Modélisation et simulation dans le contexte du trafic routier

Guillaume Costeseque

▶ **To cite this version:**

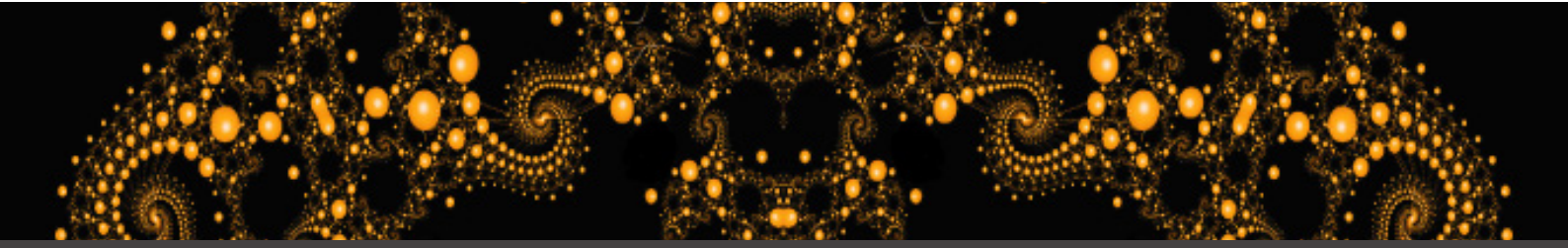
Guillaume Costeseque. Modélisation et simulation dans le contexte du trafic routier. Varenne, F and Silberstein, M. Modéliser et simuler. Epistémologies et pratiques de la modéélisation et de la simulation, Editions Matériologiques, 2013. hal-00965010

HAL Id: hal-00965010
https://enpc.hal.science/hal-00965010

Submitted on 31 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Modélisation et simulation dans le contexte du trafic routier

Guillaume **Costeseque** (École des Ponts ParisTech)

La problématique de la modélisation du trafic routier suscite un vif intérêt scientifique depuis plus d'une soixantaine d'années. Il est possible de décrire très trivialement le trafic routier comme étant le processus de transport depuis une origine et vers une destination par le moyen des infrastructures routières en opposition à l'aérien, au ferroviaire, au fluvial ou au maritime. Le trafic routier résulte alors de la somme de comportements individuels des usagers cherchant à rejoindre chacun leur destination, depuis leur point d'origine sur un réseau donné. Afin de pouvoir reproduire et comprendre la réalité physique de ce phénomène réel complexe, les modèles de transports se sont développés d'une manière remarquable pendant les deux dernières décennies et désormais de nombreux acteurs proposent ou commercialisent des logiciels de simulation aux finalités très diverses. En France, plusieurs acteurs interviennent dans le domaine des transports comme les décideurs publics, les gestionnaires de réseaux, les organismes de recherche et les organismes d'ingénierie ou encore les bureaux d'études. Chacun de ces opérateurs a un rôle différent pour la modélisation et la simulation du trafic, qu'ils soient « réalisateurs » ou « consommateurs » de ces outils. Ce chapitre se propose de dépeindre aussi synthétiquement que possible les évolutions récentes en termes de modélisation et de simulation dans le domaine du trafic routier. Un travail similaire avait été proposé par Jean-Patrick Lebacque en 2005[1]. Il s'attache également à montrer les nombreuses articulations entre la modélisation ou la simulation dans ce domaine.

[1] Jean-Patrick Lebacque, « Modélisation et simulation des transports : un panorama », *Génie logiciel*, 74, 2005, p. 43-54.

© Éditions Matériologiques 2013

En effet, modélisation et simulation sont deux outils toujours complémentaires et rarement concurrents.

Le chapitre est structuré de la façon suivante : la **section 1** se propose de définir les principales notions usuelles dans le domaine du trafic routier. La **section 2** établit un rapide panorama historique des outils de modélisation et de simulation. Plus spécifiquement, les **sections 3 et 4** présentent respectivement les différents modèles de planification et d'écoulement du trafic routier. Une présentation de certains des logiciels de simulation actuels les plus courants est enfin proposée dans la **section 5**.

1 | Quelques définitions

Dans l'ensemble de ce chapitre, nous nous intéressons au distinguo entre « modélisation » et « simulation ». D'une part, la modélisation a pour but de concevoir un modèle permettant de mieux appréhender la réalité physique d'un phénomène ou d'un système déterminé, trop complexe à appréhender directement. Ainsi la modélisation exprime souvent de façon mathématique le fonctionnement d'un système continu dans le temps tout en cherchant la compréhension et la simplification analytique de ce système. Un modèle a pour fin d'être testé numériquement dans un outil de simulation.

D'autre part, la simulation va s'appuyer sur les « produits » de la modélisation afin de pouvoir étudier les effets d'une action sur ce système. La simulation cherche à décrire la dynamique de systèmes complexes et à tester différents scénarios. Ces expérimentations sont menées grâce à l'outil informatique. En somme un outil de simulation peut se réduire schématiquement à la programmation sur ordinateur d'un certain modèle. Depuis quelques années, nous avons assisté au développement des techniques informatiques et notamment la puissance et la vitesse de calcul des microprocesseurs actuels, ainsi que la capacité de stockage de données des ordinateurs. Ces évolutions permettent d'envisager des applications en quasi-temps réel, du moins de l'ordre de quelques secondes là où auparavant il aurait fallu plusieurs jours. Cette rapidité de calcul permet en outre de tester en simulation de grandes variétés de configurations. Dans le cas du trafic routier, il peut s'agir de tester plusieurs stratégies de régulation du trafic (gestion des dépassements, de la vitesse limite autorisée, gestion des carrefours à feux) mais aussi de la configuration de l'infrastructure : implantation d'un carrefour, modification du nombre de voies d'une section, etc.

Étant une image de la réalité pour mieux comprendre un phénomène complexe, un modèle est nécessairement basé sur des hypothèses simplifica-

trices. À ce sujet, George E. P. Box (le désormais célèbre statisticien) déclarait que « tous les modèles sont faux mais certains sont utiles[2] ». Il est souvent nécessaire de se référer aux hypothèses initiales du modèle afin de savoir si notre cas d'utilisation correspond bien au domaine de validité du modèle. Dans le cas où le flux de véhicules est vu par le prisme de la dynamique des fluides, il est important de noter la différence entre le nombre de molécules dans une mole (donné par le nombre d'Avogadro soit $N_A = 6{,}02.10^{23}$ éléments) et le nombre maximal de véhicules dans un kilomètre (de l'ordre de quelques centaines). Nous voyons là un exemple d'hypothèse simplificatrice pour les modèles hydrodynamiques.

La modélisation du trafic au sens large comprend *a minima* deux stratégies d'approches différentes mais non indépendantes. Dans le cas qui nous intéresse, les transports se prêtent mal à la théorisation car ils sont à la fois trop complexes pour permettre une description par éléments mais ils sont aussi insuffisamment complexes pour permettre les « passages à la limite » usuels en physique. La première est reliée à l'étude du processus d'affectation des usagers sur un réseau donné. Nous définissons l'affectation comme la façon dont se répartit le volume connu d'individus (définissant une demande) sur un ensemble de chemins formant un réseau caractéristique d'infrastructures (formant l'offre). La seconde branche se propose de décrire plus finement l'écoulement des véhicules sur un chemin fixé. Elle est donc complémentaire de la première dans le sens où elle exploite les résultats de cette affectation. Il s'agit dans ce cas de comprendre les comportements des usagers en poursuite ou encore les phénomènes d'insertion et de changements de voie. L'étude de l'écoulement du trafic a aussi pour ambition de pouvoir décrire et expliquer les phénomènes de congestion.

2 | La multiplicité des outils

2.1 | Le constat historique

Le développement des modèles de transport trouve principalement son origine dans différents travaux des années 1950. Citons par exemple les articles de Lighthill et Whitham et de Richards[3] qui ont les premiers proposé un modèle

[2] George E. P. Box & Norman R. Draper, *Empirical Model-Building and Response Surfaces*, Wiley, 1987, p. 424.

[3] Michael J. Lighthill & Gerald B. Whitham, "On kinetic waves. II. Theory of Traffic Flows on Long Crowded Roads", *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*, 229, 1955,

© Éditions Matériologiques 2013

hydrodynamique de trafic, mais aussi ceux de John Wardrop[4] et de Martin Beckmann[5] à qui l'on doit des concepts aujourd'hui grandement utilisés pour décrire l'affectation à l'équilibre du trafic comme la différenciation entre équilibre usager et équilibre système. À compter de ce point de départ, le nombre de modèles et d'outils de simulation a fortement augmenté. Ainsi en 2004 pas moins de 150 modèles/simulations de trafic véhiculaire pour la planification et la conception, la gestion et tarification ou encore le contrôle ont été recensés.

La modélisation du trafic routier permet ainsi la représentation d'un phénomène social qui est apparu avec les activités humaines et le besoin de transport (de personnes ou de marchandises), mais qui a très vite fait face aux problèmes de congestion et de sécurité. Rappelons que les véhicules automobiles se multiplient au tout début du XX^{e} siècle avec notamment aux États-Unis la Ford T, premier véhicule de grande série, apparu en 1908. L'accès populaire à la voiture et à son utilisation entraîne une forte hausse de la demande de transport et de ce fait, l'apparition des premières congestions. Cela entraîne une augmentation des diverses pollutions (sonore, aérienne, visuelle), accentue les risques (accidentologie, environnement, crise énergétique). Cela représente aussi une forte perte de temps pour les usagers et une diminution conséquente de la productivité tant il y a un lien fort entre système de transport et système économique. Les besoins de régulation du trafic routier en ont donc fait un sujet de recherche très important. Notons que les prérogatives changent peu au fil du temps bien qu'il y ait un intérêt accentué pour les besoins d'informations (état du système, évaluation *a posteriori*) et de gestion du système.

