un modèle complexe qui doit à la fois prendre en compte les distances inter véhicules, les temps de réaction des conducteurs mais aussi les conditions de circulation des différentes voies.

Généralement, deux étapes sont définies : la prise de décision et l'action de changement de voie. L'action de changement de voie peut être de plusieurs types. Elle peut être discrète, dans le cas où le changement est considéré comme un saut entre deux voies, ou continue quand le changement est défini par une trajectoire déterminée.

#### Changement de voie - MOBIL (Minimizing Overall Braking Induced by Lane change)

Ce modèle, proposé par Treiber et Kesting (2006) décrit le changement de voie comme étant dépendant de deux critères : la motivation et la sécurité. Le critère de sécurité est satisfait si la décélération due au freinage  $-a_{veh\ suiveur}$  imposé au nouveau véhicule suiveur ne dépasse pas une certaine limite  $b_{sécurité}$ .

$$a_{veh\ suiveur} > -b_{sécurité}$$

Le critère de motivation doit permettre de juger si le conducteur a un intérêt à changer de voie en terme d'augmentation de son accélération. Le risque de changer de voie n'est pris si cette augmentation de vitesse ne dépasse pas  $\Delta a_{seuil}$ . Une marge d'erreur  $\Delta a_{marge\ erreur}$ , est rajoutée à la formule pour prendre en compte le côté de changement de voie. En effet, pour la plupart des pays européens, les dépassements se font par la gauche mais dans d'autres pays le dépassement par la droite est autorisé.

$$a_{après\ changement} > a_{avant\ changement} + \Delta a_{seuil} \pm \Delta a_{marge\ erreur}$$

## Échelle mésoscopique

Cette échelle peut être considérée comme une échelle intermédiaire à celle macroscopique et microscopique. Les modèles de trafic à l'échelle mésoscopique représentent l'état du trafic routier sous forme de groupes de particules. Cette représentation homogène permet l'étude des interactions entre *paquets* de véhicules. Les modélisations effectuées à cette échelle sont basées sur les événements, et consistent à calculer des informations individuelles (vitesses ou instants de passage de véhicules) pour reconstituer des informations collectives (temps de parcours)<sup>3</sup>.

Cette échelle de modélisation est souvent considérée idéale pour les représentations dynamiques de réseaux de grande taille. Notamment parce que les calculs sont plus rapides à effectuer que pour une modélisation à l'échelle microscopique et que son niveau de précision est plus grand que celui des modélisations faites à l'échelle macroscopique.

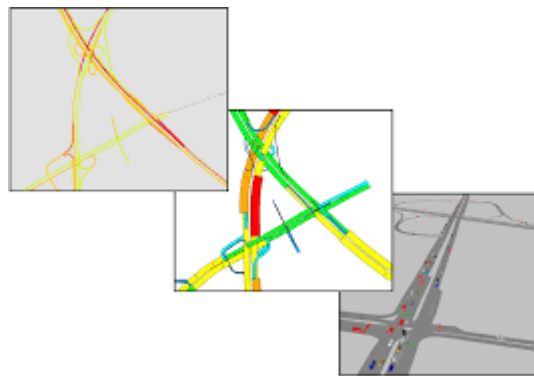


Figure 3 : Illustration des trois échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique  
Source : [DTU ETD](#)

## Limites des modèles

Chacun de modèles précédents répond à des besoins différents. Des modélisations à l'échelle macroscopique ou mésoscopique vont être utilisées pour l'étude du dimensionnement de réseaux routiers ou de l'apparition des congestions. Elles vont être appliquées sur des réseaux de tailles conséquentes. Ce ne sont pas les relations entre véhicules qui vont être regardées. Pour cela, c'est l'utilisation des modèles microscopiques qui va être recommandée. On va regarder les interactions entre véhicules ainsi que le comportement individuel des véhicules.

Certaines des hypothèses posées pour l'élaboration des modèles sont trop simplificatrices. En effet, concernant les modèles longitudinaux de l'échelle microscopique, plusieurs critiques

---

<sup>3</sup> Source : CEREMA <http://www.simulationdynamique.fr/spip.php?rubrique32>

peuvent être émises. Dans Boer et Van Winsum (1999) certaines des limites présentées par les modèles longitudinaux sont développées. Tout d'abord, ces modèles ne prennent pas en compte la diversité des comportements de conduite des conducteurs. Ensuite, il est supposé que ces derniers restent attentifs, c'est-à-dire qu'ils adoptent une conduite optimisée en permanence. Aussi, leur perception des distances est supposée parfaite. Enfin, on considère les interactions entre véhicules comme limitées, seule la voiture suivie (n-1) est prise en compte dans ces modèles et non les véhicules (n-2), (n-3),... ou le véhicule suivant.

Il est important de préciser que tous ces modèles de poursuite ne peuvent modéliser que des situations présentant un trafic relativement dense. En effet, comme l'explique Vogel (2002) si la densité de voitures est trop faible, alors les conducteurs peuvent adopter une vitesse dite libre et ne sont plus en situation de voiture-suiveuse. Il définit l'état de voiture-suiveuse comme correspondant à une situation où le temps inter véhicule est supérieur à 6 secondes.

Dans ses travaux, Hancock (1999) explique l'insuffisance des modèles pour décrire la complexité du trafic. D'après lui, pour s'approcher au plus de la réalité, les modèles devraient intégrer des éléments de psychologie du conducteur. Ainsi, l'utilisation des modèles microscopiques pourrait être améliorée par l'intégration de variables représentatives du temps de réaction du conducteur, son état de fatigue, son anticipation, son mode de conduite (manuelle ou automatique) mais aussi de son style de conduite (agressive, normale, prudente).

## **Introduction à la diversité des comportements des conducteurs**

Comme nous avons pu le voir dans les parties précédentes, les parallèles entre la modélisation du trafic routier et la mécanique des fluides sont nombreux. Contrairement aux molécules composant les fluides, les "particules" constituant le trafic routier ne sont pas toutes identiques, en effet chaque conducteur adopte un comportement variable et différent de celui des autres conducteurs. Certains présentent des attitudes de conduite plutôt agressives tandis que d'autres sont plus calmes. Face à un même événement, par exemple un ralentissement, les réactions peuvent être différentes d'un conducteur à l'autre, l'un peut avoir anticipé son freinage alors qu'un autre peut choisir de ralentir au dernier moment. Tous ces comportements et prises de décisions impactent l'écoulement du flux de véhicules. Il est aussi important de considérer les types de véhicules composant l'ensemble étudié. En effet, le trafic peut rassembler des voitures, des deux roues mais aussi des poids lourds. Chacun de ces véhicules possède des caractéristiques particulières. Par exemple les camions sont limités au niveau de leur vitesse car leur capacité d'accélération n'est pas la même que celle d'une voiture. L'espace occupé sur la route par le véhicule est aussi un élément important à prendre en compte. La typologie du véhicule peut aussi être liée au motif de déplacement qui influe sur l'attitude du conducteur sur la route. Pour reprendre l'exemple des poids lourds leur motif de déplacement est exclusivement professionnel, il est donc possible d'associer une partie de leurs attitudes de conduite à leur type de véhicules.

De plus, les réactions des conducteurs vont changer au cours de la journée. L'état émotionnel, la fatigue ou le stress sont des facteurs importants qui varient et influencent la conduite.

Chaque conducteur évalue de manière différente les créneaux disponibles pour effectuer un changement de voie ou pour un dépassement de véhicule. Un créneau peut se définir par l'intervalle de temps entre le passage de deux véhicules, il est calculé sur la distance qui sépare le pare-choc arrière du véhicule en tête et le pare-choc avant du véhicule suivant. On parle alors

de loi d'acceptation des créneaux, selon le comportement conducteur ou la densité du trafic, les conducteurs vont être amenés à plus ou moins diminuer ou augmenter leur acceptation de créneaux.

