

MÉTHODES HEURISTIQUES POUR LE CALCUL D'AFFECTATION DYNAMIQUE DU TRAFIC

Thèse de doctorat de :
Mostafa Ameli

Résumé étendu

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

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), Lyon, France & Génie des Réseaux de Transport Terrestres et Informatique Avancé (GRETIA), Paris, France

Auteur : Mostafa Ameli

Date de soutenance : 31/10/2019

Titre : Méthodes heuristiques pour le calcul d'affectation dynamique du trafic

Numéro d'ordre NNT : 2019LYSET009

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

Spécialité : Génie civil

Directeur de thèse : Ludovic LECLERCQ

Co-directeur de thèse : Jean-Patrick LEBACQUE

Présidente du jury : Salima HASSAS (Université Claude Bernard Lyon 1)

Composition du jury :

Hani MAHMASSANI (Northwestern University), Rapporteur

Francesco VITI (Université du Luxembourg), Rapporteur

Hans VAN LINT (TU Delft), Examineur

Salima HASSAS (Université Claude Bernard Lyon 1), Examineur

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

Jean-Patrick LEBACQUE (Univ. Paris-Est, IFSTTAR), Co-directeur de thèse

Mots-Clés : *Affectation dynamique du trafic, basée sur le voyage, équilibre utilisateur, application réseau à grande échelle, taille de l'étape, convergence, trafic, simulation, algorithme génétique, algorithme de recuit simulé, au jour le jour, Analyse d'unicité, Multimodal, Système optimal, Demande variationnelle, Equilibre de commutation, Point de rupture*

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

LES systèmes de transport sont caractérisés de manière dynamique non seulement par des interactions non linéaires entre les différents composants, mais également par des boucles de rétroaction entre l'état du réseau et les décisions des utilisateurs. En particulier, la congestion du réseau impacte à la fois la répartition de la demande locale en modifiant les choix d'itinéraire et la demande multimodale globale. Selon les conditions du réseau, ils peuvent décider de changer, par exemple, leur mode de transport. Plusieurs équilibres peuvent être définis pour les systèmes de transport. L'équilibre de l'utilisateur correspond à la situation dans laquelle chaque utilisateur est autorisé à se comporter de manière égoïste et à minimiser ses propres frais de déplacement. L'optimum du système correspond à une situation où le coût total du transport de tous les utilisateurs est minimal.

Dans ce contexte, l'étude vise à calculer les modèles de flux d'itinéraires dans un réseau prenant

en compte différentes conditions d'équilibre et à étudier l'équilibre du réseau dans un contexte dynamique. L'étude se concentre sur des modèles de trafic capables de représenter une dynamique du trafic urbain à grande échelle. Trois sujets principaux sont abordés. Premièrement, des méthodes heuristiques et méta-heuristiques rapides sont développées pour déterminer les équilibres avec différents types de trafic. Deuxièmement, l'existence et l'unicité des équilibres d'utilisateurs sont étudiées. Lorsqu'il n'y a pas d'unicité, la relation entre des équilibres multiples est examinée. De plus, l'impact de l'évolution du réseau est analysé. Troisièmement, une nouvelle approche est développée pour analyser l'équilibre du réseau en fonction du niveau de la demande. Cette approche compare les optima des utilisateurs et du système et vise à concevoir des stratégies de contrôle afin de déplacer la situation d'équilibre de l'utilisateur vers l'optimum du système.

SOMMAIRE

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | Introduction générale | 9 |
| I | Optimiser le calcul DTA | 12 |
| 2 | Benchmark des méthodes de solution | 14 |
| 3 | Nouveau cadre pour le calcul de DTA | 17 |
| II | Application de la méthode DTA à de nouveaux problèmes de réseau | 19 |
| 4 | Impact de l'évolution de conception du réseau sur l'UE multimodal | 21 |
| 5 | Analyse Equilibria : améliorer des performances du réseau de trafic | 23 |
| | Conclusion générale | 25 |

Chapitre 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

DANS le passé, de nombreux ouvrages ont été consacrés à l'affectation dynamique du trafic pour de nombreux types d'applications. Dans la littérature seules les approches basées sur la simulation, peuvent faire face à la dimensionnalité des réseaux urbains à grande échelle. Ce dernier est différencié par de nombreux aspects : (i) la plupart de ses méthodes de résolution reposent sur le même concept; c'est-à-dire, la résolution du problème à point fixe avec des méthodes inspirées de la MSA ou bien Method of Successive Average, (ii) peu de travaux ont été proposés pour tester l'efficacité des algorithmes existants avec les bons paramètres. La dernière question est primordiale, pour les réseaux à grande échelle, le temps de calcul est généralement trop long (heures ou même en jours). Par conséquent, toute amélioration de ce stade peut être utile. En outre, l'utilisation d'autres méthodes (des domaines de l'optimisation) peut permettre d'améliorer le temps de calcul. L'application des approches basées sur la simulation dans l'affectation dynamique du trafic (DTA) aux nouveaux problèmes opérationnels constitue également un axe de recherche intéressant.

On note que de nombreux articles de recherche sur le DTA s'intéressent au sujet de la formulation mathématique, ils se basent sur des hypothèses solides qui garantissent l'unicité des solutions. Cependant, en pratique, les fonctions de coût multimodales, les intersections signalées qui enfreignent les règles de premier entré, premier sorti (FIFO, First In First Out) et d'autres caractéristiques classiques des réseaux urbains violent fondamentalement ces hypothèses, ce qui peut ensuite conduire à un équilibre

multiple. On note que de nombreux travaux dans la littérature s'intéressent à ce problème, car (i) il est invariable analytiquement, à l'exception de très simples réseaux, (ii) les approches basées sur la simulation sont souvent initialisées avec le même point de départ (discipline All Or Nothing (tout ou rien)), ce qui conduit pratiquement à une solution unique. Dans cette thèse, nous proposons d'aborder les questions suivantes afin : (i) d'améliorer les méthodes de résolution existantes, de fournir des indications claires sur les méthodes à utiliser en fonction de la configuration du réseau, (ii) de traiter les nouveaux problèmes de DTA inspirés des réseaux urbains réels. Ces préoccupations relatives au problème de DTA basé sur la simulation sont présentées comme suit :

