

MODÉLISATION DYNAMIQUE DES GRANDS RÉSEAUX DE TRANSPORTS

Thèse de doctorat de :
Guilhem Mariotte

Résumé étendu

(Manuscrit complet en anglais disponible en ligne sur theses.fr ou guilhemmariotte.com)

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE)

Et de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)

Préparée au Laboratoire Ingénierie Circulation Transports (LICIT), unité mixte de recherche ENTPE-IFSTTAR

Auteur : Guilhem MARIOTTE

Date de soutenance : 14/11/2018

Titre : Modélisation dynamique des grands réseaux de transports

Numéro d'ordre NNT : 2018LYSET010

École doctorale : ED 162 MEGA (Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique)

Spécialité : Génie civil

Directeur de thèse : Ludovic LECLERCQ

Présidente du jury : Christine SOLNON (INSA, Université de Lyon)

Composition du jury :

Nikolas GEROLIMINIS (EPFL, Lausanne), Rapporteur

Monica MENENDEZ (NYU, Abu Dhabi), Rapporteur

Arnaud DE LA FORTELLE (Mines Paris Tech), Examineur

Serge HOOGENDOORN (TU Delft), Examineur

Christine SOLNON (INSA, Université de Lyon), Présidente du jury

Ludovic LECLERCQ (ENTPE, IFSTTAR, Université de Lyon), Directeur de thèse

Mots-Clés : *Modélisation du trafic routier, grands réseaux urbains, diagramme fondamental de zone (MFD), dynamique de la congestion, modèles multi-réservoirs, échanges de flux entre zones urbaines*

Financement :

Ce projet est soutenu par le Conseil Européen de la Recherche (ERC) dans le cadre du programme européen pour la recherche et l'innovation Horizon 2020 (numéro d'agrément 646592, [projet MAGnUM](#))

RÉSUMÉ

La congestion en milieu urbain est un enjeu majeur que ce soit d'un point de vue économique, social ou environnemental. À court et moyen terme, l'utilisation de la simulation dynamique du trafic routier peut permettre d'analyser et de guider des politiques d'optimisation des infrastructures existantes. Aujourd'hui, du fait de la complexité des systèmes de transport, les outils de modélisation classiques sont limités à des échelles géographiques peu étendues (de l'ordre du quartier). À grande échelle, le temps de calcul devient rapidement un facteur limitant tout comme le calibrage et la scénarisation. Néanmoins les dernières décennies ont vu l'apparition d'une nouvelle génération de modèles bien adaptés aux métropoles urbaines. Ceux-ci sont basés sur une relation phénoménologique entre la production de déplacements et le nombre de véhicules dans une zone spatiale d'un réseau routier, appelée Diagramme Fondamental de Zone (*Macroscopic Fundamental Diagram*, MFD). Cette relation, validée empiriquement sur de nombreuses villes, a permis d'étudier différentes méthodes de contrôle du trafic pour une ville entière, mais a été peu utilisée à des fins de prévision de la congestion.

L'objectif de cette thèse est de proposer un premier outil opérationnel de simulation et d'analyse des grands réseaux de métropoles, en utilisant et développant les modèles de trafic basés sur la relation MFD. Cet outil doit posséder un cadre théorique cohérent qui puisse convenir à des applications telles que la

prévision d'états de trafic, le développement de nouvelles politiques de contrôle, l'estimation de pollutions liées au trafic, etc. Les contributions de la thèse portent sur deux aspects. Le premier est l'analyse des propriétés mathématiques et physiques des modèles existants, en incluant une formalisation complète de la gestion de plusieurs longueurs de parcours au sein d'une même zone urbaine. En particulier, cette formalisation traite de la distinction des trajets internes à la zone et des problèmes de flux convergents et divergents pour les trajets traversant la zone lorsque la congestion se propage d'une zone à l'autre. Le deuxième aspect est la proposition d'un nouveau modèle basé sur la distance individuelle parcourue à l'intérieur d'une zone urbaine (trip-based). Cette approche permet d'individualiser les usagers (auparavant représentés sous forme de flux continus) et donc de définir plus finement leurs caractéristiques, en vue de coupler leurs déplacements à des modèles d'affectations sur différentes routes. Enfin, des exemples d'application illustrant diverses collaborations sont donnés en dernière partie de la thèse. La simulation du trafic sur l'aire urbaine du Grand Lyon (France) y est présentée, ainsi que de nouveaux modules de modélisation de la recherche de parking ou de contrôle périphérique. Cette thèse est partie intégrante d'un projet européen ERC intitulé MAGNUM : Approche multi-échelle et multimodale de la modélisation du trafic pour une gestion durable de la mobilité urbaine.