Enfin, l'environnement extérieur influence fortement le comportement des conducteurs. Tout d'abord, les conditions météorologiques peuvent et doivent influencer la conduite. En cas de fortes pluies ou de brouillard qui peuvent diminuer la visibilité, la baisse de vitesse est recommandée voire indispensable. Il y a aussi le cas de certains conducteurs qui n'aiment pas conduire de nuit ou par temps de pluie. Alors, ces éléments extérieurs influencent l'état émotionnel du conducteur et donc leur conduite. Le type d'infrastructure impacte aussi la conduite. L'attitude d'un conducteur va être différente selon qu'il emprunte une route de campagne une nationale ou une autoroute. Ces types de route peuvent présenter différentes caractéristiques, nous allons notamment distinguer celles dites "*ouvertes*" et celles présentant des panneaux sur les côtés. Sur ce dernier type de routes nous avons tendance à rouler moins vite (Source : Coquand R., *Routes*, 1956).

Lors d'un changement entre ces types de routes ou entre deux voies, les attitudes des conducteurs peuvent être amenées à changer. Ce phénomène est expliqué par Daganzo (2002). D'après lui, les conducteurs adoptent un changement de comportement lorsqu'ils effectuent des changements de voie, un conducteur doublant un autre devient plus "motivé" dans sa conduite et va être amené à doubler plus facilement avec un temps de créneau plus faible.

Tous ces éléments nous permettent de mettre en avant le caractère hétérogène des comportements représentés sur les routes. Cette diversité de comportements présentés par les conducteurs explique la forte variabilité des caractéristiques d'écoulement du trafic routier, c'est ce que l'on appelle le caractère stochastique du trafic routier.

Dans les modèles présentés ci-dessus, de grandes approximations existent concernant la modélisation des caractéristiques humaines de conduite, c'est ce point là que nous allons étudier dans la partie suivante.

## Modélisation et simulation du trafic routier

La modélisation s'appuie sur des modèles mathématiques pour s'approcher de la réalité physique du trafic et mieux comprendre son fonctionnement. La simulation va quant à elle être utilisée pour décrire la dynamique du trafic, c'est-à-dire son écoulement. Elle cherche aussi à décrire et expliquer les phénomènes de gestion. Les modèles sont utilisés dans les outils de simulation afin d'obtenir des données numériques. Elle nécessite l'utilisation de l'outil informatique notamment pour sa puissance de calcul et de stockage de données. La modélisation du trafic passe par trois phases : la représentation de l'environnement, le choix du modèle de trafic et le choix des caractéristiques liées au conducteur.

Les logiciels de simulation de la dynamique du trafic sont souvent utilisés pour représenter des situations à l'échelle microscopique, ils utilisent alors des modèles permettant de tenir compte de manière individuelle de l'environnement et de certaines caractéristiques des comportements des conducteurs. Certains des modèles utilisés ont été présentés précédemment, notamment les modèles longitudinaux de type poursuite et les modèles latéraux permettant de considérer les dépassements et changements de voies. Pour ce qui est de la gestion de réseaux de grande taille ou de leur évaluation, ce sont les modèles macroscopiques qui sont privilégiés.

Selon le CEREMA (Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) les principaux outils de simulation dynamique en France sont : Aimsun, Dynasim, Paramics, Transmodeler et Vissim. Tous ces logiciels ont été développés et sont utilisés à des fins commerciales contrairement aux logiciels issus de travaux de recherche. Le tableau ci-dessous répertorie ces logiciels en fonction de leur échelle d'étude et précise les modèles qu'ils utilisent.

Échelles	Logiciels	Modèles utilisés	Particularités
Macroscopique	TransModeler	basé sur un lien fonction de performance similaire à celle des modèles d'assignation statiques <sup>4</sup>	modèle hybride (fonctionne sur trois échelles)
Microscopique	Aimsun	type réponse à un stimulus (GHR)	estimation de la décélération du véhicule meneur
	Dynasim	type poursuite issu du modèle de Helly	prise en compte d'une zone d'influence autour du véhicule non pénétrée par les autres usagers
	Paramics	type longitudinaux et latéraux mis au point par Fritzche <sup>5</sup>	prend en compte la notion d'interdistance désirée et d'interdistance cible
	Vissim	type psycho-physique développé par Wiedemann <sup>6</sup>	prend en compte le couple véhicule-conducteur
	TransModeler	type longitudinaux (voiture suiveuse) et latéraux (changement de voies) <sup>7</sup>	modèle hybride (fonctionne sur trois échelles)
Mésoscopique	TransModeler	cellules de circulation (traffic cells), relation vitesse-densité pour déterminer les mouvements <sup>8</sup>	modèle hybride (fonctionne sur trois échelles)

La simulation permet d'apporter un complément à l'étude d'un système complexe, il n'a pas vocation à apporter une solution à un problème donné. Les résultats issus de simulations ne peuvent être interprétés comme ceux issus de la réalité, ils restent fictifs. Leur intérêt réside

<sup>4</sup> <http://web.mit.edu/osorioc/www/papers/selvamMScThesis2014.pdf>

<sup>5</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Quadstone\\_Paramics](https://en.wikipedia.org/wiki/Quadstone_Paramics)

<sup>6</sup> <https://www.ptvgroup.com/fr/solutions/produits/ptv-vissim/champs-dapplication/transport-multimodal/>

<sup>7</sup> <http://web.mit.edu/osorioc/www/papers/selvamMScThesis2014.pdf>

<sup>8</sup> <http://web.mit.edu/osorioc/www/papers/selvamMScThesis2014.pdf>

principalement dans leur faible coût d'obtention et dans leur capacité à implémenter d'importants jeux de données.

Comme présenté dans la partie précédente, il est difficile de modéliser parfaitement le caractère de humain du conducteur car il faudrait pouvoir prendre en compte l'ensemble des facteurs présentés. Tout en gardant cela à l'esprit, il est tout de même possible d'effectuer des simulations comparatives entre l'utilisation de véhicules classiques et de véhicules autonomes afin d'en observer les différences. La partie suivante présente la réalisation de travaux visant à mettre en avant ces différences. Dans un premier temps, le logiciel utilisé, les modèles qu'il utilise ainsi que son fonctionnement sont présentés. Les résultats issus des simulations sont analysés.

## Deuxième partie

### Les véhicules autonomes et connectés

Les véhicules autonomes et connectés (VAC) font partie des STI (Systèmes de Transport Intelligents), ils comprennent les véhicules pris en charge par le conducteur au véhicule entièrement autonome. Le véhicule connecté est un véhicule auquel ont été rajoutées des technologies permettant l'échange avec l'environnement de celui-ci. Des capteurs prenant la forme de radars, lasers à balayage et caméras vont envoyer des signaux qui seront traduits à l'aide d'algorithmes qui vont ensuite les traiter et générer des informations pour les envoyer au véhicule qui les traduit en actions de conduite. Ces technologies sont aussi appelées ADAS (Advanced Driver Assistance Systems).

Concernant les outils de télécommunication sans fil, il en existe plusieurs types. Il y a tout d'abord la technologies V2V (Vehicle-to-vehicle) qui connecte les véhicules entre eux et permet notamment d'informer les conducteurs de la présence d'un autre véhicule à proximité. Le V2D (Vehicle-to-Device) et le V2P (Vehicle-to-Pedestrian) fonctionnent sur le même principe que le V2V et sont utilisés pour détecter la présence de cyclistes et de piétons. Les communications de type V2H (Vehicle-to-Home) ou V2G (Vehicle-to-Grid) sont plus utilisées dans un but de gestion et d'économie d'énergie et non comme aide à la conduite. Enfin, le V2I (Vehicle-to-Infrastructure) est un élément important d'aide à la conduite permettant l'échange d'informations entre les véhicules et les infrastructures routières. Elle permet d'avertir les conducteurs sur le passage de feux rouges à venir, et limiter les congestions du trafic en déviant certains automobilistes de la circulation lourde ou en réduisant les limitations de vitesse pour fluidifier le trafic global.