- Des efforts significatifs ont été consentis afin de fournir une nouvelle représentation mathématique qui permette de résoudre le DTA, il est essentiel de mettre l'accent sur l'efficacité des méthodes de calcul, et les facteurs de performance des algorithmes de résolution. Pour cela, la question est de savoir quel algorithme est le plus efficace pour résoudre le problème de DTA en prenant en considération la taille et la concentration du réseau. Existe-t-il un moyen pour améliorer les performances des méthodes existantes, en matière de qualité et dans un temps de calcul réalisable pour les instances à grande échelle?
- Le problème DTA basé sur la simulation peut être vu comme étant un problème NP difficile, dans lequel l'application des méthodes de résolution exacte est irréalisable sur les réseaux à grande échelle. Plusieurs travaux ont été réalisés afin de concevoir des méthodes heuristiques pour

résoudre les problèmes de DTA. Ces méthodes fonctionnent de manière itérative et séquentielle. Ils exploitent une solution qui satisfait les conditions d'équilibre plutôt que d'explorer l'espace de solutions pour trouver la solution optimale. Existe-t-il un moyen de concevoir une nouvelle génération de méthodes pour explorer davantage l'espace de solutions voisines? Avons-nous une meilleure solution en explorant davantage l'espace de solutions?

- Les modèles DTA multi-classes sont largement étudiés, ils prennent en compte l'hétérogénéité des utilisateurs. De plus en plus, le modèle devient précis pour représenter la fonction de coût (déplacement des utilisateurs), le calcul de l'équilibre devient de son côté plus difficile. Quelle catégorie d'algorithmes est efficace pour le problème multi-classe DTA?
- L'unicité est supposée être une caractéristique rare de la solution DTA dans un contexte multimodal, en revanche, de nombreuses études montrent que le modèle DTA multimodal viole les conditions d'unicité, il ne vérifie pas vraiment les solutions existantes et leur différence en termes de distribution de flux de chemin. Avons-nous des solutions d'équilibre vraiment différentes en théorie et en pratique? Comment pouvons-nous prendre en compte ces équilibres multiples dans un DTA basé sur la simulation?
- En pratique, la conception des réseaux multimodaux réels peut être modifiée à long terme, par exemple, de nombreuses installations de transport sont ajoutées au système. Il existe peu d'études sur les modèles de DTA au jour le jour en prenant en compte l'évolution du réseau. Cependant, aucun d'entre eux n'examine l'absence de l'unicité et le changement du réseau ensemble. Le réseau converge-t-il vers des équilibres différents, en cas d'une configuration de réseau différente avec la même conception de réseau final? En d'autres termes, la situation actuelle du réseau est-elle suffisante pour affecter la répartition réelle des utilisateurs dans le réseau?
- L'amélioration des performances du système de transport fait encore l'objet de débats. Les utilisateurs du modèle recherchent un équilibre entre utilisateurs tandis que le système souhaite atteindre l'optimum. Sur les modèles DTA, le calcul de la distribution (de flux) sur les différents

chemins d'équilibre a fait l'objet de nombreux travaux. Cependant, l'analyse des sorties des modèles DTA pour améliorer le système de transport fait défaut dans la littérature. Après avoir calculé l'équilibre, quelle est la prochaine étape? Comment pouvons-nous analyser l'équilibre du réseau? Pouvons-nous concevoir une stratégie afin de passer le système de l'équilibre utilisateur à l'optimum du système?

L'objectif de cette thèse est d'aborder les questions de recherche susmentionnées. Les questions peuvent être classées en deux catégories. La première comprend les questions concernant la comparaison croisée des algorithmes existants, et la mise au point d'un cadre efficace pour trouver l'équilibre du réseau pour les modèles DTA basés sur la simulation. La deuxième comprend l'innovation dans l'analyse de la solution d'équilibre : la recherche des équilibres multiples, l'impact des changements de conception du réseau sur l'équilibre du réseau, l'élaboration d'un cadre pour l'analyse de l'équilibre utilisateur et des solutions optimales du système, l'élaboration d'une stratégie d'amélioration de la performance du réseau. Le plan de thèse est basé sur cette classification. Ainsi, le manuscrit est divisé en deux parties principales : la première porte sur le calcul de l'équilibre dans le problème DTA et vise à améliorer les algorithmes de calcul DTA, la seconde utilise l'algorithme pour résoudre de nouveaux problèmes DTA et innove dans l'analyse de la sortie DTA. En conséquence, la réponse de la première catégorie nous fournit un outil efficace pour calculer l'équilibre, puis nous allons utiliser cet outil pour calculer l'équilibre afin d'enquêter sur les questions de la deuxième catégorie.

Dans la première partie, Chapitre 2 se concentre sur l'amélioration des algorithmes existant dans la littérature, afin de trouver l'équilibre utilisateur compte tenu du chargement de réseau dynamique basé sur le trajet. En d'autres termes, l'objectif de ce chapitre est d'améliorer les algorithmes d'optimisation existants. Les inconvénients des méthodes existantes sont notés et plusieurs solutions sont proposées pour les surmonter et accélérer la convergence. Une contribution importante de ce chapitre est la référence complète de tous les algorithmes pour différentes tailles de réseau et niveaux de saturation. Une comparaison complète des performances des algorithmes basée sur la qualité des solutions et le temps de calcul est effectuée. Chapitre 3 introduit une nouvelle classe d'algorithmes d'optimisation pour les

modèles DTA basés sur la simulation. Premièrement, l'étude met en évidence les inconvénients des algorithmes séquentiels. Deuxièmement, un nouveau cadre basé sur le calcul parallèle est proposé pour résoudre le problème de la DTA. Deux approches métaheuristiques parallélisées sont à appliquer pour résoudre le problème de l'équilibre du réseau : la première dérivée du circuit simulé et la seconde de celle de l'algorithme génétique. Les résultats montrent que les métaheuristiques dominent les méthodes classiques dans un scénario de test dynamique à grande échelle.