En règle générale, le recueil de données propres est un écueil majeur de la modélisation. Aussi les travaux de recherche sont aussi rythmés par la disponibilité ou non d'une base de données exploitable. Historiquement, les premières études afin d'appréhender empiriquement ce phénomène sont à mettre au crédit de Bruce Greenshields avec en 1935[6] une méthode photographique de décomposition du mouvement. Signalons aussi les études de trafic sous le tunnel Lincoln

p. 317-345 @. Paul I. Richards, "Shock Waves on the Highway", *Oper. Res.*, 4, 1956, p. 42-51 @.

[4] John G. Wardrop, "Some theoretical aspects of road traffic research", *Institution of Civil Engineers*, 1952, p. 325-352.

[5] Martin J. Beckmann, Charles B. McGuire & Christopher B. Winsten, *Studies in the economics of transportation*, Yale University Press, 1956 @.

[6] Bruce D. Greenshields, "A study of highway capacity", *Proceedings Highway Re-search Record*, Washington, 14, 1935, p. 448-477 @.

dans les années 1950 à New-York, et plus récemment le programme NGSIM[7] à Berkeley en Californie ou encore les données MOCoPo[8] de Grenoble.

La modélisation et la simulation bénéficient graduellement de nouvelles ressources. Il convient de citer avant tout l'émergence des ressources informatiques avec de nouveaux matériels (ordinateurs plus puissants) et de nouveaux logiciels (langages de programmation et sorties graphiques perfectionnées). Rappelons également l'apparition de nouveaux matériels de mesure et d'acquisition de données (caméras vidéo haute définition, lecteurs de plaques minéralogiques). La modélisation profite également des avancées scientifiques d'autres disciplines en mathématique, physique ou recherche opérationnelle. La prise en compte dans les années 1960 des systèmes dynamiques et de la non-linéarité, c'est-à-dire de la non-proportionnalité entre les effets et les causes, illustre un des apports de la mathématique à la modélisation du trafic. Autre exemple, le concept physique d'auto-organisation prend tout son sens en trafic. L'idée est qu'un comportement d'ensemble non trivial peut émerger des interactions entre les nombreux agents composant un système complexe. La visée applicative directive serait de conditionner le comportement individuel des agents afin d'obtenir un comportement émergent global optimal.

2.2 | Modèles et simulations des transports

Dans le cadre des déplacements sur un réseau routier, il existe une grande variété d'approches en modélisation. Il est possible de les regrouper en quatre classes (à savoir les modèles d'occupation du sol, ceux de demande de déplacement, les modèles d'écoulement du trafic ou encore les modèles de gestion de réseau) qui sont regroupées ci-dessous. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux modèles de demande ainsi qu'aux modèles d'écoulement.

Catégorie de modèles	But	Échelle temporelle	Échelle spatiale
Occupation du sol	Planification, gestion	Très long terme	Global
Demande de déplacement	Planification	Long terme	Global
Écoulement de trafic	Évaluation, planification ou gestion	Court terme	Global ou local
Gestion de réseau	Contrôle, régulation	Très court terme	Local

[7] U.S. Department of Transportation, "Next Generation Simulation" @.
[8] "Measuring and mOdelling traffic Congestion and Pollution" @.

© Éditions Matériologiques 2013

D'une part, les modèles statiques sont généralement utilisés dans le cadre de la planification des transports et des réseaux. Ils permettent de disposer de prévisions de trafic pour dimensionner au mieux des infrastructures très coûteuses et construites pour le long terme. Ces modèles cherchent à connaître ou à simuler la demande de trafic en certains points du réseau dans le but de pouvoir proposer de façon statique (d'où le terme de *planifier* dans une démarche de prévision) des méthodes de régulation soit en agissant sur la répartition de la demande, soit en modulant l'offre. Dans ce cadre-là, les modèles de trafic sont essentiellement utilisés pour estimer une affectation (statique ou dynamique) de la demande (correspondant aux véhicules) sur un réseau routier et pour pouvoir gérer cette demande de trafic selon l'offre du réseau. Le principal modèle statique est classiquement appelé modèle à quatre étapes. Il considère en effet une première étape de *génération* (donnant le nombre de déplacements pour une période de temps), une seconde étape de *distribution* (où est calculée la matrice des mouvements origine-destination par zone), une étape de *choix modal* (correspondant au choix entre les différents moyens de transport disponibles) et enfin une étape finale d'*affectation* de la demande sur l'offre du réseau.

D'autre part, les modèles dynamiques permettent de décrire l'écoulement physique du trafic routier. Certains ont été bâtis sur des analogies entre l'écoulement du trafic routier et l'écoulement d'un fluide ou la cinétique des gaz. D'autres modèles considèrent le réseau comme une suite de cellules s'échangeant de l'information sous forme de véhicules. Enfin, d'autres cherchent à décrire le mouvement d'un véhicule en fonction des caractéristiques du véhicule qui le précède. Ces modèles sont notamment utilisés pour des stratégies de régulation des congestions qui se forment lorsque la demande de trafic devient supérieure à l'offre. Cela comprend des méthodes comme le délestage, la gestion dynamique des voies ou la régulation dynamique des vitesses. L'usage des modèles macroscopiques de type mécanique des fluides se justifie par leur simplicité et par leur robustesse quant à la gestion de trafic, correspondant à l'usage majoritaire des modèles d'écoulement dans les centres de contrôle. Cependant, il est possible de se demander quelle est la cohérence de modéliser des conducteurs conscients et intentionnels à la manière de particules d'un fluide. D'une part, relevons que les intentions individuelles sont conditionnées par les règles morales et collectives de comportement, mais aussi par la disponibilité de l'espace de circulation, ce dernier étant une ressource partagée entre chaque usager. D'autre part, la modélisation de l'écoulement à l'échelle macroscopique s'intéresse principalement aux situations de congestion. Dans

ce cas, le nombre de véhicules sur une portion de route est élevé et les conducteurs sont fortement contraints par leurs plus proches voisins. Ces interactions gomment ainsi une grande part de la variabilité interindividuelle. Aussi, il n'est pas incohérent de considérer l'écoulement des véhicules sur une route en analogie à des molécules d'eau dans un tuyau, par exemple. Cependant, la prise en compte de la variabilité entre conducteurs au niveau macroscopique constitue une branche non négligeable de la recherche actuelle (modélisation stochastique, modèles macroscopiques du second ordre, etc.), mais de nombreux débats existent concernant les gains de représentation relativement à la complexité croissante de ces modèles.

Notons enfin une autre différence entre modèles « statiques » de planification et modèles « dynamiques » d'écoulement : tandis que les modèles de planification permettent la mise en place de méthodes sur le moyen et le long terme, les modèles dynamiques ont pour but l'utilisation de moyens de gestion sur le court terme.

3 | Modèles et simulation de type planification

3.1 | Affectation statique

Une étude de trafic débute lors de la commande par un opérateur qui souhaite tester une modification future soit de son réseau (ajout ou suppression de voies), soit de la demande (construction d'un centre commercial, par exemple) ou encore de la stratégie de gestion de son réseau (implantation d'un feu tricolore, baisse de la vitesse maximale). Afin de pouvoir répondre à cette commande, il est nécessaire de connaître le réseau, la demande et la stratégie de gestion, actuels et futurs, dans chacun des cas. Afin de savoir caractériser la situation existante, il faut déterminer la demande actuelle : la démarche est différente selon que l'on travaille sur un axe ou sur l'ensemble d'un réseau maillé. Dans le premier cas, la demande sera estimée en amont de la section d'étude tandis que dans le second cas, il sera nécessaire de calculer une matrice des déplacements de type origine-destination. De plus, il est important de connaître l'offre du réseau et ses paramètres pouvant agir sur la capacité de l'infrastructure[9].

[9] La capacité est souvent définie par le nombre maximal de véhicules pouvant être écoulés en une période de temps donnée. Elle dépend de paramètres comme le nombre de voies, la vitesse maximale sur la section, la déclivité ou encore la présence de points de discontinuité du réseau (entrée et/ou sortie).

© Éditions Matériologiques 2013

Concernant la description de la demande actuelle, la plupart des logiciels ne nécessitent en entrée que la donnée des matrices origine-destination. Certains comme Aimsun et Symuvia demandent aussi à connaître les flux directionnels, c'est-à-dire les proportions de mouvements tournants à chacun des carrefours du réseau. Notons que la matrice origine-destination fournie est déterminée de façon statique pour un instant donné. Classiquement, il s'agit de l'heure de pointe du matin ou du soir.

L'étape suivante de l'étude de trafic consiste à simuler avec un certain logiciel, la situation existante. À partir des données actuelles, le logiciel doit être en mesure de retourner des scénarios en accord avec les faits observés sur le réseau. Il est donc important de corriger les biais éventuels en agissant sur les paramètres des modèles utilisés par le logiciel. Le logiciel Dynasim possède par exemple différents paramètres pour la loi de poursuite, pour le modèle de changement de voie ou encore pour le modèle d'insertion. Cette étape ressemble à un calage du logiciel.