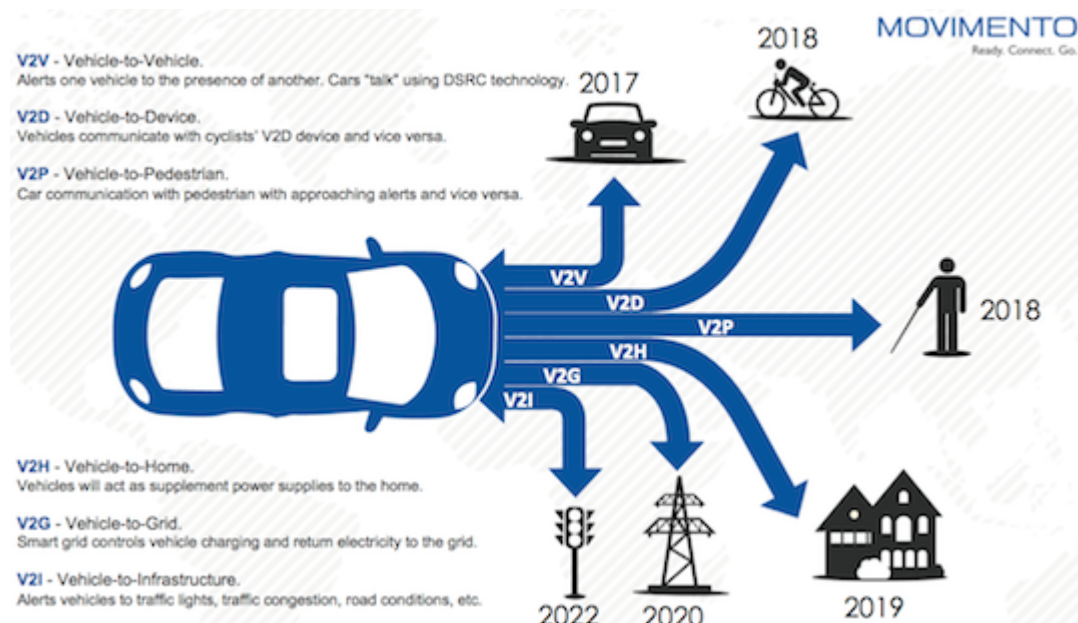


Figure 4 : Les différents types de communication des véhicules connectés  
Source : Movimento

L'ensemble de ces technologies correspond à des systèmes d'aide à la conduite qui assistent et facilitent la conduite du véhicule en apportant des informations aux conducteurs. Le véhicule

totallement autonome est un véhicule qui circule de façon automatique, sans nécessiter l'intervention d'un conducteur. L'automatisation des véhicules permet de déléguer tout ou une partie de la conduite. Les missions des technologies implémentées se divisent en trois étapes : la perception de l'environnement, la décision de la manœuvre à effectuer et enfin sa réalisation. Il existe six niveaux d'automatisation de la conduite, ils ont été défini par la Société Internationale des ingénieurs de l'automobile, la SAE (Society of Automotive Engineers), plus le niveau est grand, plus le niveau d'automatisation est important.

Le niveau 0 ne comprend aucune automatisation mais peut posséder des technologies d'avertissement tels qu'un signal sonore.

Le niveau 1 correspond à une aide à la conduite, le conducteur est responsable de toutes les tâches de la conduite mais peut choisir de déléguer le contrôle longitudinal du véhicule à travers un régulateur de vitesse adaptatif ACC (Adaptive Cruise Control) qui ralentit le véhicule automatiquement en cas de besoin. Le conducteur peut reprendre le contrôle total de son véhicule à tout moment.

Le niveau 2 est une automatisation partielle, le véhicule peut contrôler à la fois la vitesse et la direction. Il peut être utilisé pour l'assistance au stationnement ou sur autoroute pour gérer les dépassements en cas de trafic peu dense et présence des lignes sur la chaussée. Le conducteur doit contrôler les actions du véhicule et peut à tout moment reprendre la conduite du véhicule.

Le niveau 3 ou automatisation conditionnelle, le véhicule s'adapte aux conditions de trafic. Contrairement au niveau 2 qui nécessite une attention continue à la tenue de route du véhicule, ce niveau permet au conducteur de baisser momentanément son niveau de vigilance notamment dans des situations de congestion. Si les conditions l'exigent, le conducteur peut reprendre la conduite.

Le niveau 4 est une automatisation élevée du véhicule. Le conducteur choisit l'activation de ce mode pour pouvoir se détourner de la conduite, il peut être activé que pour certains modes de conduite et sous certaines conditions.

Enfin, le niveau 5 est l'automatisation complète. La présence humaine aux commandes n'est plus nécessaire, aucune supervision n'est à effectuer.

On peut noter une différence entre les niveaux allant de 0 à 4 qui proposent une automatisation graduelle avec un contrôle de la décision et de l'action à effectuer par le conducteur et le 5ème niveau qui présente une autonomie totale de l'action et de la décision uniquement par le véhicule.

Actuellement, les avancées technologiques ont permis d'atteindre le niveau 2 de ce classement, le conducteur doit superviser la conduite et doit être capable d'agir à tout moment.

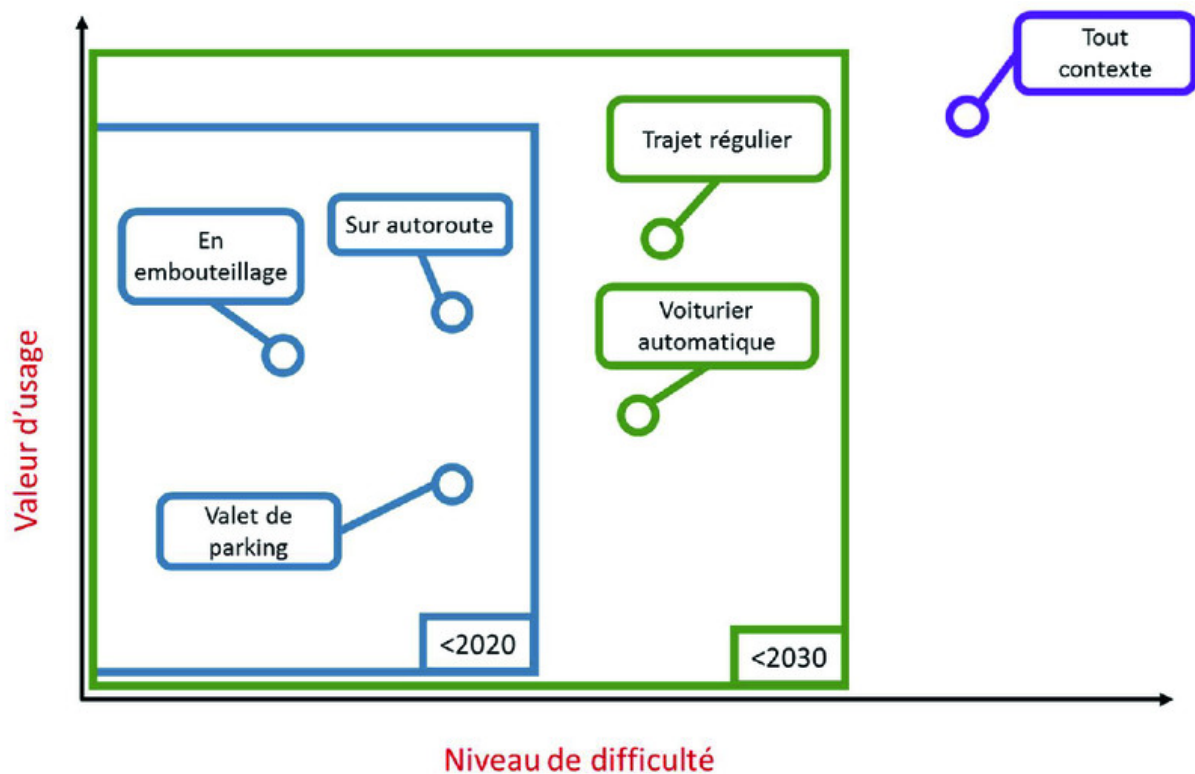


Figure 5 : extrait des objectifs de recherche de la Nouvelle France Industrielle pour le Véhicule Autonome et Connecté

Comme indiqué dans le graphique ci dessus, l'une des premières situations visées par les véhicules autonomes et connectés est la conduite sur autoroute. Elle peut être divisée en deux actions principales : la conduite à grande vitesse en trafic fluide et la conduite à basse vitesse qui correspond à une situation de congestion. Les éléments qui font que la conduite des véhicules autonomes et connectés est simplifiée sont les faibles interactions avec les éléments extérieurs : pas de piétons à considérer ni de feux tricolores, peu d'obstacles et pas d'intersections; et une lecture prédictible de la trajectoire de conduite des autres usagers. De plus, le guidage des véhicules est simplifié par un marquage au sol normalisé.