Chapitre 4 examine les performances des algorithmes sur des modèles DTA plus complexes : multimodal et multi-classe. Premièrement, en se basant sur la recherche bibliographique, une nouvelle fonction de coût de déplacement est proposée pour le réseau de transport basé sur le déplacement. L'objectif est d'utiliser et d'inclure plus d'informations sur les utilisateurs dans cette fonction afin de mieux estimer le choix de déplacement des utilisateurs. L'existence de l'équilibre est prouvée dans le cas statique et étendue au modèle DTA. Les meilleurs algorithmes de Chapitres 2 et 3 sont appliqués au modèle. Une étude expérimentale (simulation) est proposée sur le réseau de trafic dynamique à grande échelle, elle compare les méthodes de résolution pour le modèle DTA à plusieurs classes.

Dans la deuxième partie, Chapitre 4 discute les différentes raisons de la non-unicité dans l'équilibre utilisateur multimodal. L'étude a montré que l'évolution de la conception du réseau a un impact sur l'équilibre final d'utilisateur multimodal statique. L'enquête passe ensuite au contexte dynamique. Des équilibres multiples sont observés pour l'équilibre d'utilisateur multimodal dynamique lors de la modification (de l'évolution) de conception du réseau. Il est démontré que l'auto-organisation du système conduit à des performances de réseaux différentes en fonction de l'évolution du réseau. Cela signifie que l'étude de la situation actuelle du réseau risque de ne pas être suffisante pour saisir la répartition réelle des utilisateurs au sein du réseau. En d'autres termes, un calcul d'UE unique avec le réglage

de réseau actuel peut conduire à un équilibre autre que celui-ci résultant des différentes étapes correspondant à l'évolution du réseau. En outre, le système peut réduire considérablement le temps de trajet total pour certaines configurations de réseaux spécifiques.

Chapitre 5 considère l'affectation de trafic statique et dynamique, afin d'étudier l'impact de différents niveaux de demande sur trois équilibres (équilibre utilisateur, système optimal et équilibre utilisateur rationnel frontière). Il définit le concept de point d'arrêt (Breakpoint) comme un niveau de demande où nous observons un changement dans le chemin actif d'un équilibre. L'étude tente de trouver les Breakpoints et d'étudier la possibilité d'utiliser des informations pour une stratégie d'interdiction de circulation afin de faire passer le système d'un équilibre à l'autre.

Enfin, les conclusions générales et les recommandations pour les études futures sont présentées dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

Cette recherche est le fruit de la collaboration de deux laboratoires de l'Institut français des sciences et technologies du transport, du développement et des réseaux (**IFSTTAR**) : GRETTIA (Ingénierie des réseaux de transport et informatique avancée) et LICIT (Laboratoire d'ingénierie du transport et de la circulation). Le doctorant travaille principalement au laboratoire GRETTIA à Paris. Cependant, la mise en pratique de toutes les méthodes se fait en collaboration avec le doctorant et les membres du LICIT de Lyon. Toutes les recherches de cette thèse font partie du projet ERC **MAGnUM** dirigé par le professeur L. Leclercq (Modélisation du trafic multi-échelles et approche multimodale pour une gestion durable de la mobilité urbaine). Les méthodes de solutions proposées dans la thèse ont été implémentées dans les différents simulateurs du projet **MAGnUM** et sont utilisées par d'autres membres de l'équipe pour leurs propres recherches. La plupart des chapitres de ce manuscrit sont des versions mises à jour des articles publiés ou soumis dans des revues à comité de lecture ou des comptes rendus de conférences. Ils sont tous constitués d'œuvres originales créées par le doctorant.

Première partie

Optimiser le calcul DTA

CETTE première partie se concentre sur le calcul de l'équilibre utilisateur. L'objectif est de fournir un outil efficace pour calculer l'équilibre du réseau pour les modèles DTA basés sur la simulation. Nous utilisons ensuite cet outil pour l'analyse de l'équilibre dans la deuxième partie.

Dans la présente partie, les recherches sur les algorithmes sont divisées en deux études différentes. Chapitre 2 se concentre sur l'amélioration des algorithmes de résolution existant dans la littérature, afin de trouver l'équilibre utilisateur compte tenu du chargement de réseau dynamique basé sur le trajet. L'analyse comparative de tous les algorithmes existants est proposée pour différentes tailles de réseau et niveaux de saturation. Elle permet de déterminer quel algorithme est plus efficace que d'autres. Cette enquête fournit une bonne base pour la conception du nouveau cadre présenté dans chapitre 3. Deux approches métaheuristiques parallélisées sont appliquées pour résoudre le problème de l'équilibre du réseau : la première sur le recuit simulé (Simulated Annealing) et la seconde de celui de l'algorithme génétique.

Chapitre 2

BENCHMARK DES MÉTHODES DE SOLUTION

LA résolution du problème d'affectation dynamique du trafic dans un réseau de transport est un problème complexe (en termes de calcul). Ce chapitre examine d'abord les différents algorithmes utilisés dans la littérature pour calculer numériquement l'équilibre utilisateur (UE) lié au chargement dynamique du réseau. La plupart d'entre eux sont basés sur des méthodes itératives pour résoudre un problème à point fixe. Deux éléments doivent être calculés : l'ensemble de chemins et la distribution optimale du flux de chemins entre toutes les paires origine-destination. Dans un cadre générique, ces deux étapes sont appelées respectivement les boucles externe et interne.

Ce chapitre vise à évaluer les performances de calcul des méthodes de la boucle interne qui calculent la distribution du flux de chemins pour différents paramètres réseau (principalement la taille du réseau et les niveaux de demande). Plusieurs améliorations sont également proposées pour accélérer la convergence : quatre nouveaux algorithmes de permutation et deux nouvelles méthodes d'initialisation de la taille utilisées dans chaque itération de descente. Toutes ces extensions sont comparées aux méthodes existant par des tests numériques. L'impact de la taille du réseau et du niveau de saturation de la demande sur les performances des différents composants de l'algorithme de résolution est également évalué. Enfin, les meilleurs algorithmes et paramètres sont identifiés pour toutes les tailles de réseau, en particulier sur la grande échelle.