La dernière étape consiste à modifier l'élément souhaité (réseau et/ou demande et/ou stratégie de gestion) et à pouvoir quantifier les impacts entraînés sur l'écoulement du trafic. Il est intéressant de noter qu'il y a pour cette étape-là du travail une réelle dépendance des résultats fournis par le logiciel vis-à-vis du nombre de réplications effectuées.

Historiquement, le modèle statique est le modèle le plus ancien utilisé pour les études de planification. Dans les années 1980 en effet, les études portaient essentiellement sur le domaine routier. Désormais, elles intègrent également les projets de transports en commun. Le modèle statique a pour but de déterminer une matrice des déplacements *routiers* en s'appuyant sur le principe de la modélisation à quatre étapes. Le modèle à quatre étapes comprenant génération, distribution, choix modal, affectation est un modèle éprouvé et adopté par de nombreux outils de simulation comme Cube/Trips, Cube/Minutp, Omnitrans, Saturn, Transcad. La quatrième étape du modèle, à savoir l'affectation sur les arcs du réseau, est effectuée par simulation grâce à des logiciels du type de Visum. Il s'agit d'une affectation statique, ne permettant que le calcul de plus courts chemins, sans aucune prise en compte du phénomène de propagation du trafic. Dans Visum, la répartition est réalisée selon le modèle Logit et axé autour d'un algorithme Tribut, fonctionnant sur un double critère : à la fois le temps de parcours (avec une distribution de la valeur du temps) et le prix[10].

[10] Pour une présentation plus complète du modèle à quatre étapes, voir Patrick Bonnel, *Prévoir la demande de transport*, Presses des Ponts, 2004.

3.2 | Affectation dynamique

Il est très difficile de prendre en compte la dimension temporelle des variables pour l'affectation. Il s'agit d'un domaine de recherche très actif. Les modèles actuels sont des modèles simplifiés de propagation mésoscopiques supposant que la durée de déplacement sur un tronçon est fonction du volume de véhicules. Ces modèles se rencontrent dans les logiciels Contram, Dynasmart ou Dynamit. D'autres ont une approche macroscopique comme Metacor ou Metanet.

En connaissant le volume de trafic s'écoulant par chacune des branches du réseau à la suite d'observations et/ou de simulations statiques, il est possible d'utiliser alors des modèles dynamiques de gestion du trafic : ils s'appuient à la fois sur la gestion des carrefours (y compris des carrefours à feux) – ce qui couvre la gestion des priorités ou des changements de phase de feux mais aussi la gestion de l'information routière (stationnement, état de trafic, etc.) – et de la signalisation (directionnelle et normative).

La simulation dynamique comprend non seulement l'affectation dynamique du trafic mais aussi la simulation de l'écoulement dynamique de celui-ci sur le réseau. Le principe est de pouvoir illustrer le fonctionnement du réseau mais surtout d'obtenir des données de trafic simulées de multiples natures, comme les débits, la vitesse pratiquée, le taux d'occupation et/ou la densité, etc. Un des indicateurs le plus souvent utilisés lors de la simulation dynamique est sûrement la matrice des temps de parcours sur le réseau. Cela permet de savoir quel est l'impact de la modification du réseau et/ou de la demande et/ou de la stratégie de gestion sur les déplacements individuels des usagers. D'autres indicateurs peuvent être utilisés afin de caractériser les impacts des modifications.

La simulation dynamique s'intéresse classiquement à :

- des points de mesure particuliers où il est possible d'avoir des données *in situ* (notamment avec la présence d'une station de comptage) ;
- des sections du réseau pouvant engendrer de la congestion, comme les intersections, les convergents ou les divergents ;
- des itinéraires déterminés de type origines-destinations ;
- l'ensemble du réseau et son fonctionnement global.

Les simulations dynamiques permettent d'analyser le fonctionnement d'un aménagement à partir de plans, de matrices de déplacements origine-destination et de plans de feux. Elle permet également l'analyse des apports éventuels d'une régulation d'accès ou d'une gestion dynamique de trafic. Cette approche s'est par ailleurs fortement développée lors des dernières années avec la nécessité

© Éditions Matériologiques 2013

de mettre en place une gestion du trafic performante. Enfin, la simulation dynamique est utilisée pour analyser des scénarios d'événements routiers prévisibles de grande importance (accidents critiques, travaux particuliers, sous tunnel par exemple, etc.). Cela permet de mettre en place des plans de gestion du trafic, reprenant un catalogue de ces scénarios d'accident et la stratégie à adopter afin d'en limiter les inconvénients. Cela permet une meilleure compréhension du réseau d'infrastructures routières tout en facilitant les prises de décision et la communication avec les différents partenaires.

Les outils de simulation dynamique font bien souvent référence à la modélisation microscopique du trafic. Les véhicules sont alors pris en compte de façon individuelle. La modélisation porte sur leur cinématique propre suivant leur comportement et leur environnement proche (approche d'un point singulier comme un cédez-le-passage, manœuvre d'insertion ou de dépassement, etc.).

Les modèles implémentés dans les logiciels de simulation sont parfois de type stochastique dans la mesure où les paramètres des véhicules sont attribués de façon aléatoire, à partir de distributions statistiques. Lorsque c'est le cas, le caractère aléatoire du paramétrage impose de lancer plusieurs réplications, c'est-à-dire plusieurs simulations avec des paramètres de génération différents afin que le modèle puisse être en moyenne représentatif de l'infrastructure, mais également que l'on puisse mieux appréhender les différents fonctionnements de ce réseau.

Les types de modèles qui interviennent sont les modèles de poursuite, les modèles de dépassement et d'insertion. Un modèle de poursuite se propose de décrire le comportement d'un conducteur réagissant aux variations du comportement de conduite du véhicule qui le précède. Le conducteur évalue les variations de conduite de son prédécesseur à partir de l'angle solide sous lequel il perçoit le véhicule leader. Trivialement, plus le véhicule est proche et plus son angle solide est important. La loi de poursuite régit la progression des véhicules qui adoptent différentes stratégies (selon le modèle utilisé) comme maintenir une certaine distance intervéhiculaire lorsqu'ils se rapprochent de leur véhicule leader. Les lois de dépassement interviennent pour maintenir la vitesse désirée des véhicules, occuper les voies lorsqu'elles sont saturées ou pour se positionner sur la file adéquate lors de l'engagement d'une manœuvre de changement de direction. Pour finir, les lois d'acceptation de créneaux (traduction directe de l'anglais *gap acceptance*) permettent de prendre en compte le respect des autres véhicules en cas de situation de changement de voie, de cédez-le-passage ou de stop. Les injections de véhicules dans le réseau suivent également lois de

distribution aléatoire, sous contrainte de respecter les volumes totaux de trafic entre chaque couple de la matrice origine-destination.

4 | Modèles d'écoulement du trafic

Dans la grande majorité des approches de modélisation, le trafic automobile est assimilé à un fluide où les véhicules sont identifiés à des particules en interaction. Ces interactions ont été étudiées avec soin depuis le milieu du XX^{e} siècle et ont permis de dégager un grand nombre de lois de comportement. Celles-ci permettent par exemple de construire des modèles microscopiques très utiles, en particulier pour la conception et pour la simulation à petite échelle du trafic. Cependant, ces modèles microscopiques se révèlent n'être plus cohérents pour de nombreuses autres applications telles que la gestion du trafic, la planification et l'évaluation des réseaux. En effet, l'utilisation de ces modèles est parfois limitée par l'impossibilité d'avoir accès à la description détaillée des dynamiques individuelles des véhicules. Dans ces cas, l'utilisation de modèles macroscopiques s'impose.

À l'image des classifications usuelles proposées par la littérature, nous considérons les modèles de trafic selon le niveau de détail qu'ils proposent. Nous distinguerons ainsi les modèles microscopiques des modèles macroscopiques. Nous faisons volontairement l'impasse sur l'existence des modèles dits mésoscopiques qui permettent de caractériser le comportement du trafic selon des paquets de véhicules. Ces modèles sont relativement similaires aux modèles macroscopiques à la différence qu'ils sont appliqués à un ensemble fini de véhicules. L'exemple des modèles cinétiques s'appuyant sur une distribution statistique des véhicules est toutefois présenté ci-après.

4.1 | Modèles macroscopiques

Les modèles macroscopiques sont issus d'une analogie hydrodynamique de l'écoulement des véhicules. L'objet de ces modèles est de pouvoir caractériser le comportement global du trafic, à une échelle d'étude relativement importante (dizaine ou centaine de mètres en espace et minute en temps). Ces modèles ont la particularité d'avoir une forme analytique simple et de pouvoir être discrétisés efficacement. Ils sont donc tout particulièrement utilisés dans le cadre de la modélisation des grands réseaux. Leurs applications courantes couvrent la simulation du trafic en vue de la planification et de la conception des infrastructures, mais couvrent aussi la gestion dynamique du trafic et l'évaluation de ces mesures de gestion *a posteriori*. Nous retrouvons les modèles

© Éditions Matériologiques 2013

macroscopiques discrétisés dans différents logiciels comme SSMT, Netcell, Strada, Freflo, Traf-Corflo, Metacor ou Metanet.