SOMMAIRE

1	Introduction générale	9
I	Étude de la dynamique interne d'un seul réservoir	11
2	Comparaisons numériques et analytiques entre les modèles existants d'un seul réservoir	13
3	Étude de l'impact de l'hétérogénéité des flux au périmètre d'un réseau sur la simulation d'un réservoir	14
II	Étude des échanges de flux dans les systèmes multi-réservoirs	17
4	Étude des échanges de flux dans le cas de plusieurs réservoirs traversés par de multiples routes	19
5	Comparaison entre modèles d'échange de flux et validation grâce à la simulation microscopique	21
III	Développements et applications	23
6	Mise en place de la simulation multi-réservoirs et première application sur un réseau réel	25

Chapitre 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

LES modèles de trafic à l'échelle locale (liens d'un réseau) ont permis la mise au point de systèmes de contrôle locaux efficaces pour réduire la congestion. Cependant, ces algorithmes de contrôle ne s'appliquent que localement (à l'échelle d'une artère et de quelques intersections voisines) et ne tiennent pas compte des files d'attente de véhicules qui seraient induites en dehors de la zone contrôlée. Plus généralement, il est devenu évident que les grands réseaux de transport sont des systèmes extrêmement complexes : ils impliquent des interactions entre de multiples flux résultant du comportement des différents usagers. Cela ne peut être étudié que dans une perspective globale à l'échelle de la ville. Le problème est que les simulateurs classiques de trafic sur de très grands réseaux nécessitent souvent un temps de calcul élevé, ce qui nous empêche d'utiliser des simulations en temps réel pour les prévisions d'états de trafic ou des schémas de contrôle avancé (du type *Model Predictive Control*, MPC). De plus, la scénarisation de la demande est un élément clé de la mise en œuvre de ces modèles. Elle nécessite une connaissance approfondie de la motivation des voyageurs à choisir entre un grand nombre d'itinéraires. Accéder aux choix individuels des utilisateurs est une gageure à très grande échelle. Bien que la simulation des flux de trafic dans les grandes villes puisse toujours être réalisée grâce à l'étalonnage minutieux de modèles d'affectation (*Dynamic Traffic Assignment*, DTA) – voir en particulier les exemples de Chicago (Jayakrishnan *et al.*, 1994, Mahmassani *et al.*, 2013), Melbourne (Shafiei *et al.*, 2018) ou Pékin (Ben-Akiva *et al.*, 2002, 2012) – il devient nécessaire de disposer

conçus pour la simulation grande échelle.

La modélisation des états de trafic à un niveau agrégé n'est pas une question nouvelle, diverses approches ont été proposées depuis les années 1960. Smeed (1967) a étudié la capacité de zones urbaines entières telles que les centres-villes. Ensuite, Godfrey (1969) a supposé qu'il devait exister un optimum de densité de véhicules maximisant le débit dans une zone urbaine donnée, de même qu'il existe un débit maximal dans le diagramme fondamental d'un seul lien. Herman & Prigogine (1979) sont allés plus loin en supposant une relation entre la vitesse moyenne et la densité moyenne dans les villes. Toutes ces hypothèses ont été vérifiées d'abord par des études de simulation microscopiques (Mahmassani *et al.*, 1984, 1987), et très récemment avec des données réelles de la ville de Yokohama au Japon (Geroliminis & Daganzo, 2008). Depuis lors, cette relation entre la densité moyenne du réseau et le flux a été appelée diagramme fondamental de zone (*Macroscopic Fundamental Diagram*, MFD), par analogie avec le concept de diagramme fondamental. Après Yokohama, des MFD empiriques ont été estimés pour différentes villes : Toulouse en France (Buisson & Ladier, 2009), Nairobi au Kenya (Gonzales *et al.*, 2009), Changsha en Chine (Shoufeng *et al.*, 2013), Shenzhen en Chine (Ji *et al.*, 2014), Brisbane en Australie (Tsubota *et al.*, 2014) et Zurich en Suisse (Ambuhl *et al.*, 2017, Loder *et al.*, 2017). D'autres études par simulation ont également estimé les MFD d'Amsterdam aux Pays-Bas (Ji *et al.*, 2010), de Chicago et de Salt Lake City aux États-Unis (Saberi *et al.*, 2014). Les preuves empiriques du MFD, encore récemment confirmées par les données de nombreuses villes (Loder *et al.*, 2018), ont ouvert

un nouveau champ de recherche en modélisation du trafic, à présent dénommé par « les modèles MFD ».

Ces modèles décrivent les états de trafic dans une région urbaine donnée avec une simple équation de conservation du flux, proposée pour la première fois par Daganzo (2007). Ils ont par la suite été étendus à deux régions (Geroliminis & Daganzo, 2007, Hadad & Geroliminis, 2012), puis à plusieurs régions (Geroliminis, 2009, Aboudolas & Geroliminis, 2013, Geroliminis, 2015). La formulation simplifiée de la dynamique du trafic dans une région, ainsi que le nombre limité de paramètres à étalonner, ont permis la mise au point de systèmes de contrôle efficaces. L'idée principale est de protéger une zone donnée en limitant les flux entrants à sa périphérie et en conservant ainsi un flux maximal à l'intérieur de la zone (en pratique, la limitation des flux entrants peut s'effectuer via des feux de signalisation ou une tarification routière). Cette méthode, appelée contrôle périmétrique ou *gating*, a été implémentée avec succès dans les modèles MFD (Keyvan-Ekbatani *et al.*, 2012, Geroliminis & Boyaci, 2012), et a donné des résultats prometteurs pour réduire la congestion dans les centres-villes. Cela n'a été réalisé que dans des études en simulation, mais la ville de Zurich en Suisse a déjà conçu un système de *gating* efficace, avant même que l'existence du MFD ne soit prouvée (Ambuhl *et al.*, 2018). Des travaux plus récents ont montré que le

contrôle d'itinéraire à grande échelle à l'aide du MFD est également une option viable pour améliorer les conditions de circulation dans les villes (Yildirimoglu *et al.*, 2015, Sirmatel & Geroliminis, 2017). Le nombre croissant d'études depuis les premiers travaux de Daganzo (2007) montre clairement que les modèles MFD sont de plus en plus populaires dans la communauté de la théorie du trafic.