*
* *

Ce chapitre s'est concentré sur l'amélioration des algorithmes de résolution dans la littérature pour trouver l'équilibre des utilisateurs, en prenant en compte la charge de réseau dynamique basée sur le trajet. Nous avons comparé les performances des algorithmes de résolution, en fonction de la qualité des solutions et des temps de calcul. Table 2.1 présente la meilleure configuration de l'algorithme qui offre la meilleure comparaison entre qualité et temps de calcul pour toutes les tailles de réseau et tous les niveaux de saturation. Si l'accent est mis uniquement sur la qualité de la solution, plusieurs configurations peuvent être utilisées dans la plupart des cas. Cependant, le temps de calcul est très important, en particulier pour le réseau à grande échelle. Par exemple, dans le scénario à grande échelle et sursaturé, l'algorithme probabiliste ne peut pas fournir une meilleure solution que l'algorithme Initialisation MSA, mais il est plus de deux jours plus rapides que l'algorithme Initialisation MSA en temps de calcul. La combinaison de l'approche probabiliste et de l'initialisation de la solution conservée apparaît dans la plupart des cas de Table 2.1 comme meilleur algorithme. Ce n'est pas nécessairement le meilleur en matière de qualité et de rapidité, mais c'est celui qui a le plus de chances d'obtenir la meilleure solution dans tous les scénarios et peut-être considéré comme la solution la plus robuste.

Ce chapitre montre d'abord que la taille du réseau et le niveau de saturation ont un impact sur les performances des algorithmes de résolution du problème DTA. L'analyse montre que les algo-

rithmes classiques (par exemple, MSA) présentent de bonnes performances dans le réseau à petite échelle, mais ne fournissent pas une bonne solution dans le réseau à grande échelle. Le coût de calcul de l'algorithme MSA est prohibitif pour le réseau à grande échelle. Au contraire, l'un des algorithmes hybrides, Step size Probabilistic, fonctionnait plus rapidement dans le réseau à grande échelle. Le MSA Ranking est efficace pour les réseaux à petite et moyenne échelle, mais il ne peut pas donner de bons résultats pour le réseau à grande échelle. De plus, les résultats montrent que certains algorithmes tels que l'algorithme Gap-based et la méthode de projection sont dominés par d'autres algorithmes pour tous les scénarios.

Deuxièmement, cette étude montre que l'affectation initiale et la taille des étapes au début de la boucle externe ont un impact significatif sur la solution finale et la vitesse de convergence de l'algorithme. Une méthode alternative est proposée pour initialiser le modèle d'affectation au début de la boucle externe. Selon les résultats Table 2.1, la méthode Keep solution améliore les performances de tous les al-

gorithmes de permutation dans les travaux récents. Table 2.1 montre que la meilleure configuration de l'algorithme inclut la méthode Keep solution.

Troisièmement, cette étude propose deux nouvelles méthodes pour l'initialisation du pas. La taille de l'étape garantit la convergence de l'algorithme, elle a un impact direct sur la vitesse de convergence. Cependant, la taille des étapes ne peut pas garantir la qualité de la solution finale. Les deux nouvelles méthodes de taille de l'étape fournissent une meilleure solution avec une combinaison de formules de permutation différente de la méthode classique de la littérature. Les algorithmes basés sur MSA sont améliorés par la méthode Reset step size. En outre, la méthode Smart améliore l'algorithme basé sur la fonction de Gap et la méthode de projection. Les nouvelles méthodes de taille de l'étape accélèrent la convergence de tous les algorithmes, en particulier à grande échelle. Pour le chapitre suivant, nous cherchons des algorithmes métaheuristiques pour le problème DTA afin d'accélérer le processus d'optimisation avec le calcul parallèle.

TABLE 2.1 – Best algorithms and settings with respect to the network size and loading

| Network | Saturation level | Best algorithm | Initialization | | Step size methods | | | Ranking for | | Best compromise |
|-----------|------------------|----------------|----------------|------|-------------------|-------|-------|-------------|-------|-----------------|
| | | | AoN | Keep | Initial | Reset | Smart | Quality | Speed | |
| 5bys | US | MSAR | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 1 | 3 | ✓ |
| | | Prob. | | ✓ | | | | 1 | 2 | |
| | | PI | | ✓ | ✓ | | | 1 | 1 | |
| | S | MSA | | ✓ | | ✓ | | 2 | 1 | ✓ |
| | | Prob. | | ✓ | | | | 1 | 3 | |
| | | OS | MSA | | ✓ | | | 4 | 1 | |
| GBN | | ✓ | | | | 1 | 4 | | | |
| | BGB | | ✓ | | ✓ | | 1 | 6 | | |
| Ring city | US | MSAR | | ✓ | | ✓ | | 1 | 2 | ✓ |
| | | Prob. | | ✓ | | | | 1 | 3 | |
| | | GBP | | ✓ | | ✓ | | 1 | 1 | |
| | S | Prob. | | ✓ | | | | 1 | 1 | ✓ |
| | OS | MSAR | | ✓ | | ✓ | | 2 | 1 | ✓ |
| | | Prob. | | ✓ | | | | 1 | 5 | |
| Lyon 6V | US | Prob. | | ✓ | | | | 1 | 2 | ✓ |
| | | SSP | | ✓ | | ✓ | | 1 | 1 | |
| | S | Prob. | | ✓ | | | | 1 | 4 | ✓ |
| | | SSP | | ✓ | | | ✓ | 2 | 1 | |
| | OS | Prob. | | ✓ | | | | 9 | 1 | ✓ |
| | | IMSA | | ✓ | | | ✓ | 1 | 4 | |

Chapitre 3

NOUVEAU CADRE POUR LE CALCUL DE DTA

BASÉ sur le chapitre précédent, nous remarquons que la plupart des algorithmes existants sont basés sur des méthodes de direction de descente à permutation de chemin. Du point de vue du calcul, le principal inconvénient de ces méthodes est qu'elles ne peuvent pas être parallélisées. En effet, les algorithmes existants doivent connaître les résultats de la dernière itération pour déterminer le meilleur chemin pour la prochaine itération. Ainsi, leurs performances dépendent du choix d'une seule solution initiale et des solutions intermédiaires, ce qui signifie qu'elles exploitent la manière dont les solutions satisfont aux conditions d'équilibre. Mais ils n'explorent pas suffisamment l'espace de solutions pour trouver la solution optimale. Plus précisément, le but de ce chapitre est de surmonter les inconvénients des algorithmes sériels en utilisant des algorithmes métaheuristiques connus pour être parallélisables et qui n'ont jamais été appliqués au problème DTA basé sur la simulation.