Dans la partie suivante nous allons utiliser des travaux de recherche réalisés par six chercheurs qui cherchent à déterminer les impacts de l'insertion de véhicules autonomes et connectés sur la fluidité du trafic. Les simulations se basent sur des modèles microscopiques, les résultats obtenus sont ainsi interprétables pour cette échelle.

### En terme de débit

L'écoulement du trafic est caractérisé par l'ensemble des comportements individuels de conduite. Chaque conducteur interagit avec son environnement qui se constitue de l'infrastructure qu'il emprunte et des autres véhicules.

### Fonctionnement du logiciel

Dans cette partie on va s'appuyer sur un logiciel de simulation conçu par les chercheurs allemands Kesting et Treiber (2013) dont on va décrire le fonctionnement pour pouvoir

interpréter les résultats que l'on peut obtenir. C'est ce logiciel de simulation qui est retenu car il est à la base de plusieurs travaux de recherche actuels.

Ce logiciel, MovSim (Multi-model Open-source Vehicular-traffic Simulator), a pour objectif de modéliser et simuler les situations de trafic de base comme des prises de décision dans des cas de dépassement, d'insertion sur une voie, de réaction à un feu ou à un cédez-le-passage. Il est basé sur de nombreux modèles microscopiques de type changement de voies et voiture-suiveuse.

Le simulateur implémente les modèles suivants :

- Intelligent Driver Model (IDM), décrit ci-après
- Modèle à vitesse optimale
- Différence de vitesse (Chandler)
- Modèle de Gipps
- 2 modèles d'automates cellulaires (Nagel-Schreckenberg et Kerner-Klenov-Wolf)<sup>9</sup>
- Minimizing Overall Braking Induced by Lane change (MOBIL)

Dans sa thèse, Kesting présente le modèle de pilotage humain (HDM) comme un cadre général pour l'extension des modèles de poursuite avec une prise en compte plus fine des caractéristiques humaines, notamment le temps de réaction, les erreurs de perception et les différentes formes d'anticipation humaine.<sup>10</sup>

Le modèle de pilotage intelligent (IDM) décrit par Treiber et Kesting (2013) est un modèle microscopique de poursuite. L'équation d'accélération est définie comme suit :

$$a_n = a \left( 1 - \left( \frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left( \frac{s_0 + v_n T + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{ab}}}{\Delta x_n} \right)^2 \right)$$

$a_n$ : accélération du véhicule considéré

$a$  : accélération maximum

$b$  : décélération désirée

$v_0$ : vitesse désirée

$s_0$ : distance en congestion

$T$ : temps inter véhicule désiré

$\delta$ : traduit l'agressivité (accélération)

<sup>9</sup> Un automate cellulaire est constitué des plusieurs cellules représentant des états correspondants eux-mêmes à des valeurs. Cette technique de calcul a pour ambition la réalisation de systèmes dynamiques pour arriver à des modélisations de phénomènes complexes d'auto reproduction.

<sup>10</sup> Pour plus d'explications sur le calibrage du modèle se référer à la thèse de A. Kesting : <http://tud.gucosa.de/api/gucosa%3A24070/attachment/ATT-0/>

Cette équation est la superposition des termes exprimant l'accélération d'un véhicule sans prise en compte des autres véhicules, et des termes exprimant une décélération due à un freinage dans le cas où le véhicule suiveur se retrouve à une distance trop faible du véhicule meneur. La stratégie de freinage de l'IDM garantit une conduite et des freinages sans collision.

IDM Parameter	Typical value	Reasonable range
Desired velocity $v_0$ [km/h]	120	50 – 200
Safety time gap $T$ [s]	1.5	0.9 – 3
Jam distance $s_0$ [m]	2.0	1 – 5
Maximum acceleration $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	1.4	0.3 – 3
Desired deceleration $b$ [m/s <sup>2</sup> ]	2.0	0.5 – 3

**Figure 6 : Tableau regroupant les valeurs des paramètres de vitesse, de distance inter véhicule, de distance en congestion, d'accélération maximum et de décélération désirée de l'IDM**  
Source : thèse A. Kesting

Comme indiquées dans le tableau ci-dessus, les valeurs des paramètres du modèle peuvent varier dans les intervalles déterminés. L'intérêt de l'IDM réside dans sa capacité d'adapter de manière automatisée les caractéristiques de conduite en fonction de la situation réelle du trafic. Ce sont notamment les caractéristiques en lien avec l'accélération et donc celles de l'ACC qui sont modifiées. Cette adaptation se fait suite à un processus en deux étapes. Dans un premier temps, les véhicules autonomes et connectés effectuent une analyse de la situation du trafic qui peut être séparée en cinq classes : circulation libre, l'approche d'un front de congestion, déplacement en circulation congestionnée, fin de déplacement en circulation congestionnée et dépassement de goulot d'étranglement (comme une intersection ou une zone de travaux). Ces différents types de circulation sont détectés grâce aux capteurs des véhicules. Une fois cette analyse effectuée, les paramètres de l'ACC peuvent être mis-à-jour par la matrice de stratégie de conduite qui associe ces caractéristiques de conduite aux conditions de circulation.

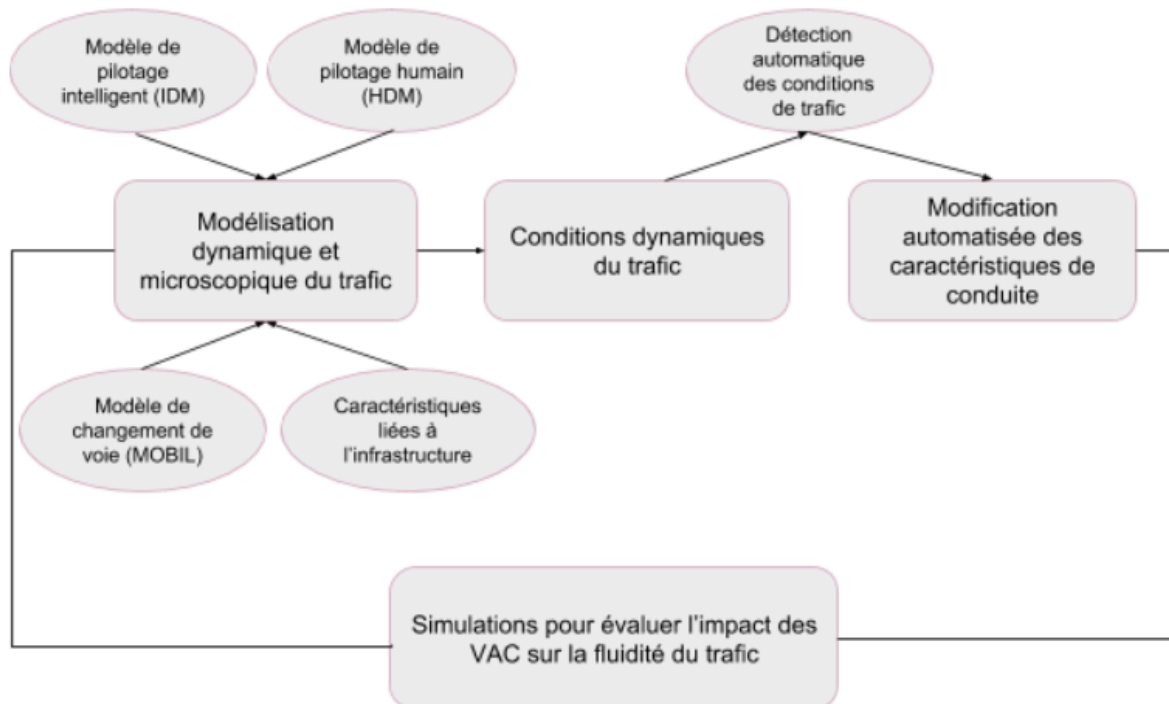


Figure 7 : Structure du logiciel de simulation MovSim  
 Source : thèse A. Kesting  
 Réalisation : Clémence Burgué