Dans cette thèse de doctorat, il a été choisi de se concentrer sur les modèles MFD pour étudier leurs propriétés en profondeur. Les raisons principales de ce choix sont leurs fondements empiriques et leur niveau avancé de développement et de mise en œuvre avec des stratégies de contrôle attrayantes à grande échelle. Néanmoins, il reste encore beaucoup de recherche à faire dans le domaine de la simulation MFD. Ces modèles ont été principalement utilisés pour des applications de contrôle, ce qui n'exige pas nécessairement une modélisation précise sur un horizon à long terme, car la rétroaction du contrôle maintient le système dans son fonctionnement optimal. L'application des modèles MFD à la simulation du trafic urbain sur le moyen et long terme (une journée ou plus) est une direction de recherche qui n'a guère retenu l'attention pour le moment. Cette thèse est donc consacrée à la compréhension des approches actuelles et à contribuer à la proposition de nouvelles approches, ainsi qu'à leur validation.

Première partie

Étude de la dynamique interne d'un seul réservoir

CETTE première partie porte sur la description et la compréhension de la dynamique du trafic interne d'un seul réservoir. Parce que ce modèle constitue la pierre angulaire de tout système multi-réservoir, l'analyse de sa dynamique servira de base au développement d'approches de modélisation plus complexes dans la seconde partie.

Dans cette partie, les recherches sur la dynamique interne sont divisées en deux études différentes. Le Chapitre 2 introduit deux approches de modélisation existantes basées sur le MFD, à savoir le modèle basé sur l'accumulation (*accumulation-based model*) et le modèle basé sur la distance (*trip-based model*). Des comparaisons théoriques et numériques permettent d'aborder la question de la description de la dimension d'espace dans la modélisation MFD. Le domaine de validité du modèle basé sur l'accumulation, le plus largement utilisé, est également discuté grâce à ces comparaisons. Ensuite, le chapitre 3 propose de discuter l'estimation des éléments clés de la modélisation basée sur l'accumulation d'un réservoir, à savoir le MFD lui-même et la distance de parcours moyenne. Grâce à une comparaison avec la simulation à l'échelle des liens, ce chapitre cherche à déterminer dans quelle mesure le MFD et la distance de parcours moyenne peuvent être considérés comme des propriétés intrinsèques du réseau.

Chapitre 2

COMPARAISONS NUMÉRIQUES ET ANALYTIQUES ENTRE LES MODÈLES EXISTANTS D'UN SEUL RÉSERVOIR

LA modélisation des grands réseaux à l'aide du MFD repose largement sur le modèle du réservoir unique, dans lequel la variation de l'accumulation de véhicules en circulation dans le réservoir est égale à la différence entre flux d'entrée et flux de sortie. Cependant, des délais incohérents dans la propagation des informations entre entrée et sortie peuvent être observés avec le modèle basé sur l'accumulation. Par exemple, le flux de sortie réagit instantanément lorsque la demande en entrée varie rapidement, alors que cette information ne devrait jamais être transmise à une vitesse supérieure à la vitesse fluide. Pour surmonter cette limitation, le modèle basé sur la distance a été récemment proposé, cependant sa solution ne peut pas être obtenue de manière analytique.

Dans ce chapitre, nous comparons les deux modèles avec un MFD linéaire par morceaux et une demande constante par morceaux. Ces hypothèses permettent d'établir la solution exacte du modèle basé sur l'accumulation et des approximations continues du modèle basé sur la distance en utilisant les séries de Taylor. De plus, un cadre de simulation flexible fondé sur une approche événementielle est mis en œuvre pour résoudre ce dernier modèle, ce qui en fait un outil prometteur pour prendre en compte l'hétérogénéité potentielle dans les distances parcourues. Grâce à ces schémas de résolution, nous sommes en mesure de mesurer l'erreur de l'approche basée sur

l'accumulation lorsque la demande varie rapidement, et de proposer un domaine de validité pour ce modèle. D'autres applications avec des longueurs de parcours différentes et des limitations de flux en sortie sont également abordées.

*
* *

Pour résumer ce chapitre, nous avons étudié la dynamique interne du trafic dans le modèle le plus simple d'un réservoir unique (avec une seule catégorie de déplacement). En ce qui concerne leur base théorique, des comparaisons approfondies ont été effectuées entre les deux modèles existants, basés sur l'accumulation et sur la distance. Alors que les deux modèles reposent sur l'hypothèse d'homogénéité définie par le MFD, ils diffèrent fondamentalement sur la description du flux de sortie du réservoir. Dans le modèle basé sur l'accumulation, la description du flux sortant repose directement sur le MFD, alors que dans le modèle basé sur la distance, le flux sortant est défini implicitement par l'évolution de la vitesse moyenne et du temps de parcours (ce dernier étant notamment défini par la longueur de parcours moyenne). Parce qu'il prend en compte le retard subi lors du trajet de l'entrée du réservoir à la sortie, le modèle basé sur la distance apparaît comme un cadre prometteur pour la simulation MFD dans des contextes très dynamiques (par exemple en heure de pointe).