Cette étude propose deux nouvelles méthodes : une nouvelle extension du recuit simulé (Simulated Annealing) et un algorithme génétique adapté. Avec la simulation parallèle, l'algorithme exécute davantage de simulations que les méthodes existantes, en plus, il explore mieux l'espace de la solution et obtient ainsi de meilleures solutions en matière de proximité de la solution optimale et de temps de calcul par rapport aux méthodes classiques.

*
* *

Ce chapitre a introduit une nouvelle branche d'algorithmes d'optimisation pour les modèles

DTA basés sur la simulation. Deux algorithmes métaheuristiques ont été appliqués pour résoudre le problème de l'équilibre du réseau. L'algorithme est composé de trois couches d'optimisation pour la recherche dans l'espace de solutions. L'algorithme commence en phase gazeuse et cherche dans l'espace des solutions réalisables sans limitations. Ensuite, la température est diminuée et l'espace de recherche est réduit, en passant de la phase gazeuse à la phase liquide, puis à la phase solide. Dans le cadre de GA, on ajoute une nouvelle couche dans le processus d'optimisation pour prendre en compte les corrélations entre les affectations ODs. De plus, GA considère un ensemble de solutions plutôt qu'une unique solution à chaque itération. Les deux algorithmes ont été mis en œuvre en utilisant le calcul parallèle pour calculer l'UE dans le modèle DTA. Les nouveaux algorithmes ont été appliqués sur le réseau réel à grande échelle de Lyon6e + Villeurbanne dans un modèle DTA basé sur des simulations pour une période de deux heures. Pour comparer la SA et la GA avec les méthodes existantes, nous avons considéré trois algorithmes dans la littérature : l'algorithme MSA, qui est l'un des algorithmes les plus courants implémentés dans le domaine de la DTA, et deux extensions récentes de l'algorithme MSA. Pour DTA basé sur la simulation, à savoir les algorithmes MSAR et Gap-based.

Les résultats montrent que les algorithmes métaheuristiques dominent les méthodes classiques. Ils fournissent une large couverture lors de l'exploration de l'espace de la solution. Par conséquent, ils trouvent une meilleure solution proche de la solution

optimale UE. Le SA a fourni la meilleure solution, qui était nettement meilleure que la solution obtenue par les méthodes classiques (MSAR). La simulation parallèle a aidé les algorithmes métaheuristiques à exécuter davantage de simulations que les algorithmes séquentiels et ont accéléré le processus d'exploration de plus de 37%, nous permettant d'obtenir les solutions environ trois jours à l'avance.

Les contributions de cette partie peuvent être résumées comme suit :

- ✓ Benchmark de repérage de la qualité et de la vitesse des algorithmes de résolution de la littérature pour différentes tailles de réseau et niveaux de saturation. La meilleure configuration de l'algorithme classique qui offre les meilleurs compromis entre qualité et temps de calcul pour toutes les tailles de réseau et tous les niveaux de saturation a été présentée.
- ✓ Identification des inconvénients des algorithmes dans le domaine des DTA basés sur la simulation. L'étude du cadre d'optimisation classique a montré que l'exploration de l'espace des solutions pour trouver l'équilibre est très limitée en raison du processus en série.
- ✓ Application de l'approche de la parallélisation au calcul de l'équilibre basé sur la simulation. Le cadre de simulation parallèle aide les algorithmes à exécuter davantage de simulations que les algorithmes séquentiels et amplifient le processus d'exploration.
- ✓ La combinaison entre (SA et GA) proposée pour la première fois; permet de résoudre des problèmes de DTA basés sur la simulation. Les résultats montrent que les algorithmes métaheuristiques dominent les méthodes classiques. Ils fournissent une large couverture lors de l'exploration de l'espace de la solution. Par conséquent, ils trouvent une meilleure solution proche de l'optimum.

Les recherches menées dans cette partie ont été axées sur l'algorithme permettant de trouver l'équilibre du réseau à grande échelle. Cependant,

comme nous avons la multimodalité dans des cas de test réels, il existe de multiples équilibres dans le système. Les outils fournis dans cette partie peuvent trouver l'un des équilibres. Par conséquent, une question est la suivante : étant donné qu'il existe probablement plusieurs équilibres, le résultat des modèles DTA représente-t-il l'équilibre effectif d'un réseau réel? Notez que nous considérons les problèmes de DTA au cours de la journée dans cette partie, alors que l'approche au jour le jour peut aider à identifier l'ensemble des équilibres. En outre, la conception du réseau peut être modifiée à long terme (par exemple, plusieurs nouvelles installations de transport sont ajoutées au système). La façon dont ce processus à long terme est mis en œuvre peut avoir un impact sur la solution d'équilibre à atteindre à la fin par l'équilibre à long terme. Ainsi, des axes de recherche plus approfondis doivent maintenant étudier (i) l'existence d'équilibres multiples et (ii) l'impact de l'évolution du réseau sur le résultat final qui représente l'État réel du réseau.

De plus, la plupart des études dans la littérature s'arrêtent après le calcul de la distribution du flux d'équilibre. Cependant, l'analyse des résultats des modèles DTA peut fournir des informations pratiques. Ainsi, la conception d'un cadre d'analyse de la solution d'équilibre et de proposition d'améliorations du système devrait également être incluse dans notre champ d'application. Toutes ces directions de recherche sont ensuite détaillées ci-dessous :

- Enquêter sur l'existence d'équilibres multiples dans la pratique.
- Évaluer l'impact des différentes configurations du réseau sur l'équilibre final dans le contexte multimodal.
- Étudier la distribution du flux dans le chemin d'équilibre afin de concevoir un cadre d'analyse de l'équilibre.
- Étudier la possibilité d'une application de stratégie de contrôle basée sur l'analyse d'équilibre afin d'améliorer les performances du système.

Deuxième partie

Application de la méthode DTA à de nouveaux problèmes de réseau

CETTE partie vise à utiliser l'outil d'optimisation précédemment mis au point pour étudier de nouveaux problèmes de réseau. L'analyse des propriétés des équilibres de réseau est l'objectif principal. Le but est d'identifier les opportunités d'amélioration des performances du système. Dans cette perspective, une attention particulière est accordée à la non-unicité des équilibres de réseau et aux différences entre les distributions de flux de chemin des différents équilibres.