## Résultats de simulation du logiciel

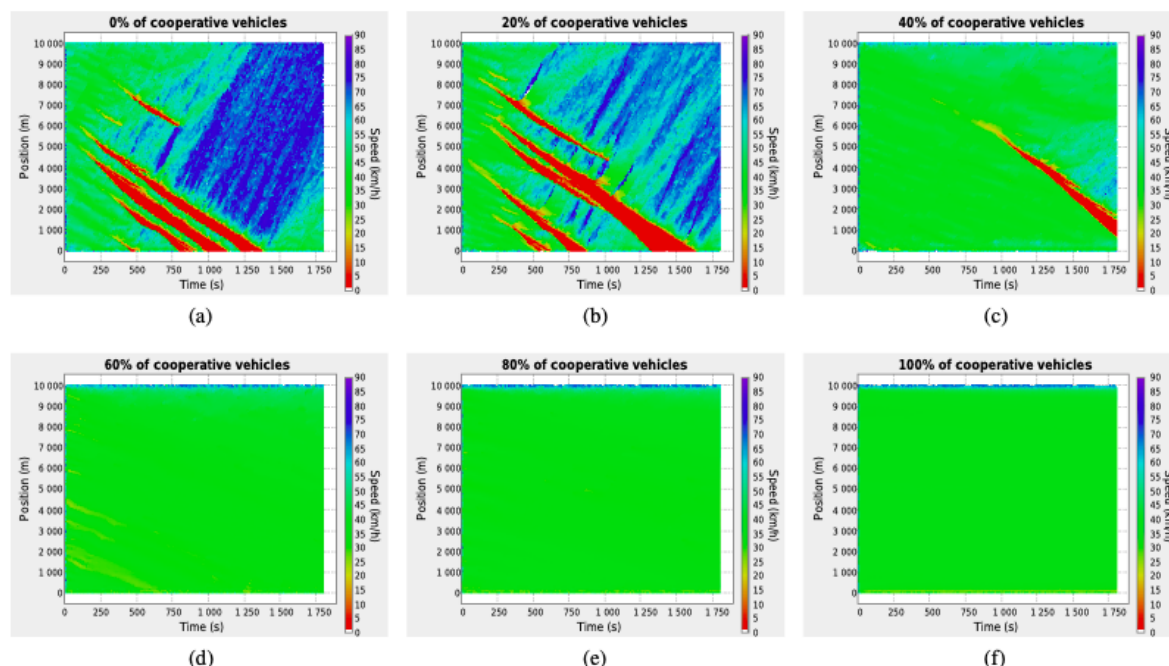
Un projet de recherche mené par l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transport, de l'Aménagement et des Réseaux) et publié en avril 2016, intitulé "Comment évaluer les bénéfices des véhicules connectés ? Un cadre de simulation pour la conception des stratégies de gestion coopératives du trafic<sup>11</sup>" a permis d'obtenir des résultats concernant l'efficacité des véhicules autonomes et connectés sur la fluidité du trafic routier. Ce projet a réuni six chercheurs qui ont décidé d'utiliser le logiciel MovSim pour effectuer les simulations. Ils ont implémenté un système multi-agents (SMA) sur le logiciel. Un système multi-agents est un système regroupant des agents autonomes et partageant un environnement commun. La première version du logiciel ne donnait pas la possibilité de représenter les communications (V2V, V2I) lors des simulations. Cet ajout permet une prédiction des actions de chaque véhicule et une prise en compte du niveau de confiance que les agents ont à propos des informations qu'ils reçoivent.

Pour les simulations, tous les paramètres du modèle ont été choisis aléatoirement pour reproduire la variabilité des conducteurs. Le choix de la zone d'étude s'est porté sur une voie rapide de banlieue pour pouvoir observer la création de perturbations et avoir un flux assez important (40 veh/voie/km). La zone d'étude est constituée de 3 voies et s'étend sur 10 km. La limitation de vitesse est à 90 km/h et la simulation dure 30 minutes.

11

[https://www.researchgate.net/publication/296694789\\_How\\_to\\_assess\\_the\\_benefits\\_of\\_connected\\_vehicles\\_A\\_simulation\\_framework\\_for\\_the\\_design\\_of\\_cooperative\\_traffic\\_management\\_strategies](https://www.researchgate.net/publication/296694789_How_to_assess_the_benefits_of_connected_vehicles_A_simulation_framework_for_the_design_of_cooperative_traffic_management_strategies)

Les résultats de leurs simulations avec des données réelles sont présentés sur les images ci-dessous.



**Figure 8 : Résultats des trajectoires des véhicules pour les six scénarios avec différents pourcentages de véhicules connectés : a 0%, b 20%, c 40%, d 60%, e 80%, f 100%**

L'image (a) correspond au scénario de référence avec aucun véhicule connecté. Les cinq autres scénarios présentent des situations de trafic mixte, c'est-à-dire avec des véhicules classiques et des véhicules connectés. Les bandes rouges correspondent à l'apparition de petites perturbations se propageant, similaires à des congestions fantômes (voir explications de l'encadré ci-dessous). Ces instabilités rendent le trafic plus hétérogène. Plus le taux de véhicules connectés augmente, plus les phénomènes de congestion s'estompent. Pour un taux supérieur à 40%, les congestions disparaissent totalement et le trafic devient homogène.

Les résultats de ces simulations apportent la preuve de l'impact positif des véhicules autonomes et connectés qui permettent une homogénéisation du flux du trafic routier.

### Les congestions

Il existe des fortes congestions liées à une densité de trafic importante (grands départs en vacances, heures de pointe, etc) qui peuvent s'étendre sur des kilomètres et durer plusieurs heures, les vitesses des véhicules approchent alors les 0 km/h. Ce type de ralentissement est donc principalement lié à des caractéristiques physiques (capacité des infrastructures, nombre de véhicules, conditions météorologiques). Cependant, d'autres types de congestion existent et apparaissent sans raison apparente.

La création des congestions fantômes (ou phantom traffic jams en anglais) a été expliquée par Treiterer et Myers (1974). Ils ont démontré la formation spontanée d'une vague de ralentissement pour aucune raison apparente comme un accident ou un goulot d'étranglement. Ces phénomènes apparaissent dans des situations où les véhicules sont

proches les uns des autres. Ces congestions se comportent comme une onde. Elles s'amplifient et se propagent vers l'amont de la circulation à une vitesse comprise entre 10 et 20 km/h à partir du premier véhicule source de ralentissement. Les comportements individuels de conduite et les changements de voies associés à une diminution de la vitesse sont considérés comme à l'origine de ce phénomène.

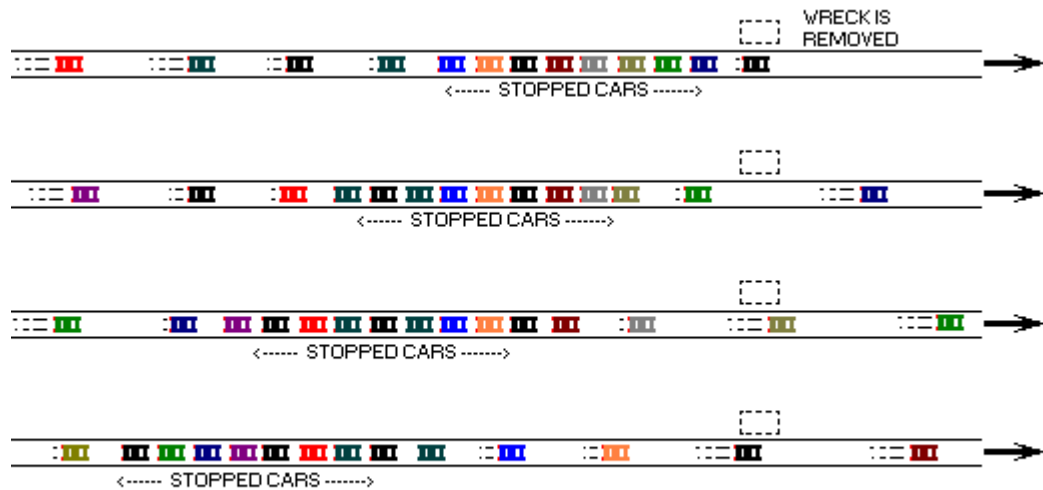


Figure 9 : Déplacement des véhicules lors d'une congestion fantôme  
Source : [trafficwaves.org](http://trafficwaves.org)