Chapitre 3

ÉTUDE DE L'IMPACT DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DES FLUX AU PÉRIMÈTRE D'UN RÉSEAU SUR LA SIMULATION D'UN RÉSERVOIR

LE concept du MFD semble être une option attrayante pour la simulation à grande échelle de réseaux urbains. Cependant, de nombreux auteurs ont souligné que la définition du MFD d'une région donnée pouvait être affectée par des hétérogénéités de réseau ou de trafic. Jusqu'à présent, la plupart des études ont porté sur les hétérogénéités internes et leurs effets sur la forme du MFD, mais peu d'attention a été accordée à leurs impacts sur la précision des résultats de la simulation MFD. Les hétérogénéités affectent non seulement la forme du MFD mais également la distance parcourue dans une zone. De plus, des hétérogénéités peuvent être observées non seulement à l'intérieur de la zone mais aussi à sa frontière.

Ce chapitre examine l'influence des hétérogénéités du réseau et du trafic sur la précision du modèle réservoir. À cette fin, un réseau simple est simulé à l'aide d'un simulateur mésoscopique reproduisant la propagation d'ondes cinématiques sur les liens. Le paramétrage des distributions de demande de flux en entrée et des offres de flux en sortie génère des chargements homogènes ou hétérogènes à la fois à l'intérieur et à la frontière de la région étudiée. Les résultats de la simulation mésoscopique sont ensuite comparés aux sorties du modèle MFD lorsque des états stationnaires sont atteints. Des écarts importants entre les deux approches sont observés, en termes de flux

et d'accumulation, lorsque des distributions hétérogènes de la demande (ou de l'offre) sont appliquées aux entrées locales (ou aux sorties) du modèle mésoscopique. Les écarts peuvent être considérablement réduits pour des cas de demande hétérogène, lorsque le MFD et la longueur de parcours moyenne sont calibrés en conséquence. Toutefois, il n'existe pas de solution simple pour les scénarios d'offre hétérogène, car ils peuvent générer des schémas de congestion interne très différents sur le réseau en raison de réductions de capacité locales. Nous proposons une méthode de correction dans ce chapitre pour ajuster les sorties du modèle MFD dans un tel cas.

*
* *

Pour résumer ce chapitre, en ce qui concerne la mise en œuvre pratique d'une simulation MFD assez simple, des comparaisons entre les simulations mésoscopiques à l'échelle des liens sur un réseau Manhattan et sa modélisation MFD en tant que réservoir unique ont été effectuées pour évaluer la précision de la simulation MFD. Il a été démontré qu'une distribution hétérogène des flux au périmètre pouvait générer des conditions de trafic inégales au sein du réseau qui sont critiques pour la simulation MFD. L'état du trafic estimé dans le modèle à réservoir unique peut notamment présenter un biais important par rapport à l'agrégation des résultats de la simulation au niveau des liens. En particulier, il a été

confirmé que le MFD et la longueur de parcours moyenne dépendaient tous deux des paramètres de la demande et de l'offre au périmètre. Par conséquent, elles ne sont pas uniquement des propriétés intrinsèques du réseau, mais sont également définies par les schémas de mobilité résultant des choix des usagers et de leur adaptation aux conditions aux limites du réseau.

Les contributions de cette partie peuvent être résumées comme suit :

- Proposition de méthodes numériques basées sur des approximations linéaires pour résoudre à la fois le modèle basé sur l'accumulation et celui basé sur la distance. En particulier, un schéma événementiel est conçu pour résoudre le modèle basé sur la distance avec des trajets individuels de véhicules pour représenter les flux dans le réservoir.
- Identification du domaine de validité pour la description basée sur l'accumulation du flux de trafic dans un réservoir. Ce domaine est caractérisé par l'erreur sur le temps de parcours dans ce modèle lorsque les conditions de circulation évoluent rapidement.
- Comparaison entre la modélisation du flux de trafic basée sur l'accumulation et l'agrégation des sorties de simulation au niveau des liens pour un réseau Manhattan simple. L'étude de différentes conditions de débit au périmètre montre l'importance du recalibrage du MFD et de la longueur de parcours moyenne pour éviter un biais significa-

tif dans les états de trafic prédits par la simulation MFD.

Les études menées dans cette partie se sont concentrées sur le modèle réservoir unique avec une longueur de parcours moyenne unique. Cependant, la littérature sur les modèles MFD fournit déjà de nouveaux cadres avec des longueurs de parcours multiples dans le même réservoir. Par conséquent, les autres axes de recherche doivent maintenant étudier la dynamique du trafic d'un réservoir unique comportant plusieurs trajets. De plus, étant donné que les comparaisons entre le modèle basé sur l'accumulation et le modèle basé sur la distance ont été effectuées dans des conditions de sous-saturation, l'extension à la sursaturation devrait également être incluse dans notre champ d'application. Toutes ces pistes de recherche sont détaillées ci-dessous :