Cette partie est divisée en deux études différentes. La première traite de l'unicité de l'équilibre des utilisateurs dans un véritable réseau multimodal à grande échelle. Afin d'étudier l'existence d'équilibres multiples, l'approche quotidienne est appliquée pour traiter le processus d'équilibrage. En particulier, nous recherchons des équilibres multiples lorsque nous avons plusieurs antécédents de conception de réseau. La deuxième étude examine l'impact de différents niveaux de demande sur des équilibres distincts (par exemple, l'équilibre des utilisateurs et l'optimum du système). L'idée est d'analyser les distributions de flux de chemins relatifs à différents équilibres et de trouver des situations dans lesquelles des stratégies de contrôle peuvent être efficaces. À cette fin, la stratégie d'interdiction de la route est appliquée à un cas réel.

Dans les deux études de cette partie, les idées sont d'abord introduites dans un contexte statique et évaluées analytiquement. L'étude est ensuite étendue à un contexte dynamique afin de traiter le cas réel.

Chapitre 4

IMPACT DE L'ÉVOLUTION DE CONCEPTION DU RÉSEAU SUR L'UE MULTIMODAL

LE chargement dynamique du réseau de transport multimodal conduit à de multiples solutions pour assurer l'équilibre de l'utilisateur car la fonction de "temps de parcours" de lien n'est plus strictement monotone. La conséquence immédiate est que la solution finale dépend non seulement de l'état initial, mais également du processus de convergence. Ce chapitre se concentre sur le deuxième aspect lorsqu'on envisage un processus d'apprentissage quotidien à long terme. En particulier, il examine l'évolution de la conception du réseau, c'est-à-dire son évolution à long terme, y compris l'ouverture de nouvelles options multimodales et ses impacts sur l'équilibre final du réseau. Premièrement, l'analyse se concentre sur le chargement de réseau statique avec différentes configurations successives. Cette structure permet des dérivations analytiques, soulignant le problème. Ensuite, un réglage plus réaliste est étudié en simulation. Un réseau multimodal à grande échelle avec l'ouverture flexible dans le temps de trois installations de transport possibles est étudié pour évaluer le caractère unique de l'équilibre final.

*
* *

Dans ce chapitre, nous avons examiné les effets de l'évolution de la conception du réseau sur l'UE multimodal au quotidien. En règle générale, dans les réseaux de transport urbains multimodal, la condition de monotonie n'est tout simplement pas valable. Nous avons mis en évidence la source

d'équilibre multiple dans les systèmes de réseaux de trafic. Ensuite, nous avons étudié une raison particulière pour les équilibres multiples : l'évolution de la conception du réseau. Lorsque plusieurs installations sont progressivement introduites dans le système à des moments différents, le processus d'apprentissage est soumis à plusieurs étapes. Lorsque les utilisateurs ont le temps de s'adapter à ses différentes étapes, le processus de convergence globale est modifié et le système peut être amené à faire face à de multiples situations tout en maintenant le paramètre de réseau final. En se basant sur le contexte statique et dynamique, nous avons démontré que l'ordre dans lequel de telles facilités sont introduites successivement est important lors de la détermination de l'équilibre final. Cette constatation est cruciale car cela signifie que l'étude de la situation actuelle du réseau risque de ne pas être suffisante pour saisir la répartition réelle des utilisateurs à l'intérieur du réseau et qu'il est nécessaire de prendre en compte l'évolution du réseau. En d'autres termes, un calcul d'UE unique avec le réglage de réseau actuel peut conduire à un équilibre autre que celui-ci résultant des différentes étapes correspondant à l'évolution du réseau.

Les simulations dynamiques ont également permis de constater que certains équilibres finaux étaient plus efficaces du point de vue des systèmes que d'autres. L'auto-organisation du système a conduit à différentes performances du réseau en fonction de

l'évolution du réseau. Les résultats ont montré que non seulement nous avons la non-unicité, mais que la durée totale du trajet peut être économisée et que d'autres indicateurs de performance du réseau sont optimisés en ouvrant les installations de transport en commun dans un ordre spécifique. Par conséquent, la courbe d'apprentissage est importante dans un modèle de DTA quotidien, lorsqu'il n'y a pas d'unicité.

Chapitre 5

ANALYSE EQUILIBRIA : AMÉLIORER DES PERFORMANCES DU RÉSEAU DE TRAFIC

LE but de ce chapitre est de comparer les chargements de réseau liés à différents équilibres de réseau par un cadre basé sur la simulation. La comparaison directe des flux de chemin où des modèles de trajectoire sont difficiles à réaliser. Nous proposons donc ici une approche plus agrégée basée sur la comparaison des points de rupture au niveau de la demande. Un Breakpoint est une valeur de seuil de demande entraînant des changements importants dans la charge du flux de chemins. Plus précisément, nous définissons dans ce chapitre un Breakpoint à la demande lorsque la liste des itinéraires de remplacement efficaces diffère d'au moins un chemin. C'est par exemple le cas lorsqu'un itinéraire n'est plus pris en compte pour un équilibre alors qu'il est utilisé par certains véhicules du second. Nous allons étudier le chargement réseau statique et dynamique tout en analysant tous les niveaux de demande pour identifier les points d'arrêt. Nous nous concentrons sur la formulation et les choix de la demande discrète et utilisons un simulateur de trafic basé sur le trajet.

Tout d'abord, nous étudions les points de rupture sur un réseau connu (Braess) dans le cas statique afin de mieux définir ce concept. Deuxièmement, les points d'arrêt sont étudiés sur un réseau réel (Lyon, France) où les temps de parcours dynamiques sont fournis par un simulateur de trafic microscopique. Lorsque les points d'arrêt sont obtenus pour un scénario donné, nous nous concentrons sur l'identification de plages de niveau de demande dans lesquelles certains chemins ne sont pas utilisés dans SO, mais ils sont parcourus dans UE ou BRUE. Suivant le

concept du paradoxe de Braess, cela permet de concevoir des stratégies d'interdiction à certains emplacements clés du réseau afin d'empêcher l'utilisation de certaines alternatives et d'améliorer ainsi les performances du système. Nous montrons par simulation qu'une telle stratégie est efficace, ce qui démontre l'importance de l'identification des points d'arrêt.