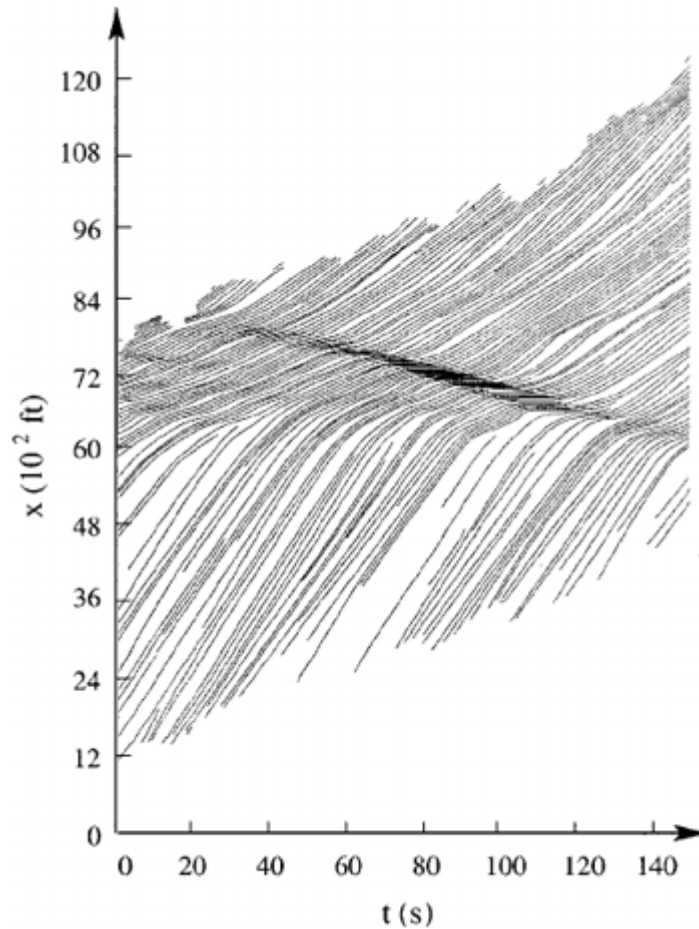


Figure 10 : Illustration de l'émergence d'une congestion fantôme  
Source : Helbing (2001)

Les trajectoires des véhicules représentés ont été obtenues par photographie aérienne. Les lignes brisées sont dues aux changements de voie et les pentes des trajectoires reflètent les vitesses individuelles des véhicules. Ainsi, la figure montre la formation d'un embouteillage fantôme, qui arrête temporairement les véhicules.

Actuellement, de nombreux projets de recherche sont en cours concernant le *platooning* (peloton routier ou convoi routier). Cette technique concerne principalement le domaine de la logistique. Le principe étant que les poids lourds se suivent à quelques mètres de distance en utilisant la communication de type V2V et des technologies permettant une conduite automatisée et connectée. Ce type de conduite permet de créer un trafic rapproché avec le véhicule précédent qui transmet des informations aux véhicules suivants. Le convoi peut être assimilé à un monobloc. Cette synchronisation entre véhicules permet d'optimiser la conduite notamment en termes de freinages et accélérations mais aussi pour les trajectoires. Ainsi, la formation de ces convois permettrait d'obtenir une meilleure fluidité du trafic mais aussi de réduire la consommation de carburant des véhicules.

## En terme d'émissions de polluants

Pour répondre à la question des impacts des véhicules autonomes et connectés sur les émissions de polluants, nous allons nous appuyer sur un projet de recherche réalisé par trois chercheurs et professeurs de l'Université du Texas, présenté en janvier 2017. L'objet de la recherche est "Anticiper les impacts des émissions d'une conduite plus fluide par des véhicules autonomes et connectés à l'aide du modèle MOVES".

### Différents types de polluants

Cette étude a utilisé le simulateur (MOVES) pour estimer les taux d'émission pour les principaux polluants émis par le trafic routier. Les polluants choisis sont des polluants dits primaires, c'est-à-dire émis directement par les véhicules, ils peuvent prendre la forme de gaz ou de particules. Les polluants présentés sont réglementés à l'exception du dioxyde de carbone et du dioxyde de soufre. Les polluants étudiés sont les suivants:

- les composés organiques volatils (COV). Ils proviennent de la combustion incomplète des combustibles;
- les particules fines (PM 2.5). Ils sont le résultat de combustions incomplètes du carburant. Leur diamètre est inférieur ou égal à 2,5 microns;
- le monoxyde de carbone (CO) se forme pendant la combustion incomplète de matières organiques, une fois dans l'air il se transforme en dioxyde de carbone;
- oxydes d'azote (NOx), se forment suite à une combustion à haute température et à une transformation dans l'air. Ils sont réputés comme plus nocifs que le monoxyde de carbone;
- dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) se constitue à partir d'additifs soufrés contenus dans les carburants (principalement dans le gazole).
- dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

### Présentation du logiciel de simulation

Les simulations ont pour objectif l'étude des émissions de polluants des VAC, on suppose que les technologies qu'ils possèdent permettent une anticipation et une réduction du temps de réaction et ainsi d'adopter une conduite plus souple qu'une conduite humaine. Les chercheurs utilisent le simulateur MOfor Vehicle Emission Simulator (MOVES) basé sur des schémas de conduite permettant l'estimation des émissions produites par les véhicules.

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente avec le phénomène de congestion fantôme, les différents types de conduites humaines ont tendance à montrer des fluctuations de vitesse significatives et fréquentes ainsi que des temps de réactions relativement longs. L'étude utilise des cycles de conduite<sup>12</sup> humaine permettant de représenter la diversité des styles de conduite existants. Ces cycles de conduite sont lissés pour s'approcher au mieux d'un style de conduite proposé par des VAC. Ainsi, les profils de conduite des VAC contiendront moins

---

<sup>12</sup> Un cycle de conduite représente en général un ensemble de points de vitesse véhicule en fonction du temps. Il est utilisé pour évaluer la consommation de carburant et les émissions de polluants d'un véhicule d'une manière normalisée, de sorte que les différents véhicules puissent être comparés entre eux. (Source : car-engineer.com)

d'événements de conduite extrêmes (comme les fortes accélérations, le freinage soudain et les virages brusques ou rapides) que les cycles des véhicules conduits pour des humains.

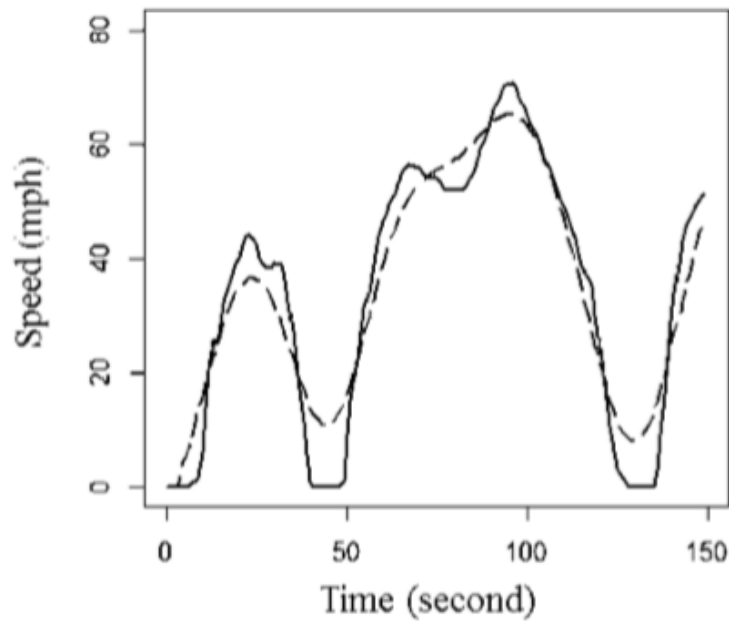
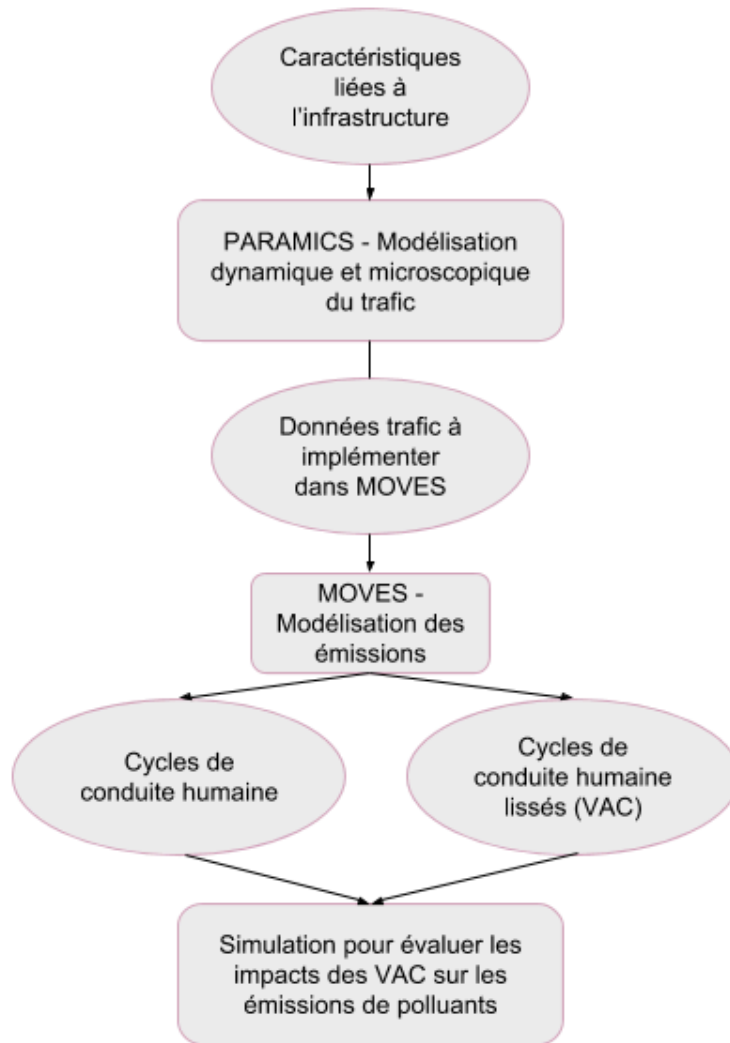