- Étendre l'étude de la dynamique d'un seul réservoir à plusieurs catégories de déplacements, tant pour le modèle basé sur l'accumulation que pour celui basé sur la distance.
- Élargir l'étude de la dynamique du trafic MFD dans des situations de forte saturation. Cela devrait inclure l'extension du cadre fondé sur la distance aux conditions de sursaturation, ainsi qu'une bonne compréhension des restrictions d'entrée et de la convergence des flux dans un réservoir.
- Valider les approches proposées en comparant les simulations MFD avec des simulations au niveau des liens ou des données réelles de trafic

Deuxième partie

Étude des échanges de flux dans les systèmes multi-réservoirs

CETTE partie vise à étendre les études présentées dans la première partie au cas des catégories de trajets multiples dans un même réservoir. Bien que toujours centrée sur le modèle du réservoir unique, cette partie va permettre la construction d'une plate-forme de simulation multi-réservoirs. Pour ce faire, de multiples conditions aux limites sont définies dans le modèle du réservoir unique afin de représenter les interactions entre ce réservoir et ses possibles voisins. Dans cette perspective, une attention particulière est portée à la modélisation des échanges de flux au périmètre (entrée et sortie) du réservoir unique, car dans un contexte à multiples réservoirs, tous les réservoirs interagissent entre eux en envoyant ou en recevant des flux de véhicules.

Cette partie est divisée en deux études différentes. La première concerne la compréhension de la théorie derrière les modèles proposés dans la littérature. Plusieurs limitations sont abordées, notamment le fait que les approches proposées ne valent que pour la sous-saturation ou ne soient pas bien appliquées en sursaturation. Cette première étude développe donc un nouveau cadre pour gérer la convergence des flux entrants et la divergence des flux sortants dans un seul réservoir. Ce cadre doit être cohérent pour toutes conditions de trafic et s'appliquer à la fois au modèle basé sur l'accumulation et à celui basé sur la distance. La deuxième étude est consacrée à la validation de ce cadre et d'autres approches de la littérature. À cette fin, les prédictions de différents modèles MFD sont comparées aux résultats de simulation au niveau des liens sur un réseau Manhattan.

Chapitre 4

ÉTUDE DES ÉCHANGES DE FLUX DANS LE CAS DE PLUSIEURS RÉSERVOIRS TRAVERSÉS PAR DE MULTIPLES ROUTES

La plupart des modèles de trafic à grande échelle basés sur le MFD reposent sur ce que certains auteurs ont appelé l'approche dite « fondée sur l'accumulation ». Des études récentes ont mis en évidence les limites d'une telle approche dans des conditions de variation rapide des états de trafic et se sont concentrées sur une meilleure représentation de la dynamique interne d'un réservoir, une approche qualifiée de « basée sur la distance ». Cependant, lorsque plusieurs réservoirs sont connectés, la gestion des flux entrants et sortants, notamment pour propager correctement la congestion entre les réservoirs, reste un défi dans les deux approches de modélisation susmentionnées. En particulier, dans des conditions de circulation saturées, la convergence des flux entrants et la divergence des flux sortants pour un réservoir donné sont d'une importance cruciale car elles régissent l'évolution du système dans son ensemble.

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse approfondie de la manière dont la congestion est généralement traitée dans le modèle basé sur l'accumulation. Ceci nous sert de base à la mise en œuvre d'un modèle de propagation de congestion approprié à l'approche basée sur la distance. Des études théoriques et des études de simulation montrent que, dans le cas de plusieurs longueurs de parcours dans un réservoir, il n'existe qu'une forme de limitation du débit entrant à l'entrée du réservoir qui respecte les contraintes globales en matière de flux et de production. De plus, les sorties de tous les trajets sor-

tant du même réservoir doivent toutes être interdépendantes pour satisfaire à la définition de la production totale de sortie du réservoir. Cela a de fortes implications lorsque plusieurs réservoirs sont connectés ensemble. Nous soulignons notamment que le système peut facilement converger vers un blocage total si une gestion des flux sortants basée sur la sortie la plus contrainte de chaque réservoir n'est pas adoptée. Des comparaisons sont données avec les derniers développements de la littérature pour illustrer cela.

*
* *

Pour résumer ce chapitre, nous avons étudié les échanges de flux dans un réservoir unique où les interactions avec les potentiels réservoirs voisins (flux émetteur ou récepteur) étaient représentées par des conditions aux limites exogènes. L'extension du modèle réservoir avec une longueur de parcours unique à plusieurs longueurs de parcours a également été analysée. Alors que les approches proposées dans la littérature appliquent principalement la simulation MFD dans des situations de sous-saturation, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la modélisation de la propagation de la congestion dans un réservoir et à ses effets sur les restrictions d'offre en entrée et en sortie. À cette fin, nous avons proposé des contraintes de flux et de production à l'entrée et à la sortie du réservoir afin de concevoir de nouveaux schémas de convergence et de divergence de flux, et d'assurer leur cohérence avec l'hypothèse d'homogénéité du réservoir (c'est-à-dire, à l'équilibre, l'accumu-

lation et le flux de chaque trajet doit correspondre à la formule de Little et tous les véhicules doivent avoir la même vitesse donnée par le MFD). En comparaison avec les travaux existants dans la littérature, notre formulation de restriction du flux entrant consiste en un schéma de convergence à deux niveaux, le premier prenant en compte les limitations physiques du réservoir (capacités des liens à l'entrée), et le second reproduisant la remontée de congestion à l'entrée du réservoir avec une fonction d'offre. D'autre part, notre nouvelle formulation de flux sortant en sursaturation

consiste en une nouvelle fonction de demande combinée à un nouveau schéma de divergence de flux. Cette nouvelle formulation est destinée à reproduire le débit maximum en tête de queue de bouchon après une période de congestion due à des restrictions temporaires de flux en sortie (représentant par exemple la remontée de congestion depuis un réservoir aval). Ces nouvelles gestions de flux en entrée et en sortie ont été mises en œuvre dans le modèle basé sur l'accumulation et celui basé sur la distance.