Dans le cas des modèles macroscopiques, nous introduisons les variables suivantes :

■ le nombre de véhicules noté $N(x,t)$;

■ le débit noté classiquement $Q(x,t)$ correspondant au nombre de véhicules s'écoulant à un point d'abscisse x et au temps t par unité de temps :

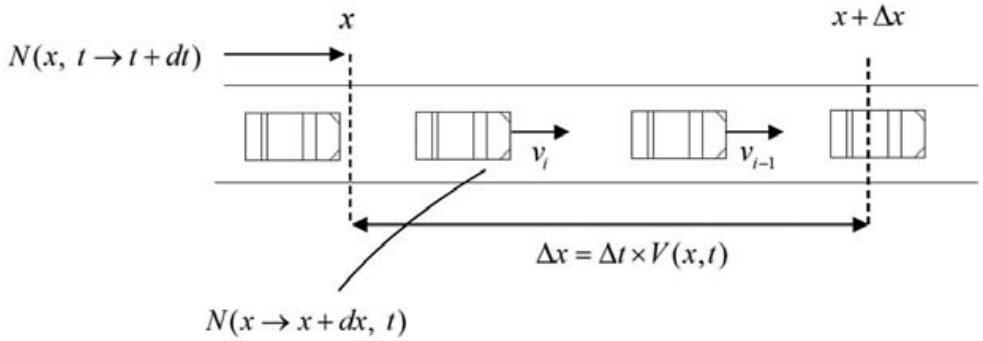
$$Q(x,t) = \frac{N(x,t \to t+dt)}{dt}$$

■ la concentration (appelée également densité spatiale instantanée) notée $K(x,t)$ correspondant au nombre de véhicules par unité de longueur se trouvant sur une section voisine du point d'abscisse x, au temps t :

$$K(x,t) = \frac{N(x \to x+dt,t)}{dx}$$

■ la vitesse de flot, notée $V(x,t)$, correspondant à la vitesse moyenne spatiale des véhicules situés dans la section $[x ; x - \Delta x]$ au temps t. Cette vitesse de flot est donnée par le rapport entre le débit instantané et la concentration. En outre, il est possible de montrer que la vitesse de flot est égale à la vitesse moyenne spatiale des vitesses individuelles :

$$\overline{V}_s(x \to x+ \quad x,t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v_i$$



4.1.1 | Modèles du premier ordre

Le modèle le plus couramment utilisé est également un des modèles pionniers en modélisation du trafic routier. Il s'agit du modèle développé simultanément par Lighthill et Whitham, et par Richards, s'appuyant sur une analogie

avec la dynamique des fluides. Plus communément appelé modèle LWR, ce modèle fait intervenir trois variables décrites précédemment, à savoir la vitesse, le débit et la concentration. Pour que le système soit totalement déterminé, il se compose des trois équations suivantes :

- l'équation de définition de la vitesse ;
- l'équation de conservation, provenant de la conservation du nombre de véhicules sur une section de longueur infinitésimale et pendant un laps de temps ;
- le diagramme fondamental permettant de postuler que la vitesse de flot est obtenue en permanence pour un état d'équilibre, celui-ci ne dépendant uniquement que de la concentration instantanée. Il s'agit d'une équation d'état séparant généralement une partie fluide et une partie congestionnée.

$$\begin{cases} Q(x,t) = K(x,t) \times V(x,t) \\ \dfrac{\partial Q(x,t)}{\partial x} + \dfrac{\partial K(x,t)}{\partial t} = 0 \\ V(x,t) = V_e(K(x,t)) \end{cases}$$

Ce système d'équations peut être condensé en une équation aux dérivées partielles, raison pour laquelle il est commun de parler de modèles de premier ordre pour cette famille de modèles. La résolution de cette équation permet de déterminer la valeur de concentration et de déduire d'après la relation d'équilibre, les valeurs de débit et de vitesse correspondantes. Il existe une grande variété de lois décrivant l'évolution du débit en fonction de la densité. Ces relations sont appelées *diagrammes fondamentaux* (DF). Dans la littérature, les DF sont généralement considérés soit linéaires par morceaux, soit quadratiques par morceaux. Les diagrammes fondamentaux doivent répondre à certaines observations expérimentales fondamentales :

- Lorsque le nombre de véhicules est suffisamment faible sur la section considérée, ces véhicules n'interagissent pas et chacun peut circuler à la vitesse désirée, appelée vitesse libre (prise généralement égale à la vitesse maximale moyenne).
- En augmentant le nombre de véhicules dans la section, les interactions deviennent plus importantes et les vitesses pratiquées diminuent. La vitesse de flot est donc une fonction décroissante de la concentration.
- Dans le cas extrême où la section est saturée et donc la concentration est maximale, la vitesse et le débit sont nuls.

Les modèles type LWR sont couramment usités. Ils sont notamment appréciés pour leur robustesse, leur simplicité d'utilisation mais aussi par l'existence

© Éditions Matériologiques 2013

de solutions analytiques pour des cas simples. De plus, de nombreuses extensions en ont été déduites afin de pouvoir permettre la prise en compte de la variabilité des usagers dans leurs comportements mais pour introduire aussi la variabilité des véhicules. Malgré tout, le modèle LWR présente certains inconvénients. Le principal est le fait qu'il considère le trafic dans un état d'équilibre à chaque instant. Les phases transitoires ne sont de ce fait pas prises en compte car le modèle considère que le trafic passe d'un état d'équilibre à un autre état d'équilibre instantanément.

4.1.2 | Modèles du second ordre

Les modèles de second ordre permettent de prendre en compte les états de non-équilibre ainsi que les situations de convergence vers un état d'équilibre. L'équation d'équilibre utilisée dans le cadre des modèles de premier ordre est ainsi remplacée par une équation dynamique exprimant l'accélération du flux. L'accélération est composée d'un terme de relaxation[11] vers la vitesse d'équilibre $V_e(K)$ ainsi qu'un terme physique de comportement individuel.

Les premiers travaux dans cette direction ont été proposés par Payne[12] puis Whitham[13] au début des années 1970. Ces modèles ont fait l'objet de plusieurs débats quant à leur intérêt et leurs limites. Le renouveau des modèles de second ordre est apparu avec Aw et Rascle en 2000[14], ainsi que Zhang en 2002[15]. Il est possible de dégager un formalisme commun de ces modèles :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial K}{\partial t} + \dfrac{\partial KV}{\partial x} = 0 \\ \dfrac{\partial V}{\partial t} + V\dfrac{\partial V}{\partial x} = \dfrac{1}{t}(V_e(K) - V) - \dfrac{1}{K}C^2(K)\dfrac{\partial K}{\partial x}) \end{cases}$$

où C correspond à la célérité caractéristique du trafic et τ désigne un temps de relaxation. Le premier terme du membre de droite correspond à la relaxa-

[11] En utilisant l'analogie avec les systèmes dynamiques, le système « trafic » va chercher à relâcher les contraintes qui s'appliquent à lui afin de tendre vers son état d'équilibre naturel.

[12] Harold J. Payne, "Models of freeway traffic and control", *Math. Models Publ. Sys.*, 28, *Simul. Council Proc.*, 1971, p. 51-61.

[13] Gerald B. Whitham, "Linear and nonlinear waves", *Wiley-Interscience*, 1974 @.

[14] A. Aw & M. Rascle, "Resurrection of 'Second Order' Models of Traffic Flow", *SIAM, Journal on Applied Mathematics*, 60, 2000, p. 916-938 @.

[15] H. Michael Zhang, "A non-equilibrium traffic model devoid of gas like behavior", *Transportation Research*, Part B, 36, n° 3, 2002, p. 275-290 @.

tion qui explique la dispersion des points de mesure autour de l'équilibre. Le second terme est un terme d'anticipation. Ces modèles ont l'avantage de mieux reproduire la variabilité des comportements à l'échelle macroscopique mais ce gain par rapport au modèle LWR se fait au détriment de la simplicité de calcul.

4.1.3 | Modèle cellulaire

Le modèle cellulaire proposé par Daganzo en 1993[16] utilise l'idée d'automates cellulaires avec une loi macroscopique de type LWR. Il s'appuie sur un diagramme fondamental linéaire par morceaux. Le réseau est divisé en cellules de longueur égale à la distance parcourue par un véhicule à la vitesse maximale. Chaque cellule i contient au temps t, $n_i(t)$ véhicules. Le nombre maximal de véhicules pouvant être contenus par la cellule i est donné par $N_i(t)$.

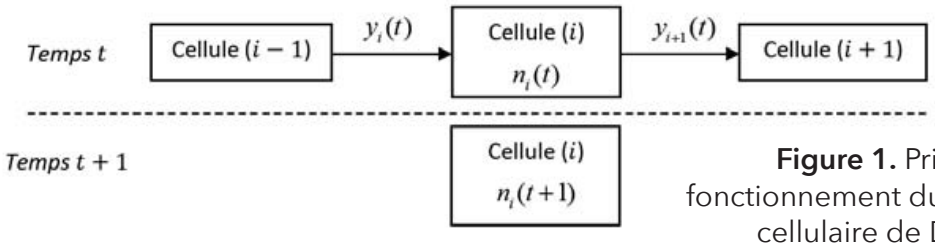


Figure 1. Principe de fonctionnement du modèle cellulaire de Daganzo.