*
* *

Ce chapitre a étudié l'impact de différents niveaux de demande sur trois équilibres (équilibre utilisateur, système optimal et équilibre utilisateur rationnel à la frontière). Il définissait un Breakpoint comme un niveau de demande où nous observons un changement dans l'ensemble de chemins actifs d'un équilibre. Cette étude a tenté de trouver les points d'arrêt et d'étudier la possibilité d'utiliser les informations relatives aux points d'arrêt pour passer d'un équilibre (UE / BRUE) à un autre (SO). Dans le cas statique, nous avons d'abord introduit le processus de détection de Breakpoint, puis démontré l'identification de la situation dans laquelle nous pouvons améliorer les performances du réseau en utilisant la stratégie d'interdiction dans le contexte du paradoxe de Braess. Pour le cas dynamique, cette étude a proposé une nouvelle approche pour analyser l'équilibre DTA du réseau en fonction du niveau de la demande. Les implications potentielles de cette approche pour les fournisseurs de réseau concernent l'analyse de l'état du réseau et la conception de stratégies d'interdiction pour passer d'une situation initiale d'UE ou de BRUE à une SO.

Les expériences numériques ont été menées

sur un réseau de sous-zones réelles dynamiques dans Lyon 6 afin d'examiner les schémas d'équilibre à différents niveaux de demande. Nous avons considéré l'équilibre complet du réseau et analysé le schéma lorsque la demande d'un ou deux couples origine-destination est modifiée. Deux stratégies de contrôle sont appliquées en fonction de la détection de points de rupture afin d'évaluer leur impact. Les résultats ont montré que dans le cas dynamique, la stratégie d'interdiction est efficace et que nous devrions l'appliquer à la bonne gamme de demandes. La stratégie d'équilibre mixte est conçue afin de considérer une deuxième référence pour concevoir la stratégie d'interdiction. Les résultats ont montré que les deux références pourraient aider le processus de conception et que la stratégie d'interdiction améliore les performances du réseau. Enfin, nous avons effectué une analyse de sensibilité sur l'efficacité de l'interdiction d'un chemin potentiel pour différents niveaux de demande de deux paires OD. Les résultats montrent que l'analyse des points de rupture est un outil puissant pour détecter les plages de demande dans lesquelles la stratégie d'interdiction est efficace. Notez que les expériences de ce chapitre

ont été réalisées avec des utilisateurs homogènes. L'approche présentée dans ce chapitre peut être appliquée à des utilisateurs hétérogènes et prendre en compte le profil de chaque utilisateur, ce qui permet de considérer le BRUE sous la forme stable.

Les expériences numériques ont montré que l'approximation du coût marginal et l'estimation de la solution de SO donnent une stratégie de contrôle basée sur les points de rupture qui améliorent l'équilibre du réseau. Il est donc possible d'obtenir un meilleur temps total de trajet en améliorant l'approximation de SO. Ainsi, il sera également possible d'étudier si ce que nous observons ici dans cette section (stratégie d'interdiction temps de trajet total inférieur au temps de trajet total SO) est causé par une solution non optimale ou lié à des effets de réseau (par exemple, corrélations des effets entre plusieurs paires OD). Enfin, les résultats de ce chapitre montrent l'existence des points de rupture, ce qui est à attendre de l'analyse de cas statique mais n'a pas encore été analysé dans le cas dynamique. Ils montrent également l'efficacité de la stratégie d'interdiction, fondée notamment sur une discipline d'équilibre mixte au niveau approprié de la demande.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONTRIBUTIONS À NOS PREMIÈRES QUESTIONS DE RECHERCHE

Selon la liste des questions de recherche présentée dans Chapitre 1, nos principales contributions sont répertoriées ci-dessous (dans le même ordre) :

- Le benchmark complet de tous les algorithmes a été effectué pour différentes tailles de réseau et niveaux de saturation dans chapitre 2. La performance des algorithmes est évaluée en fonction de la qualité des solutions et des temps de calcul. Plusieurs améliorations ont été proposées pour accélérer la convergence. Toutes les extensions réduisent considérablement le nombre d'itérations pour obtenir un bon taux de convergence et accélèrent considérablement les simulations globales. Les résultats montrent également que les performances des différents composants de l'algorithme sont sensibles à la taille et à la saturation du réseau. Enfin, les meilleures configurations des algorithmes ont été identifiées pour toutes les tailles de réseau, en mettant sur la plus grande échelle.
- À propos de la conception d'une nouvelle génération de méthodes de solution, chapitre 3 a tout d'abord mis en évidence les inconvénients des algorithmes existant pour les modèles DTA. Deuxièmement, pour la première fois, des approches métaheuristiques parallélisées ont été appliquées pour résoudre le problème de l'équilibre du réseau. Deux nouvelles méthodes ont été proposées : une extension du recuit simulé (Simulated Annealing) et un algorithme génétique adapté. Avec la simulation parallèle, l'algorithme exécute davantage de simulations que les méthodes existantes, mais il explore mieux l'espace de la solution et obtient ainsi de meilleures solutions en matière de proximité de la solution optimale et de temps de calcul par rapport aux méthodes classiques. Les résultats ont montré que les algorithmes métaheuristiques dominaient les méthodes classiques.
- Dans chapter 4, l'hypothèse d'unicité des modèles DTA a été discutée pour la première fois. Deuxièmement, l'assouplissement de cette hypothèse avec la multimodalité sur la dynamique du trafic a été étudié. Plusieurs solutions sont d'abord analysées analytiquement dans le cas de test statique, puis analysées dans un cas de test réel par un processus d'apprentissage quotidien à long terme. Les résultats ont montré que non seulement la non-unicité existe, mais que le temps de trajet total peut être économisé, ainsi que d'autres indicateurs de performance du réseau peuvent être optimisés en passant d'une solution à une autre.
- Chapitre 4 a étudié l'évolution de la conception du réseau dans le contexte multimodal quotidien, où les équilibres sont multiples. Lorsque plusieurs installations sont progressivement introduites dans le système à des moments différents, le processus d'apprentissage est soumis à plusieurs étapes. Lorsque les utilisateurs ont le temps de s'adapter à ses différentes étapes, le processus de convergence globale est modifié et le système peut être amené à faire face à de multiples situations tout en maintenant la configuration de réseau final. Sur la base de paramètres statiques et dynamiques, il a été démontré que l'ordre dans lequel de telles installations sont introduites successive-

ment est important lors de la détermination de l'équilibre final. Il s'agit là d'une découverte cruciale, ce qui signifie que l'étude de la situation actuelle du réseau risque de ne pas être suffisante pour saisir la répartition réelle des utilisateurs au sein du réseau et qu'il est nécessaire de prendre en compte l'évolution du réseau. En d'autres termes, un calcul d'UE unique avec la configuration de réseau actuelle peut conduire à un équilibre autre que celui-ci résultant des différentes étapes correspondant à l'évolution du réseau.