Chapitre 5

COMPARAISON ENTRE MODÈLES D'ÉCHANGE DE FLUX ET VALIDATION GRÂCE À LA SIMULATION MICROSCOPIQUE

LES systèmes multi-réservoirs basés sur le MFD sont attrayants pour la simulation des états de trafic à l'échelle urbaine. Néanmoins, la limitation du débit en raison de la propagation de la congestion entre réservoirs n'est pas encore totalement comprise. Dans le chapitre précédent, nous avons analysé les propriétés des échanges de flux et formulé de nouveaux modèles de convergent et de divergent, différents de ceux proposés dans la littérature. Cependant, tous ces modèles n'ont jamais été vraiment validés grâce à des données de trafic agrégées (réelles ou simulées).

La contribution de ce chapitre est de valider différentes approches de modélisation MFD en utilisant la simulation microscopique. À cette fin, nous nous concentrons sur un réseau artificiel type Manhattan traversé par deux trajets régionaux (Ouest-Est et Nord-Sud). Nous analysons ensuite l'accumulation, le flux entrant et sortant de ces trajets pour différents scénarios de congestion, et comparons les résultats avec ceux prévus par le modèle MFD. Ces comparaisons permettent d'abord d'étudier et de calibrer la capacité d'entrée du réseau, appelée fonction d'offre. Nous montrons ensuite que, comme dans la littérature, l'utilisation d'un schéma de convergent au prorata de la demande dans le modèle MFD est la meilleure option pour déterminer correctement les flux entrants. Enfin, en ce qui concerne les sorties du

réseau, nous montrons également que le schéma de divergent est essentiel pour bien reproduire les résultats de la microsimulation. Au début de la période de congestion, l'approche largement utilisée d'une demande de flux de sortie décroissante fournit une bonne estimation des états transitoires, mais ne permet pas de prédire un déchargement du réseau fiable lors du retour à l'état fluide. L'approche que nous avons développée dans le chapitre précédent tire parti de la définition de la demande de flux de sortie maximum et de l'application de relations d'interdépendance entre les sorties pour surmonter ce problème.

*
* *

Pour résumer ce chapitre, nos nouvelles approches de modélisation et celles de la littérature ont été comparées à des résultats de simulations microscopiques, pour un réseau Manhattan traversé par deux principaux ensembles de trajets. À l'entrée, un modèle de convergent au prorata de la demande s'est révélé satisfaisant pour reproduire l'état stationnaire observé dans la simulation microscopique. De plus, l'étude des flux entrants nous a permis de calibrer une forme générale de la fonction d'offre en entrée. À la sortie, notre nouvelle formulation pour décrire la décharge des files d'attente a été validée par les résultats de la microsimulation. De plus, le modèle de sortie largement utilisé dans la littérature (demande de flux sortant décroissante avec l'accumulation pour simu-

ler la congestion interne en sursaturation) s'est révélé trop pessimiste, car il surestime clairement la durée de la période de congestion dans les cas test que nous avons étudiés.

Les contributions de cette partie peuvent être résumées comme suit :

- Proposition d'un nouveau cadre pour gérer les remontées de congestion dans les systèmes multi-réservoirs avec plusieurs longueurs de parcours
- Extension du modèle basé sur la distance dans des situations sursaturées
- Validation du modèle de convergent au prorata de la demande à l'entrée du réservoir, ainsi que de notre nouvelle formulation du flux de sortie combinée à un nouveau modèle de divergent par rapport aux résultats de microsimulation.

Les études menées dans cette partie sont restées

centrées sur la dynamique du trafic dans un seul réservoir. Maintenant que nous avons mis au point le composant requis pour connecter plusieurs réservoirs ensemble (modèles de gestion des flux d'entrée et de sortie), il convient d'étudier d'autres applications avec des systèmes à plusieurs réservoirs sur des réseaux plus grands. De plus, pour poursuivre les efforts de validation de notre modélisation, une confrontation entre la simulation MFD et des données réelles doit être envisagée. Toutes ces pistes de recherche sont détaillées ci-dessous :

- Introduire la simulation multi-réservoirs pour un grand réseau
- Présenter la mise en œuvre du modèle basé sur l'accumulation et de celui basé sur la distance pour les systèmes multi-réservoirs
- Calibrer une simulation multi-réservoirs et confronter ses sorties avec des données réelles

Troisième partie
Développements et applications

LE but de cette partie est d'introduire les différentes étapes et composants nécessaires à la réalisation d'une simulation MFD multi-routes et multi-réservoirs. Elle décrit la plate-forme de simulation MFD développée au cours de cette thèse, et qui constitue la principale réalisation concrète des travaux de recherche présentés dans les deux parties précédentes. Cette partie comprend la présentation du contexte de la simulation à grande échelle et de ses hypothèses, la description détaillée des variables et des structures utilisées, ainsi que l'analyse de la phase de pré-traitement avec une discussion sur les données d'entrée requises. Le module d'affectation au niveau des réservoirs, fruit d'une collaboration avec un autre doctorant, est également présenté pour répartir les flux entre les différents itinéraires régionaux. En ce qui concerne la modélisation des flux de trafic, la mise en œuvre pratique des modèles à la fois basé sur l'accumulation et la distance est détaillée dans le cœur de la plate-forme. Cette mise en œuvre est le résultat de nos recherches précédentes sur les échanges de flux pour un seul réservoir, comme cela a été étudié dans la dernière partie.