La loi de transmission est donnée sous la forme d'une suite récursive sur les cellules par :

$$n_i(t+1) = n_i(t) + y_i(t) - y_{i+1}(t)$$

où $y_i(t)$ représente le flux entrant dans la cellule i au temps t, donné par le minimum entre l'offre de la cellule aval et la demande de la cellule amont. Ce modèle correspond au schéma numérique de Godunov appliqué avec des pas d'espace et de temps unitaires. Le schéma de Godunov appliqué au trafic routier a également été utilisé par Lebacque en 1993 et 1996[17].

4.1.4 | Modèles cinétiques

Ces modèles ont été introduits afin de prendre en compte le caractère stochastique du trafic et des flux. Ils sont basés sur une analogie avec les méthodes

[16] Carlos F. Daganzo, *The cell transmission model* (Parts 1 & 2), California PATH Working paper, University of California, 1993 @.

[17] Jean-Patrick Lebacque, « Les modèles macroscopiques du trafic », *Annales des Ponts*, 67, 1993, p. 28-45 ; "The Godunov Scheme and what it means for First Order Traffic Flow Models", *in* Jean-Baptiste Lesort (ed.), Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Pergamon-Elsevier, 1996.

© Éditions Matériologiques 2013

utilisées pour la théorie cinétique des gaz de Boltzmann. Le premier modèle de ce type a été développé par Prigogine et Herman en 1971[18]. Il s'agit d'un modèle macroscopique qui s'appuie sur une distribution des vitesses des véhicules $f(x,v,t)$. La quantité $f(x,v,t).dx.du$ décrit alors la quantité de véhicules ayant statistiquement la vitesse v et étant contenus entre les positions x et $x + dx$ au temps t. Le modèle donne ainsi l'évolution de la densité des particules $K(x,t)$ comme une fonction du temps t, de la position d'une particule x et de sa vitesse v.

Ce genre de modèle, plus coûteux en termes de temps de calcul par comparaison au modèle LWR, est généralement peu utilisé. De nombreuses critiques ont été formulées du fait de la difficulté de déterminer des solutions analytiques ou encore de le calibrer et de le valider. D'autres modèles cinétiques ont été développés par la suite dans le but d'améliorer le modèle de Prigogine et Herman. Il est possible de citer les travaux d'Helbing[19] ou encore de Hoogendoorn et Bovy[20]. Ces travaux se sont ainsi proposés d'inclure les effets des changements de voies ou encore les hétérogénéités des véhicules.

4.2 | Modèles microscopiques

Dans le cas des modèles microscopiques, les véhicules sont individualisés. Nous nous intéressons au cas des lois de poursuite entre deux véhicules consécutifs et passons sous silence les cas des conflits pour les intersections ou celui des changements de voie. Les modèles microscopiques offrent une grande richesse de détails mais nécessitent un calibrage propre du fait des nombreux paramètres individuels. Cela les rend difficiles d'utilisation pour une application temps réel. Les modèles microscopiques ont été implémentés dans de nombreux outils commerciaux comme Aimsun, Corsim, Dracula, Integration, Mitsim, Paramics ou encore Vissim.

Nous utiliserons les notations suivantes :

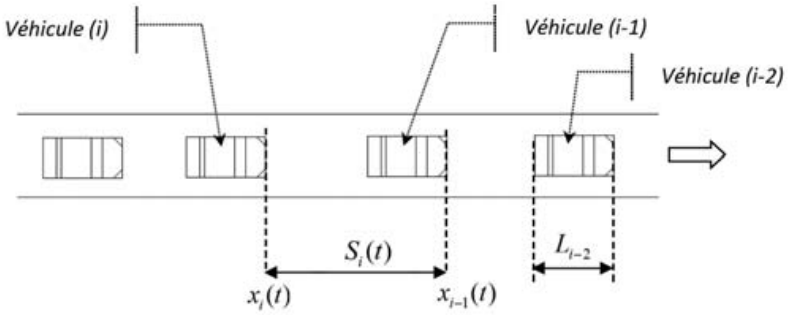
- la position du véhicule i au temps t, notée $x_i(t)$;
- la vitesse instantanée du véhicule i au temps t, notée $v_i(t) = \dot{x}_i(t)$;
- l'accélération du véhicule i au temps t, notée $a_i(t) = \ddot{x}_i(t)$;

[18] Ilya Prigogine & Robert Herman, *Kinetic theory of vehicular traffic*, American Elsevier Publishing Co., 1971.

[19] Dick Helbing, "Traffic and self-driven many-particle systems", *Reviews of Modern Physics*, 73(7), 2001, p. 1067-1141 @.

[20] Serge P. Hoogendoorn & P.H.L. Bovy, "State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modeling", *Journal of Systems and Control Engineering*, Special Issue on Road Traffic Modeling and Control, 215(4), 2001, p. 283-303 @.

- la longueur du véhicule i notée L_i.
- l'interdistance entre le véhicule i et son véhicule leader (i-1) au temps t, notée $S_i(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t)$;
- la vitesse relative du véhicule i par rapport à son véhicule leader (i-1) au temps t, notée $\dot{S}_i(t) = \dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)$.



Classiquement, les modèles microscopiques ont pour principale vocation de pouvoir décrire les comportements individuels des usagers pour deux situations de conduite :

- Le comportement en poursuite, correspondant au comportement d'un conducteur en réponse aux actions du véhicule qui le précède.
- Le comportement de changement de voie au sens large. Cela comprend les manœuvres de dépassement en section courante tout comme les manœuvres d'insertion.

Dans le cas des modèles de poursuite, il est courant de distinguer deux cas types de conduite :

- Le véhicule ne perçoit pas le véhicule qui le précède du fait d'un écart intervéhiculaire suffisamment important et dans ce cas, le conducteur circule à sa vitesse maximale désirée. Il s'agit du cas de conduite libre.
- Le conducteur souhaite circuler à sa vitesse libre mais son véhicule leader ne le lui permet pas, le contraignant ainsi à adopter une vitesse inférieure à sa vitesse désirée. Il s'agit alors du cas de conduite en poursuite où le véhicule entretient de fortes interactions avec son véhicule leader.

Les modèles de poursuite se proposent essentiellement de reproduire le comportement de conduite d'un véhicule lorsque sa propre vitesse est contrainte par le véhicule précédent.

4.2.1 | Modèles à distance de sécurité

Ces modèles cherchent à décrire la dynamique de poursuite sous la contrainte d'une distance minimale de sécurité. Un des premiers modèles à avoir été déve-

© Éditions Matériologiques 2013

loppé sur cette idée-là est le modèle simple de Pipes[21]. Ce modèle supposait la règle d'interdistance minimale suivante : « Une bonne règle pour suivre un autre véhicule à une distance sûre est de laisser au moins l'équivalent d'une longueur de son propre véhicule tous les dix *miles* par heure [soit 16,1 km/h]. » Cela nous donne la relation suivante :

$$S_{i,\,sécurité}(t) = L_i.\left(1+\frac{v_i(t)}{16{,}1}\right)$$

Dans ce modèle, la distance minimale de sécurité $S_{i,sécurité}(t)$ augmente linéairement avec la vitesse du véhicule $v_i(t)$. D'autres auteurs ont proposé une approche relativement similaire.

Kometani et Sasaki ont proposé en 1959[22] un modèle de prévention de collision. Ce modèle retranscrit la trajectoire d'un véhicule en fonction d'une distance de sécurité minimale permettant d'éviter toute collision. Le développement de ce type de modèle s'appuie sur une utilisation des simples équations newtoniennes du mouvement. Il s'exprime par :

$$S_{i,sécurité}(t) = \alpha.v^2_{\,i-1}(t) + \beta.v^2_{\,i}(t+T) + \gamma v_i(t+T) + \delta$$

Les coefficients α et β représentent l'inverse de la capacité maximale de décélération respectivement du véhicule leader et du véhicule suiveur. Le coefficient γ est homogène à l'inverse d'un temps et δ est homogène à une distance. Ce sont des paramètres du modèle à calibrer. Le temps T nécessaire à la prise en compte d'une modification de vitesse du conducteur peut être interprété comme un temps de relaxation.

Les travaux de Gipps[23] ont eu pour but de compléter cette approche initiale en incorporant une vitesse maximale désirée $V_{i,\text{désirée}}$, ainsi qu'un un taux de freinage maximal b_i^{max} s'apparentant aux termes cinétiques de l'équation précédente. Ainsi, la vitesse du véhicule est définie par la valeur minimale entre $v^a_{\,i}(t+T_r)$, la vitesse qu'il peut réellement atteindre d'un point de vue dynamique, et $v^b_{\,i}(t+T_r)$ la vitesse qu'il est possible d'adopter en connaissant les contraintes de sécurité liées à la présence du véhicule leader. Ce type de

[21] Louis A. Pipes, "An operational analysis of traffic dynamics", *Journal of Applied Physics*, n° 24, mars 1953, p. 274-281 @.

[22] Eiji Kometani & Tsuna Sasaki, "A safety index for traffic with linear spacing", 7(6), 1959, p. 704-720 @.

[23] Peter G. Gipps, "A behavioural car-following model for computer simulation", *Transportation Research Board Part B*, vol. 15, avril 1981, p. 105-111 @.

modèle semble relativement facile à calibrer. Certains auteurs ont souligné que ce modèle permettait d'obtenir des résultats bien souvent conformes aux observations. Il est par ailleurs utilisé par plusieurs logiciels de simulation du marché dont Sistim, Carsim mais également par Aimsun.