- L'analyse de la solution des trois conditions d'équilibre courantes : l'équilibre utilisateur (UE), l'optimum du système (SO) et l'équilibre utilisateur rationnel à la frontière (BRUE) ont été effectués dans chapitre 5 en tenant compte de l'affectation statique et dynamique du trafic. Ici, la nouveauté de notre approche d'analyse des solutions d'équilibre réside dans l'introduction du nouveau concept : point de rupture au niveau de la demande. Un Breakpoint est le niveau de la demande où nous observons un changement dans le chemin actif d'un équilibre. Cette étude a été utilisée dans le cadre de cette étude pour identifier la situation dans laquelle il serait possible d'améliorer les performances du réseau. Suivant le concept du paradoxe de Braess, la détection des points de rupture a permis de concevoir des stratégies d'interdiction à certains emplacements clés du réseau afin d'empêcher l'utilisation de certaines alternatives et d'améliorer ainsi les performances du système. La simulation dynamique sur un cas de test réel a montré l'efficacité d'une telle stratégie, ce qui a démontré l'importance de l'identification des points de rupture. Les implications potentielles de cette approche pour les fournisseurs de réseau concernent l'analyse de l'état du réseau et la conception de stratégies d'interdiction afin de passer d'une situation initiale d'UE ou de BRUE à SO.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Dans la partie suivante, nous proposons des recommandations pour des recherches futures :

- Tout d'abord, cette étude n'achève pas d'améliorer les algorithmes existant dans la littérature pour le calcul de l'équilibre et il reste encore beaucoup à faire. Par exemple, la conception du cadre permettant d'estimer le temps de calcul en fonction de la

taille du réseau, de la topologie et du niveau de saturation peut constituer un sujet intéressant.

- En plus d'améliorer le calcul du flux de chemins, il est également essentiel d'identifier la composante du problème qui a le plus d'impact sur le temps de calcul et la qualité du résultat final pour différents algorithmes. Par conséquent, tester la performance des algorithmes sur des modèles plus détaillés. Par exemple, les modèles basés sur l'activité peuvent être utiles.
- D'autres études comparatives devraient définitivement être menées afin de valider et d'approfondir les approches métaheuristiques que nous avons présentées. En effet, bien que nous ayons essayé de les garder assez généraux, les tests que nous avons effectués présentaient un problème majeur : nous avons appliqué l'algorithme à des modèles de congestion spécifique sur le réseau à grande échelle. Par conséquent, il est recommandé de tester l'algorithme sur d'autres réseaux avec différents profils de chargement.
- Cette étude a introduit une nouvelle branche d'algorithmes d'optimisation pour les modèles DTA basés sur la simulation. Par conséquent, la conception d'autres types d'algorithmes métaheuristiques est sans aucun doute une piste de recherche très prometteuse, pour tenter de surmonter la problématique de la dimensionnalité liée aux problèmes de DTA à grande échelle.
- En ce qui concerne la résolution de problèmes de points fixes et d'inégalités variationnelles, il existe encore de nombreuses méthodes de résolution dans le domaine de la théorie des jeux et de la recherche opérationnelle pouvant être appliquées aux problèmes DTA.
- Ici, nous avons introduit le premier framework de calcul parallèle pour résoudre le problème DTA. Il est également intéressant d'étudier d'autres algorithmes ou plates-formes informatiques parallèles et distribuées efficaces afin d'améliorer le temps de calcul des problèmes à grande échelle.
- Il est également utile d'examiner d'autres méthodes permettant de réduire la durée de fonctionnement. Par exemple, développer des modèles de substitution efficaces pour les modèles de simulation DTA à grande échelle.
- L'application de variantes hybrides ou multi objectifs de ces métaheuristiques pour résoudre les problèmes de DTA basés sur la simulation

avec des considérations environnementales peut également être intéressante pour des futures recherches.

- Comme cela est prouvé mathématiquement dans la littérature et montré à grande échelle par cette étude, la non-unicité et l'existence d'équilibres multiples avec des caractéristiques différentes sont dans la nature des modèles de trafic urbain. L'une des pistes de recherche pour les travaux futurs peut être la construction d'un modèle de prévision des équilibres pour estimer les multiples équilibres possibles du système et des stratégies de contrôle pour passer d'un équilibre à l'autre.
- Une autre direction de la recherche envisage un équilibre multi objectif ou un équilibre différentiel équilibré, qui constitue un problème épineux dans les modèles de DTA jour à jour multimodaux. Le modèle est plus proche du monde réel, mais il est aussi plus complexe et de nouvelles sources de non-unicité peuvent être corrélées avec d'autres composants du système.
- Comme mentionné précédemment, la plupart des études dans le champ DTA sont arrêtées après le calcul de la solution DTA. Ici, nous avons analysé la distribution de flux de chemin d'équilibre, nous avons trouvé des situations dans lesquelles nous pouvons améliorer les performances du système par des stratégies de contrôle. Nous pensons qu'il reste encore beaucoup à faire pour mieux identifier ces situations en introduisant des méthodes systématiques.
- Dans cette thèse, nous avons essayé d'explorer comment analyser et utiliser les résultats des modèles DTA. Chercher l'impact de l'initialisation sur le calcul de l'équilibre pour différents niveaux de demande, appliquer le processus d'analyse des points de rupture à plus de deux paires origine-destination, examiner les corrélations entre les chemins et tester d'autres stratégies de contrôle avec point de rupture constitue des sujets intéressants pour l'extension de notre étude.