Figure 11 : Graphique représentant un cycle de conduite humaine et son lissage (en pointillés)

Pour générer des données de microsimulation du trafic, les chercheurs ont utilisé le logiciel PARAMICS (présenté dans le tableau en première partie – Modélisation et simulation du trafic routier). Ce logiciel a ainsi permis de simuler les opérations liées à la conduite pour fournir les données entrées nécessaires au logiciel MOVES, utilisé dans un second temps pour la modélisation des émissions.



**Figure 12 : Schéma explicatif du fonctionnement de la simulation des émissions de polluants**  
**Réalisation : Clémence Burgué**

Toutes les simulations ont été faites sur le comté de Travis (Texas) soit environ 2600 km<sup>2</sup>. Les simulations ont été effectuées uniquement sur des routes de milieu urbain. Les carburants des véhicules sont de type diesel, ethanol (E-85) ou essence. Enfin, tous les polluants pris en compte sont : VOC, CO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> et PM<sub>2.5</sub>.

### Résultats des simulations

Les résultats des émissions indiquent que les cycles lissés des VAC présentent en moyenne des taux d'émission inférieurs pour les cinq polluants d'intérêt.

<b>Emission Species</b>	<b>Average Drop</b>	<b>S.D.</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Volatile Organic Compounds - VOC	10.89%	9.09%	-4.56%	30.77%
Fine Particulate Matter - PM2.5	19.09%	17.31%	-23.81%	59.66%
Carbon Monoxide - CO	13.23%	16.50%	-16.93%	40.04%
Nitrogen Oxides - NO <sub>x</sub>	15.51%	11.50%	-7.41%	38.63%
Sulfur Dioxide – SO <sub>2</sub>	6.55%	5.45%	-4.12%	16.77%
Carbon Dioxide - CO <sub>2</sub>	6.55%	5.45%	-4.11%	16.76%

Note: all variables except Link Mean Speed and Emission Reduction are indicator variables. No. of observations = 432 for each emission type.

**Figure 13 : Tableau des résultats obtenus par la simulation avec la réduction moyenne obtenue par type de polluant émis**

La colonne Average Drop indique la diminution moyenne des taux d'émission de polluants des VAC. Nous pouvons remarquer que la plus importante diminution concerne les particules fines (19,09 %), vient ensuite celle des oxydes d'azote (15,51 %), puis celle du monoxyde de carbone (13,23 %), celle des composés organiques volatiles (10,89 %) et celles des dioxyde de carbone et des dioxyde de soufre (6,55 %).

Ces résultats peuvent être expliqués par plusieurs facteurs. Tout d'abord, la diminution de ces émissions s'explique par le fait que les VAC présentent des cycles de conduites plus lisses, avec des accélérations et décélérations plus graduelles des celles des cycles de conduite de véhicules classiques. Comme l'indique Christophe Decoupigny dans sa thèse concernant la "Modélisation fine des émissions de polluants issues du trafic en milieu urbain", en terme d'émissions, la quantité de polluants dépend en grande partie de la vitesse et plus précisément du couple vitesse-accelération. Les différentes technologies d'aide à la conduite permettent des changements de vitesse plus automatiques et optimisés et ainsi d'améliorer les économies de carburant et les réductions des émissions de polluants. Ensuite, les technologies de communication telles que vehicle-to-vehicle (V2V) et vehicle-to-infrastructure (V2I) présentes dans les VAC vont leur permettre à garder des vitesses plus constantes et diminuer les mouvements de stop-and-go.

On peut également s'attendre à ce que la mise en place de *platooning* avec des véhicules autonomes soit associée à un rendement énergétique plus élevé et à des taux d'émission de polluants encore plus faibles.

## Conclusion

Dans une première partie nous avons pu voir au travers d'un état de l'art les principaux modèles existants pour décrire le trafic routier. Nous avons ensuite défini ce qu'est la simulation et fait un récapitulatif des principaux logiciels de simulation existants. Dans une deuxième partie, nous avons présentés les véhicules autonomes et connectés (VAC, 5<sup>ème</sup> niveau d'automatisation) ainsi que certaines des technologies qu'ils utilisent. Nous avons par la suite apporté des réponses chiffrées, en s'appuyant sur de récents travaux de recherche, quant aux impacts que la substitution de véhicules classiques par des VAC pourrait avoir sur la fluidité du trafic, les congestions ainsi que les émissions de polluants.

Ainsi nous avons pu voir grâce aux simulations intégrant des VAC dans le trafic, que leur insertion permet d'homogénéiser le trafic. A partir de 40% de véhicules connectés dans le trafic, les congestions disparaissent totalement et le trafic devient homogène. Concernant les émissions de polluants, les résultats des simulations ont montré que les VAC permettent de diminuer les émissions de particules fines de 19 %, celles des oxydes d'azote de 15,5 %, puis celle du monoxyde de carbone de 13 %, celle des composés organiques volatiles de 10 % et celles du dioxyde de carbone et du dioxyde de soufre de 6,5 %. Ces résultats prouvent les avantages des véhicules autonomes et connectés. Un déploiement progressif de ces véhicules équipés de nouvelles technologies pourrait se faire en cohabitation avec les véhicules classiques, on parle alors de trafic mixte. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces chiffres sont les résultats d'expériences effectuées avec des paramètres précis, on ne pourrait espérer obtenir les mêmes résultats dans d'autres conditions.

L'automatisation de la conduite permettrait aussi d'apporter des avantages en terme de sécurité routière. Ce point n'a pas été développé dans ce projet de fin d'études mais plusieurs études<sup>13</sup> se sont penchées sur la question et ont conclu sur un impact positif des VAC sur la sécurité des conducteurs.

Concernant l'autonomie totale des véhicules, l'utilisation de l'intelligence artificielle permettra du point de vue technologique de produire ces véhicules. Néanmoins va se poser la question éthique de son utilisation. En cas d'accident, qui est responsable ? Dans le cas où l'intelligence artificielle est confrontée à un dilemme moral et qu'elle est amenée à choisir entre deux vies, comment l'ordinateur qui pilote le véhicule fera le choix ?