L'idée que le conducteur tente de circuler à la vitesse la plus élevée possible tout en évitant la collision avec son prédécesseur a été reprise par Krauß en 1997[24]. Ses travaux proposent un modèle discret en temps dans lequel la vitesse de sécurité est telle que le véhicule (i) n'entre pas en collision lors d'un freinage avec son véhicule leader ($i-1$). Celle-ci est donnée par une relation prenant en compte des paramètres de décélération maximale, d'interdistance minimale et de vitesse désirée. De plus, le modèle prend en compte un facteur aléatoire afin de modéliser les comportements « déviants ».

4.2.2 | Modèles de stimulus-réponse

Le principe de ces modèles peut être illustré par une relation linéaire de la forme suivante :

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

Ce type de modèles suppose l'existence d'une relation linéaire entre la vitesse ou l'accélération du véhicule à l'instant t (auquel s'ajoute parfois un temps de réaction T_r non nul) et le différentiel de vitesse du véhicule et de son véhicule leader à l'instant t, selon un coefficient de sensibilité. Ainsi, un véhicule réagit en réponse à un stimulus symbolisé par une modification de sa vitesse relative.

Un des modèles pionniers est le modèle linéaire de Chandler, Herman et Montroll[25] dont voici l'expression :

$$\ddot{x}_i(t+T_r) = \mathrm{a}\,.(\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t))$$

Ce modèle présente l'expression de l'accélération du véhicule suiveur ($i+1$) en fonction de la sensibilité (homogène à l'inverse d'un temps) du conducteur au différentiel de vitesse entre les deux véhicules et d'un temps de réaction. De même, les travaux entrepris considèrent un temps de relaxation $\tau = \frac{1}{\alpha}$. Ce temps de relaxation à différencier d'un temps de réaction, traduit un temps caractéristique du système nécessaire pour retourner à l'équilibre.

---

[24] Stephan Krauß, *Microscopic modeling of traffic flow : investigation of collision free vehicle dynamics*, University of Cologne, 1997.

[25] Robert E. Chandler, Robert Herman & Elliott W. Montroll, "Traffic Dynamics : Studies in Car-Following", *Operations Research*, 6(2), 1958, p. 165-184 @.

© Éditions Matériologiques 2013

Le modèle de Gazis, Herman et Rothery[26], également connu sous la dénomination de modèle General Motors (GM), propose une expression généralisée pour le coefficient de sensibilité α. Le modèle de poursuite ainsi proposé est non linéaire :

$$\ddot{x}_i(t+T_r) = \beta \frac{\dot{x}_i^m(t+T_r)}{(x_{i-1}(t)-x_i(t))^l}(\dot{x}_{i-1}(t)-\dot{x}_i(t))$$

Ce modèle permet de prendre en compte l'interdistance entre les deux véhicules. Les coefficients β, l et m sont des paramètres du modèle. Il est possible de retrouver le modèle linéaire de Chandler et de ses collègues dans le cas où $m = l = 0$. Le coefficient de sensibilité est homogène au produit d'une longueur à la puissance $(l - m)$ par un temps à la puissance $(m - 1)$.

De nombreuses études ont été menées afin de déterminer la combinaison « optimale » du couple de paramètres $(l ; m)$. Ces études ont été très nombreuses durant les quinze années qui ont suivi la publication du modèle de Gazis, Herman et Rothery ; peu de chercheurs ont persévéré ensuite dans cette voie[27].

Citons également l'existence du modèle linéaire d'Helly[28]. Cette approche se base sur différents indices pour l'élaboration par le conducteur de la consigne d'accélération à appliquer à son propre véhicule.

$$\begin{cases} \ddot{x}_i(t+T_r) = C_1.(\dot{x}_{i-1}(t)-\dot{x}_i(t)+C_2.\left[(x_{i-1}(t)-x_i(t))-S_i(t+T_r)\right] \\ S_i(t+T_r) = \alpha+\beta.\dot{x}_i(t)+\gamma.\ddot{x}_i(t) \end{cases}$$

où $S_i(t + T_r)$ représente l'interdistance désirée. Également C_1, C_2, ainsi que α, β et δ sont des paramètres du modèle. Nous retrouvons le modèle de Chandler dans le cas où $C_2 = 0$.

Ce modèle est utilisé par les logiciels de simulation Dynasim et également par Sitra.

4.2.3 | Modèles à vitesse optimale

Un des premiers modèles s'appuyant sur une analyse des trajectoires des véhicules est le modèle de Newell[29]. Sa formulation est donnée par :

---

[26] Denos C. Gazis, Robert Herman & Richard W. Rothery, "Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow", *Operations Research*, 9(4), 1961, p. 545-567 @.

[27] Pour plus de détails, voir Mark Brackstone & Mike McDonald, "Car-following : A historical review", *Transportation Research*, F 2, 1999, p. 181-196 @.

[28] W. Helly, "Simulation of Bottlenecks in Single-lane Traffic Flow", *in* R.C. Herman (ed.), *Proc. Symp. Theory of Traffic Flow*, Elsevier, 1961, p. 207-238.

[29] G.F. Newell, "Nonlinear effects in the dynamics of car following", *Operations Research*, 9, 1961, p. 209-229 @.

$$\dot{x}_i(t + T_r) = V_0(x_{i-1}(t) - x_i(t))$$

La fonction V_0 représente la vitesse optimale, correspondant à la vitesse jugée satisfaisante par le conducteur. Le temps Δt ne correspond plus à un temps de réaction du conducteur mais au temps nécessaire au changement de vitesse du véhicule.

Au milieu des années 1990, Bando a introduit la notion de vitesse désirée, choisie comme étant une fonction de l'interdistance[30]. Cela a ouvert la voie au développement de modèles exploitant cette idée et baptisés *Optimal Velocity Models* (OVM). L'accélération du véhicule est donnée par la relation suivante :

$$\ddot{x}_i(t + T_r) = \alpha.\left[V_0(x_{i-1}(t) - x_i(t) - \dot{x}_i\right]$$

$$Avec\ V_0(x_{i-1}(t) - x_i(t)) = \frac{v_{\max}}{2}.\left[\tanh(x_{i-1}(t) - x_i(t) - S_c) + \tanh(S_{c)}\right]$$

La fonction V_0 est la fonction dite de vitesse optimale. Le coefficient S_c est un paramètre de la vitesse optimale à calibrer. Il correspond à une interdistance caractéristique du comportement de poursuite.

4.2.4 | Autres modèles

Les modèles d'automates cellulaires représentent l'écoulement du flot sous la forme d'une dynamique simple : l'évolution de cellules échangeant entre elles de l'information sous forme de véhicules. Un modèle d'automates cellulaires nécessite que les axes de l'espace et du temps soient discrétisés. Le modèle d'automate cellulaire appliqué au cas du trafic routier le plus connu est celui de Nagel et Schreckenberg[31]. Dans ce modèle, la vitesse des véhicules est considérée comme étant un nombre entier compris entre 0 et v_{max}. La voie de circulation est représentée à chaque instant par un certain nombre de sections ; une section est soit libre, soit occupée par un et un seul véhicule. L'état des cellules est actualisé chaque pas de temps, en suivant des règles faisant intervenir les caractéristiques des plus proches voisines. Une étape d'aléa est incorporée au processus. Celle-ci permet de prendre en compte les différents comportements des conducteurs et permet aussi l'apparition spontanée de la congestion, classiquement observée *in situ*.

Il existe un ensemble d'autres modèles microscopiques. Certains textes comme ceux de Brakstone et McDonald, d'Helbing ou encore d'Hoogendoorn

[30] M. Bando *et al.*, "Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation", *Phys. Rev. E*, 51n 1995, p. 10-35 @.

[31] Kai Nagel & Schreckenberg, "A cellular automaton model for freeway traffic", *J. Phys. I France*, 2, 1992, p. 2221-2229 @.

© Éditions Matériologiques 2013

et Bovy[32], présentent plus précisément ces modèles originaux. Soulignons toutefois l'existence de modèles dits psychophysiques qui se basent sur les aspects psychophysiques du comportement de conduite. Les principaux modèles de ce type sont le modèle présenté par Leutzbach et Wiedemann[33], ainsi que le modèle de Wiedemann[34]. Ce dernier modèle représente un processus de psycho-écart entre un véhicule et son véhicule leader, en fonction de sa vitesse relative. Le modèle de Wiedemann est à l'origine de nombreux logiciels de simulation microscopique comme Vissim. Il est aujourd'hui également très utilisé dans le développement de la modélisation des flux piétons.

4.2.5 | Limites des modèles microscopiques

Classiquement, les critiques concernant les modèles de poursuite portent essentiellement sur les hypothèses simplificatrices des modèles. Ainsi il est possible de souligner que la plupart des modèles microscopiques considèrent les conducteurs comme étant uniformes. Notamment, une des hypothèses simplificatrices de ces modèles est de considérer que le temps de réaction est égal entre chaque conducteur. Il n'y a donc pas de prise en compte de la variabilité des conducteurs et donc des différences de comportements entre chacun d'eux ; que certains des modèles supposent une optimisation continue de la vitesse. Pourtant, des éléments psychologiques tendent à prouver qu'un conducteur ne va pas forcément augmenter sa vitesse même dans le cas où son prédécesseur augmente la sienne, notamment s'il souhaite accorder moins d'attention à sa tâche de conduite ; qu'*a contrario*, le modèle Gazis, Herman et Rothery suppose que pour un différentiel de vitesse nul, l'accélération sera elle aussi nulle pour toute valeur d'interdistance ; intuitivement, si un véhicule se retrouve relativement éloigné de son véhicule leader, même si au temps *t* les deux véhicules se trouvent à la même vitesse, le véhicule suiveur peut tout à fait accélérer sa progression ; que les modèles de poursuite semblent n'être utilisables que dans

[32] Brakstone & McDonald, *op. cit.*, 1999. Helbing, *op. cit.*, 2001. Hoogendoorn & Bovy, *op. cit.,* 2001.