Enfin, une première application sur un réseau de ville réelle est effectuée. L'ensemble du processus d'étalonnage est présenté et discuté, et les résultats de la simulation MFD sont comparés à des données réelles. Malgré les nombreux problèmes rencontrés et la relative limitation de l'étude, ce premier cas test réel montre les résultats prometteurs de la simulation multi-réservoirs.

Chapitre 6

MISE EN PLACE DE LA SIMULATION MULTI-RÉSERVOIRS ET PREMIÈRE APPLICATION SUR UN RÉSEAU RÉEL

DANS ce chapitre, nous présentons la plateforme de simulation multi-réservoirs et multi-routes développée au cours de cette thèse. Un aperçu complet est donné sur les différentes hypothèses, les problèmes de mise en œuvre, les approches et options de modélisation et les données nécessaires pour calibrer une simulation. Le but de ce chapitre est de présenter la mise en œuvre pratique de nos résultats concernant l'étude des échanges de flux dans un réservoir unique, comme détaillé dans la partie II. À cette fin, les algorithmes de résolution du modèle basé sur l'accumulation et de celui basé sur la distance ont été décrits avec toutes les variables de simulation requises. La présentation de la plate-forme permet également de donner quelques indications sur le pré-traitement des données d'entrée. Ceci illustre notamment la collaboration avec le doctorant S. Batista, qui a travaillé sur l'estimation des longueurs de parcours et sur le module d'affectation permettant de calculer les distributions de flux sur les itinéraires régionaux.

L'application de la plate-forme de simulation est ensuite testée sur un cas réel : la ville de Lyon (France). Ce test consiste à reproduire les états du trafic pour un jour de semaine typique avec une simulation à 5 réservoirs. Ce cas d'application est limité en ce qui concerne la modélisation des flux de trafic car chaque réservoir est sous-saturé, mais il permet de mettre en évidence plusieurs problèmes rencontrés lors de la calibration de la simulation. Premièrement, il existe

un biais dans l'estimation de la production et de l'accumulation, il s'agit du même biais pour les deux mesures car celles-ci proviennent de la même source (données de boucle). Ce biais est dû au fait que ces détecteurs ne couvrent pas tous les liens du réseau. Par conséquent, les deux variables sont estimées comme si les états de trafic étaient homogènes dans un réservoir donné, ce qui n'est pas toujours vrai en pratique. Nous essayons de mesurer ce biais avec un test de simulation d'un réservoir unique en supposant que les autres paramètres sont correctement définis. Deuxièmement, notre méthode de calcul des longueurs de parcours dans les réservoirs (valeurs moyennes des distances les plus courtes dans le réseau réel pour une paire Origine-Destination donnée) est limitée car elle n'est probablement pas représentative des schémas de mobilité des usagers. Néanmoins, nous corrigeons nos estimations grâce aux trajectoires provenant des données de taxi. Troisièmement, le profil de demande obtenu lors d'une étude préliminaire réalisée par d'autres membres du projet pourrait ne pas correspondre parfaitement aux états de trafic que nous avons observés avec notre jeu de données (boucles et taxis). Enfin, nous n'avons pas une idée claire de la répartition des flux entre les nombreuses possibilités d'itinéraires parmi les 5 réservoirs. La méthode d'essai et erreur est alors utilisée pour obtenir le meilleur ajustement entre la simulation multi-réservoirs et les données réelles. Bien que certains de ces biais soient plus ou moins identi-

fiés, la principale difficulté de notre étude est d'arbitrer entre les différentes sources d'erreur et d'essayer d'évaluer leur fiabilité. À la fin, les prévisions fournies par la simulation MFD sont plutôt prometteuses compte-tenu des problèmes rencontrés lors du processus de calibration. Malheureusement, ce cas test manque d'états sursaturés pour valider les modules de propagation de la congestion entre les réservoirs avec des données réelles.

Les contributions de cette partie peuvent être résumées comme suit :

- Présentation détaillée de la plate-forme de simulation multi-réservoirs comprenant les différents éléments de recherche des deux parties précédentes
- Première application de cette plate-forme de simulation sur un cas réel d'une ville. Bien que des problèmes d'étalonnage aient été identifiés, les résultats finaux sont prometteurs mais doivent être précisés avec des informations supplémentaires.