---

<sup>13</sup> Notamment O. Derbel dans sa thèse intitulée "Modélisation microscopique et macroscopique du trafic. Impact des véhicules automatisés sur la sécurité du conducteur"

# Table des figures

---

FIGURE 1 : DIAGRAMME FONDAMENTAL DE GREENSHIELDS (DÉBIT EN FONCTION DE LA DENSITÉ) SOURCE : THÈSE E. BOURREL .....	9
FIGURE 2 : CLASSIFICATION DES MODÈLES DE REPRÉSENTATION MACROSCOPIQUE SOURCE : THÈSE M. UZUNOVA (P23) RÉALISATION : CLÉMENCE BURGUÉ.....	10
FIGURE 3 : ILLUSTRATION DES TROIS ÉCHELLES MACROSCOPIQUE, MÉSOACOPIQUE ET MICROSCOPIQUE SOURCE : <a href="#">DTU ETD</a> .....	14
FIGURE 4 : LES DIFFÉRENTS TYPES DE COMMUNICATION DES VÉHICULES CONNECTÉS SOURCE : MOVIMENTO .....	19
FIGURE 5 : EXTRAIT DES OBJECTIFS DE RECHERCHE DE LA NOUVELLE FRANCE INDUSTRIELLE POUR LE VÉHICULE AUTONOME ET CONNECTÉ.....	21
FIGURE 6 : TABLEAU REGROUPANT LES VALEURS DES PARAMÈTRES DE VITESSE, DE DISTANCE INTER VÉHICULE, DE DISTANCE EN CONGESTION, D'ACCÉLÉRATION MAXIMUM ET DE DÉCÉLÉRATION DÉSIRÉE DE L'IDM SOURCE : THÈSE A. KESTING .....	23
FIGURE 7 : STRUCTURE DU LOGICIEL DE SIMULATION MOVSIM SOURCE : THÈSE A. KESTING RÉALISATION : CLÉMENCE BURGUÉ .....	24
FIGURE 8 : RÉSULTATS DES TRAJECTOIRES DES VÉHICULES POUR LES SIX SCÉNARIOS AVEC DIFFÉRENTS POURCENTAGES DE VÉHICULES CONNECTÉS : A 0%, B 20%, C 40%, D 60%, E 80%, F 100% .....	25
FIGURE 9 : DÉPLACEMENT DES VÉHICULES LORS D'UNE CONGESTION FANTÔME SOURCE : TRAFFICWAVES.ORG .....	26
FIGURE 10 : ILLUSTRATION DE L'ÉMERGENCE D'UNE CONGESTION FANTÔME SOURCE : HELBING (2001).....	27
FIGURE 11 : GRAPHIQUE REPRÉSENTANT UN CYCLE DE CONDUITE HUMAINE ET SON LISSAGE (EN POINTILLÉS) .....	29
FIGURE 12 : SCHÉMA EXPLICATIF DU FONCTIONNEMENT DE LA SIMULATION DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS RÉALISATION : CLÉMENCE BURGUÉ.....	30
FIGURE 13 : TABLEAU DES RÉSULTATS OBTENUS PAR LA SIMULATION AVEC LA RÉDUCTION MOYENNE OBTENUE PAR TYPE DE POLLUANT ÉMIS .....	31

- COSTESEQUE, Guillaume.- Modélisation du trafic routier : passage du microscopique au macroscopique- Thèse, 2012.
- CORTESEQUE, Guillaume Modélisation et simulation dans le contexte du trafic routier, 2013.
- COQUAND, Routes, 1956
- DECOUPIGNY, Christophe.- Modélisation fine des émissions de polluants issues du trafic urbain- 2006
- Déplacements, S. dynamique des, 2017. Les modèles mésoscopiques [WWW Document]. URL <http://www.simulationdynamique.fr/spip.php?rubrique32> (accessed 1.7.19).
- Déplacements, S. dynamique des, 2013. Outils de modélisation [WWW Document]. URL <http://www.simulationdynamique.fr/spip.php?article29> (accessed 12.30.18).
- DERBEL, Oussama.- Modélisation microscopique et macroscopique du trafic : Impact des véhicules automatisés sur la sécurité du conducteur- Thèse, 2016.
- Facteurs humains, technologies embarquées et numériques : Quel rôle pour les politiques de sécurité routière ?, n.d.
- GUÉRIAU, M., BILLOT, R., EL FAOUZI, N.-E., MONTEIL, J., ARMETTA, F., HASSAS, S., 2016. How to assess the benefits of connected vehicles? A simulation framework for the design of cooperative traffic management strategies. Transportation Research Part C Emerging Technologies 67. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.020>
- HEDHLI, P.A., 2017. Regards croisés sur le véhicule autonome 17.
- INRIA Livre blanc VAC, 2018.
- La simulation mésoscopique dynamique à grande échelle, le cas de Paris, n.d. 9.
- LACROIX, B., n.d. Normer pour mieux varier ? La différenciation comportementale par les normes, et son application au trafic dans les simulateurs de conduite 179.
- Les différents cycles de conduite [WWW Document], n.d. URL <http://www.car-engineer.com/fr/les-differents-cycles-de-conduite/> (accessed 1.9.19).
- Les modèles d'écoulement du trafic face aux problèmes d'échelles, n.d.
- Les problèmes d'échelles, n.d.
- LICIT, n.d. MASCAT 2017.
- LIU, J., KOCKELMAN, K.M., NICHOLS, A., Anticipating the emissions impacts of smoother driving by connected and autonomous vehicles, using the MOVES model, n.d.
- KESTING, A. - Microscopic modeling of human and automated driving : towards traffic-adaptative cruise control- 2008
- Objectifs de recherche Véhicule Autonome, n.d.
- Quadstone Paramics, 2016. . Wikipédia.
- Qu'est ce qu'un véhicule autonome ? - Ifsttar [WWW Document], n.d. URL <http://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/espace-science-et-societe/mobilites/dossiers-thematiques/vehicule-autonome/definitions/> (accessed 12.31.18).
- Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems [WWW Document], n.d. URL [https://www.researchgate.net/publication/1863763\\_Traffic\\_and\\_Related\\_Self-Driven\\_Many-Particle\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/1863763_Traffic_and_Related_Self-Driven_Many-Particle_Systems) (accessed 1.4.19).
- TREIBER, M., KESTING, A., n.d. traffic-simulation-de/TrafficSimulationDe.pdf at master · movsim/traffic-simulation-de · GitHub [WWW Document]. URL <https://github.com/movsim/traffic-simulation-de/blob/master/doc/TrafficSimulationDe.pdf> (accessed 1.5.19).
- Vehicle-to-Everything (V2X) Technology Will Be a Literal Life Saver – But What Is It ? | Automotive & Connected Car [WWW Document], n.d. URL <http://eecatalog.com/automotive/2016/05/19/vehicle-to-everything-v2x-technology-will-be-a-literal-life-saver-but-what-is-it/> (accessed 1.2.19).
- YAN, Fei. - Contribution à la modélisation et à la régulation du trafic aux intersections : intégration des communications véhicule-infrastructure - Thèse, 2012.

**Directeur de recherche :**

**Hervé Baptiste**

**Clémence Burgué**

**PFE/DAE5**

**RESEAU**

**2018-2019**

## **Modélisation routière : étude des impacts des véhicules autonomes et connectés sur l'écoulement du trafic et les émissions de polluants**

**Résumé :** Ce projet de fin d'études aborde le thème de la modélisation routière et plus particulièrement les impacts de la substitution des véhicules classiques par des véhicules autonomes et connectés. Dans une première partie, un état de l'art présente les différents modèles existants pour décrire le trafic routier. Cet état de l'art se découpe en trois parties correspondantes à trois échelles qui sont l'échelle macroscopique, microscopique et mésoscopique. La description des modèles s'attarde particulièrement sur l'échelle microscopique. La deuxième partie du projet s'appuie sur de récents travaux de recherche utilisant des logiciels de simulation pour répondre à la question des impacts des véhicules autonomes et connectés en terme d'écoulement du trafic et d'émissions de polluants. Le fonctionnement des logiciels de micro simulation y est décrit à l'aide de certains modèles présentés en première partie du projet. Enfin, une conclusion est apportée concernant les impacts des véhicules autonomes et connectés sur la fluidité du trafic et des émissions de polluants engendrées.

**Mots Clés : Modélisation – Simulation – Trafic routier – Émissions de polluants – Véhicules Autonomes et Connectés – Système de Transport Intelligent**