[33] Wilhelm Leutzbach & Rainer Wiedemann, Development and applications of traffic simulation models at the Karlsruhe Institut für Verkehrwesen, *Traffic Engineering and Control*, 1986, p. 270-278.

[34] Rainer Wiedemann, *Simulation des Verkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen*, Helft, Universität Karlsruhe, 1974 ; Rainer Wiedemann & U. Reiter, Microscopic traffic simulation : the simulation system MISSION, background and actual state. Project ICARUS (V1052), Final Report, Brussels, CEC, 2 : Appendix A, 1992.

des conditions de trafic dense. En effet, si la distance intervéhiculaire est suffisamment grande, alors il n'y a plus d'interactions entre véhicules et chacun roule à sa vitesse libre.

4.3 | Synthèse

Tout d'abord, rappelons que chaque modèle a ses propres limites de représentation. En effet, nous avons pu voir rapidement que chaque type de modèle a un domaine d'utilisation bien particulier et il est très difficile de pouvoir appliquer un modèle à un domaine différent. Souvent les résultats en sont décevants car le modèle est inadapté. Pour illustrer ces propos, imaginons qu'une personne souhaite décrire finement l'écoulement du trafic en un point particulier du réseau. Son étude porte sur une section de l'ordre de quelques dizaines de mètres et dure pendant quelques minutes. Il semble tout à fait inadapté d'utiliser ici un modèle macroscopique pour plusieurs raisons : tout d'abord, il sera très difficile de pouvoir juger de la pertinence d'indicateurs macroscopiques comme la concentration (respectivement le débit) étant donné la longueur de la section concernée (respectivement la période d'agrégation). D'autre part, la variabilité des comportements individuels ne pourra pas être correctement retranscrite du fait du faible nombre de véhicules qui seront considérés. Avant de pouvoir réaliser une quelconque étude portant sur le trafic routier, il est nécessaire de préciser les échelles spatiale et temporelle de cette étude. Cela traduit en outre la volonté de l'expérimentateur d'observer plus ou moins finement le réseau. Ce choix se fait parfois en fonction des moyens (données de mesure préexistantes, moyens matériels de mesure, etc.) dont dispose l'observateur mais principalement les échelles s'adaptent selon les objectifs qui sont poursuivis.

5 | Logiciels de simulation

Nous souhaitons présenter quelques-uns des outils de simulation qui sont le plus couramment utilisés par les utilisateurs de la simulation routière en France. Nous nous préoccuperons également de relever le type de modèles utilisés afin de représenter l'écoulement dynamique du trafic. La présentation de ces outils est scindée selon que les logiciels sont purement commerciaux ou qu'ils sont issus du milieu de la recherche[35].

[35] Pour le lecteur intéressé, le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (Certu) propose un site internet dédié à la simulation dynamique et qui présente une série de logiciels de simulation @.

© Éditions Matériologiques 2013

Microscopique	Mésoscopique	Macroscopique
• Aimsun • Corsim • Dracula • Dynasim • MatSim • Quadstone Paramics • SimTraffic • TransModeler • Vissim	• Cube • Dynasmart • Transims • TransModeler	• Dynev • Emme/2 • OmniTrans • Orems • TransCad • TransModeler • Visum

5.1 | Logiciels commerciaux

Le logiciel Aimsun a été développé peu avant le début des années 2000. Il est désormais commercialisé par la société Transport simulation systems (TSS), abritée par l'université de Catalogne. Malgré cette appartenance, le produit Aimsun ne s'inscrit pas dans un cadre académique mais bel et bien commercial. Ce logiciel de simulation est en fait une partie de l'environnement de simulation du trafic, dénommé Getram (*Generic Environment for Traffic Analysis and Modeling*). Getram contient en plus d'Aimsun un éditeur de réseau, une base de données concernant le réseau d'infrastructures, un module de stockage et une interface de programmation applicative.

Aimsun est capable de modéliser la circulation sur tout type de réseau de trafic. Il est possible de manipuler et de modifier sous Aimsun la valeur des flux, les proportions des mouvements tournants ou encore le poids des matrices origine-destination. Ce sont autant de données d'entrée pour la simulation. L'utilisateur d'Aimsun a également la possibilité d'utiliser différents modèles de choix d'itinéraire. Le logiciel permet de tester différents scénarios de trafic et il a l'avantage de prendre en compte les transports publics. De plus, les accidents et les voies réservées (par exemple les sites propres pour les transports en commun ou les voies réservées pour le covoiturage) peuvent aussi être modélisés.

Le modèle de poursuite implémenté dans Aimsun est basé sur le modèle de Gipps. Plus exactement, le modèle est un développement du modèle original, classiquement fondé autour d'une composante d'accélération (modélisant la volonté d'atteindre une vitesse désirée) et une composante de décélération (traduisant la contrainte liée à la présence d'un véhicule leader). La spécificité du modèle implémenté dans Aimsun est dans l'estimation de la décélération du véhicule leader.

Développé, utilisé et commercialisé par la société Dynalogic, le logiciel de simulation microscopique et stochastique Dynasim a pour objectif de modéliser

aussi finement que possible l'écoulement du trafic sur un réseau. Pour cela, une des idées de base du modèle est l'existence d'une zone d'influence entourant un véhicule, dans laquelle aucun autre véhicule ne pénètre. Le modèle de poursuite sous-jacent à Dynasim détermine l'accélération d'un véhicule selon la vitesse de ce véhicule et l'interdistance le séparant du véhicule le précédant. Le modèle utilise l'équation de l'accélération suivante :

$$\ddot{x}_i(t+0{,}25) = C_1.(\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}\mathrm{i}(t)) + C_2.(x_{i-1}(t) - x_i(t) - \beta.\dot{x}_i(t) - L)$$

Avec L la longueur des véhicules, supposée fixe. Nous retrouvons trois paramètres C_1, C_2 et β décrivant trois types d'accélération pour le véhicule i.

Ce modèle est issu du modèle linéaire de Helly[36] qui, pour rappel, est donné par :

$$\begin{cases} \ddot{x}_i(t+T_r) = C_1.(\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)) + C_2.\left[(x_{i-1}(t) - x_i(t)) - S_i(t+T_r)\right] \\ S_i(t+T_r) = \alpha + \beta.\dot{x}_i(t) + \gamma.\ddot{x}_i(t) \end{cases}$$

où nous prenons $T_r = 0{,}25$, $\alpha = L$ et $\gamma = 0$.

Sitra est un programme de simulation microscopique initialement développé à l'Onera (Office national d'études et de recherches aéronautiques) puis commercialisé par la société française Sodit, aujourd'hui disparue. Ce modèle était essentiellement destiné à la simulation en zone urbaine, et notamment à l'étude des intersections et des carrefours. Le modèle de poursuite utilisé par Sitra est également le modèle linéaire de Helly.

Vissim est développé par la société allemande Planung Transport Verkehr (PTV). Il est le descendant des programmes réalisés dans les années 1970 à l'université de Karlsruhe, dont par exemple celui de Wiedemann[37]. Vissim est un logiciel de simulation pour milieu urbain et interurbain. Il propose une simulation microscopique du couple véhicule-conducteur basée sur une analyse psychophysique du comportement de conduite. Ce type d'idée a été présenté brièvement avec le modèle de Wiedemann. Cette simulation est à la fois discrète et stochastique et s'effectue avec un pas de temps pris égal à une seconde.

Visum est également un logiciel développé et commercialisé par la société PTV. Cependant, Visum est un logiciel de simulation macroscopique qui se propose de déterminer les temps de parcours sur un réseau d'infrastructures. Ce calcul est réalisé de façon statique à partir des résultats d'affectation de la demande sur les branches du réseau.

[36] Helly, *op. cit.*, 1961.
[37] Widemann, *op. cit.*, 1974.

© Éditions Matériologiques 2013

Paramics est une série d'outils pour la simulation microscopique du trafic, dont Paramics Modeller constitue le noyau central. Paramics est susceptible de traiter des réseaux dont la taille n'est *a priori* pas limitée. Le logiciel Paramics existe conjointement sous deux versions parallèles : une version est développée par la société Quadstone tandis que la seconde est détenue par la société Sias. Initialement développé au Centre de calcul parallèle de l'université d'Édimbourg avant d'être repris indépendamment, et concurremment, par les sociétés Sias (version souvent dite S-Paramics) et Quadstone (version quelquefois dite Q-Paramics). Les deux logiciels Paramics permettent une microsimulation du système trafic mais sont tout aussi capables de proposer une modélisation des grands réseaux. Le modèle microscopique de poursuite de Paramics fait intervenir les notions d'interdistance désirée et d'interdistance cible. Afin de parvenir à atteindre ces valeurs à chaque instant, le conducteur va alors accélérer ou décélérer. Ce modèle mêle à la fois l'idée des modèles à distance de sécurité type Krauβ ainsi que celle des modèles psychophysiques type Wiedemann.