BIBLIOGRAPHIE

- Aboudolas, K. & Geroliminis, N. (2013). Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks. *Transportation Research Part B : Methodological*, 55 :265–281.
- Ambuhl, L., Loder, A., Menendez, M. & Axhausen, K. W. (2017). Empirical macroscopic fundamental diagrams : New insights from loop detector and floating car data. In *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, 17-03331, page 16p. Washington DC.
- Ambuhl, L., Loder, A., Menendez, M. & Axhausen, K. W. (2018). A case study of zurich’s two-layered perimeter control. In *TRA 2018 7th Transport Research Arena*. Vienna, Austria.
- Ben-Akiva, M., Bierlaire, M., Koutsopoulos, H. N. & Mishalani, R. (2002). *Real Time Simulation of Traffic Demand-Supply Interactions within DynaMIT*, vol. 63, chap. 2, pages 19–36. Springer US, Boston, MA.
- Ben-Akiva, M. E., Gao, S., Wei, Z. & Wen, Y. (2012). A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 24 :62–82.
- Buisson, C. & Ladier, C. (2009). Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2124 :127–136.
- Daganzo, C. F. (2007). Urban gridlock : Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B : Methodological*, 41(1) :49–62.
- Geroliminis, N. (2009). Dynamics of peak hour and effect of parking for congested cities. In *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, 09-1685. Washington DC.
- Geroliminis, N. (2015). Cruising-for-parking in congested cities with an mfd representation. *Economics of Transportation*, 4(3) :156–165.
- Geroliminis, N. & Boyaci, B. (2012). The effect of variability of urban systems characteristics in the network capacity. *Transportation Research Part B : Methodological*, 46(10) :1607–1623.
- Geroliminis, N. & Daganzo, C. F. (2007). Macroscopic modeling of traffic in cities. In *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, 07-0413. Washington DC.
- Geroliminis, N. & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams : Some experimental findings. *Transportation Research Part B : Methodological*, 42(9) :759–770.
- Godfrey, J. W. (1969). The mechanism of road network. *Traffic Engineering and Control*, 7(11) :323–327.
- Gonzales, E. J., Chavis, C., Li, Y. & Daganzo, C. F. (2009). Multimodal transport modeling for nairobi, kenya : Insights and recommendations with an evidence-based model. techreport UCB-ITS-VWP-2009-5, UC Berkeley Center for Future Urban Transport.
- Haddad, J. & Geroliminis, N. (2012). On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities. *Transportation Research Part B : Methodological*, 46(9) :1159–1176.
- Herman, R. & Prigogine, I. (1979). A two-fluid approach to town traffic. *Science*, 204(4389) :148–151.
- Jayakrishnan, R., Mahmassani, H. S. & Hu, T.-Y. (1994). An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks. *Transportation Research Part C : Emerging*

- Technologies*, 2(3) :129–147.
- Ji, Y., Daamen, W., Hoogendoorn, S., Hoogendoorn-Lanser, S. & Qian, X. (2010). Investigating the shape of the macroscopic fundamental diagram using simulation data. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2161 :40–48.
- Ji, Y., Luo, J. & Geroliminis, N. (2014). Empirical observations of congestion propagation and dynamic partitioning with probe data for large scale systems. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2422(1) :1–11.
- Keyvan-Ekbatani, M., Kouvelas, A., Papamichail, I. & Papageorgiou, M. (2012). Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating. *Transportation Research Part B : Methodological*, 46(10) :1393–1403.
- Loder, A., Ambuhl, L., Menendez, M. & Axhausen, K. W. (2017). Empirics of multi-modal traffic networks - using the 3d macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 82 :88–101.
- Loder, A., Ambuhl, L., Menendez, M. & Axhausen, K. W. (2018). Traffic problems in towns : An empirical analysis with macroscopic fundamental diagrams from cities around the world. In *Transportation Research Board 97th Annual Meeting*, 18-01049. Washington DC.
- Mahmassani, H., Williams, J. C. & Herman, R. (1984). Investigation of network-level traffic flow relationships : Some simulation results. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 971 :121–130.
- Mahmassani, H. S., Saberi, M. & Zockaie, A. (2013). Urban network gridlock : Theory, characteristics, and dynamics. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 36 :480–497.
- Mahmassani, H. S., Williams, J. C. & Herman, R. (1987). Performance of urban traffic networks. In *10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pages 1–20.
- Saberi, M., Mahmassani, H. S., Hou, T. & Zockaie, A. (2014). Estimating network fundamental diagram using three-dimensional vehicle trajectories. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2422(2) :12–20.
- Shafiei, S., Gu, Z. & Saberi, M. (2018). Calibration and validation of a simulation-based dynamic traffic assignment model for a large-scale congested network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 86 :169–186.
- Shoufeng, L., Jie, W., van Zuylen, H. & Ximin, L. (2013). Deriving the macroscopic fundamental diagram for an urban area using counted flows and taxi gps. In *Intelligent Transportation Systems - (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*, pages 184–188.
- Sirmatel, I. I. & Geroliminis, N. (2017). Economic model predictive control of large-scale urban road networks via perimeter control and regional route guidance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(4) :1112–1121.
- Smeed, R. J. (1967). The road capacity of city centers. *Highway Research Record*, 169 :22–29.
- Tsubota, T., Bhaskar, A. & Chung, E. (2014). Macroscopic fundamental diagram for brisbane, australia : Empirical findings on network partitioning and incident detection. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2421(1) :12–21.
- Yildirimoglu, M., Ramezani, M. & Geroliminis, N. (2015). Equilibrium analysis and route guidance in large-scale networks with mfd dynamics. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 59 :404–420.