Enfin, citons le cas du logiciel Transmodeler développé dès 2005 par la société Caliper. Celui-ci propose des modules de simulation microscopique et macroscopique ainsi qu'une possibilité d'hybridation. Cette dernière possibilité se traduit par la capacité de simuler de larges réseaux et, plus finement, un carrefour particulier, avec un seul modèle.

5.2 | Logiciels de recherche

Le logiciel Symuvia est développé au Laboratoire d'ingénierie, circulation et transports (Licit). Il est basé sur un modèle macroscopique d'écoulement, utilisant un diagramme fondamental triangulaire. Deux phases sont donc mises en avant avec une phase fluide où la position du véhicule i au temps $t + dt$ est égale à la somme de la position initiale au temps t et de la distance parcourue à la vitesse fluide pendant dt. En phase congestionnée, la position du véhicule i est déduite de la position de véhicule leader $(i - 1)$ à laquelle nous retranchons l'interdistance minimale, égale à l'inverse de la densité maximale de véhicules. Le pas de temps est pris de telle sorte que l'information de remontée de file d'un véhicule à l'autre soit correctement prise en compte. Ainsi, $dt = -\frac{S_{\min}}{w}$ où $w < 0$ est la vitesse de remontée de file. Le modèle incorpore également un modèle de changements de files, des caractéristiques d'accélération bornée pour les véhicules ainsi que le comportement au niveau des convergents et des giratoires.

Mitsim est le simulateur microscopique incorporé dans le logiciel de simulation MitsimLab, développé par le Massachussetts Institute of Technologies (MIT). MitsimLab inclut également un simulateur de gestion de la circulation utilisé pour la simulation du contrôle du trafic et des systèmes de guidage routier. Les données d'entrée pour Mitsim sont classiquement des matrices origine-destination ; un modèle de choix probabiliste du trajet est ensuite utilisé pour déterminer le cheminement de chaque véhicule individuel à chaque intersection du réseau. Un modèle de choix d'itinéraire alternatif est également disponible dans lequel les véhicules sont affectés selon des chemins spécifiés dès le début de la simulation. Ces deux modèles portant sur le choix de l'itinéraire peuvent être utilisés séparément ou simultanément lors d'une simulation. Mitsim est conçu pour être utilisé dans l'évaluation des systèmes de gestion du trafic.

Le modèle dynamique de microsimulation Dracula (*Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulAtion*, affectation dynamique des trajets combinant l'apprentissage des utilisateurs et la microsimulation) a été développé à l'université de Leeds depuis 1993. C'est une nouvelle approche de modélisation de réseaux du trafic routier, dans lequel l'accent est mis sur un couplage entre un modèle d'historique de trafic et un modèle de poursuite microscopique, permettant la représentation des trajectoires individuelles des véhicules. Dracula permet de représenter directement les choix de trajet des conducteurs à mesure que ces décisions évoluent en fonction du temps. Cette démarche prend en compte la trajectoire spatio-temporelle du véhicule leader, mais aussi la configuration du réseau et les règles de franchissement aux intersections. Le modèle propose donc une simulation dynamique de l'offre et de la demande.

Fastlane est un outil logiciel développé par l'université de Delft (Pays-Bas). Il peut être utilisé pour la prévision à court terme de l'écoulement du trafic sur les autoroutes. Fastlane peut être utilisé par exemple par les centres de contrôle pour tester plusieurs scénarios après qu'un incident s'est produit. Les processus opérationnels dans Fastlane peuvent être divisés en deux parties. Tout d'abord, une estimation de l'état du trafic est réalisée. Ensuite, le programme calcule et visualise le nouvel état de trafic après la mise en œuvre d'un certain scénario correspondant à l'état de trafic précédent. Dans ce logiciel, l'accent est tout particulièrement mis sur la deuxième étape du programme, à savoir la modélisation et la prédiction de l'écoulement du trafic. Le principal défi est de pouvoir mener les calculs à la fois rapidement mais tout en visant un résultat précis.

© Éditions Matériologiques 2013

Soulignons enfin l'existence des logiciels macroscopiques Metacor (Inrets) et Ladta (LVMT). Issu de Metanet, le programme Metacor a été doté d'une interface graphique par la société Phoenix-ISI dans sa version Px-Metacor. Il s'agit d'un modèle macroscopique du second ordre destiné à l'étude de grands réseaux tels que les autoroutes ou encore les voies rapides urbaines (VRU). Notons enfin que Metacor propose une affectation dynamique.

6 | Conclusion

Comme l'indique Joël de Rosnay[38], un modèle cherche à réunir les principaux éléments d'un système complexe pour permettre des hypothèses sur son comportement d'ensemble, tout en tenant compte de l'interdépendance des facteurs. Les modèles analogiques sont souvent utilisés en présence d'un petit nombre de variables. Pour un nombre plus important de variables (système trop complexe pour que seule la capacité de nos cerveaux puisse en appréhender tous les facteurs et toutes les coévolutions de ces facteurs dans le temps), il faut alors utiliser des moyens mécaniques ou électroniques comme les simulateurs ou les ordinateurs. Cette étape nécessite alors la construction de modèles mathématiques en vue de la simulation. La démarche s'appuie sur trois étapes : (1) l'analyse de système, à savoir la définition du système par ses limites, la définition des variables importantes et leurs interactions et la description des variations ; (2) modéliser le système à partir d'un schéma des relations causales entre chacune des variables puis mettre en équation et/ou exprimer le système sous la forme d'un langage de programmation ; (3) la simulation. La simulation est aujourd'hui largement répandue et utilisée grâce notamment à des langages de programmation performants (plus puissants et plus simples) et grâce aux technologies de communication et informatiques (puissance de calcul permettant du calcul « temps réel », sorties graphiques, etc.). Néanmoins, il ne faut pas trop attendre de la simulation car ce n'est qu'un moyen parmi d'autres de compléter l'étude d'un système complexe. La simulation ne peut prétendre permettre de donner un optimum ou une solution exacte à un problème donné. Elle permet toutefois de donner des tendances sur les évolutions d'un système et de faire éclore de nouvelles hypothèses. La simulation reste globalement moins coûteuse que les expérimentations *in situ* et permet d'étudier une grande diversité de scénarios. Les résultats de simulation ne sont pas à confondre avec la réalité.

[38] Joël de Rosnay, *Le Macroscope : vers une vision globale*, Seuil, 1975.

En résumé, ce chapitre se proposait de mettre en avant que les modèles et simulations se distinguent par leurs champs d'application (simulations pour les tests de scénarios, modélisation pour l'analyse et l'explication), mais aussi par la multiplicité d'applications et des données disponibles. Malgré tout, ils restent complémentaires et même nécessaires l'un à l'autre. Il s'agit d'un champ en constant renouvellement, s'accommodant des nouvelles technologies, à l'image des données de téléphones mobiles intelligents que l'on cherche à exploiter dorénavant. Historiquement, modélisation et simulation ont conjointement permis l'éclosion de concepts théoriques comme l'équilibre entre offre et demande des systèmes, l'affectation statique, les lois de poursuite, les lois d'offre et demande locales de trafic ou encore la notion d'utilité de l'usager.

Notons toutefois quelques limites à la parfaite harmonie entre modélisation et simulation. Premier élément, la plupart des logiciels commerciaux fonctionnent sur le principe de « boîtes noires ». L'utilisateur n'a pas la possibilité d'intervenir sur le cœur du logiciel et de savoir exactement comment les paramètres qu'il manipule ont été calibrés et validés. Cela rend difficile l'utilisation critique de l'outil puisque nous ne savons pas si les hypothèses simplificatrices du ou des modèles sous-jacents sont respectées. Également, il subsiste certains doutes concernant la capacité du logiciel à représenter les stratégies de gestion dynamiques, notamment du fait de l'incertitude sur la prise en compte des changements de voies. En effet, il est très difficile de calculer une longueur de voie d'insertion de par les lois d'insertion et les lois de changements de voie qui sont utilisées. Le pas de temps choisi a également une grande influence sur le nombre de changements de voies effectués. Un petit pas de temps provoquera une augmentation de la possibilité de changements de voies tandis qu'un pas de temps important limitera ce nombre de possibilités.

Soulignons enfin une perspective de recherche. Une étude de trafic doit nécessairement débuter par un choix d'échelle. En effet, la précision choisie pour l'étude conditionne la finesse des données à obtenir, les temps de calculs nécessaires mais aussi la précision finale des résultats. Devant la multiplicité des modèles, l'utilisateur doit réaliser un choix en connaissant les spécificités de chacun de ses modèles, leurs domaines de validité et les cas précis d'application. Le problème de l'échelle est une difficulté récurrente dans le domaine des transports. Il apparaît que lors des études de trafic, les échelles microscopiques et macroscopiques sont clairement dissociées. Cela est principalement dû au fait que les modèles spatio-temporels utilisés aux niveaux microscopique et macroscopique sont distincts les uns des autres et *a priori* indépendants entre

© Éditions Matériologiques 2013

eux. Des tentatives d'hybridation ou de couplage des modèles micro et macro ont été réalisées mais leurs portées semblent assez limitées. Or, l'enjeu serait de pouvoir justifier la cohérence de chaque outil de simulation, voire de regrouper sous le même outil simulations microscopique et macroscopique.