
Perpectives de régulation pour encourager les synergies entre les transports en commun et la mobilité autonome à la demande

RÉSUMÉ ÉTENDU

Thèse de doctorat par:

Mélanie CORTINA

Avec l'école doctorale MEGA (ED 162) spécialité Génie Civil.
Soutenue publiquement le 06/11/2023 devant le jury composé de:

Hervé RIVANO	Professeur (INSA Lyon)	Président
Eleni VLAHOIANNI	Professeure (National Technical University of Athens)	Rapporteure
Oded CATS	Professeur (Delft University of Technology)	Rapporteur
Virginie LURKIN	Professeure assistante (Université de Lausanne)	Examinatrice
Lampros YFANTIS	Ingénieur (Aimsun)	Examineur
Ludovic LECLERCQ	Professeur (ENTPE)	Examineur
Nicolas CHIABAUT	Ingénieur ITPE HDR (Département de la Haute Savoie)	Directeur de thèse

Thèse de doctorat de l'ENTPE, membre de l'Université de Lyon, préparée au laboratoire LICIT-ECO7.

PARTIE I: Exploiter les synergies entre transports en commun et mobilité autonome à la demande: pourquoi et comment?

Chapter 1: Introduction générale

Avec l'urbanisation toujours en cours [1], les défis associés à la mobilité des personnes en ville s'accroissent et appellent à développer des systèmes de transport et adopter des pratiques plus durables. La mobilité partagée est une réponse possible à ces enjeux environnementaux. Elle remet en cause le modèle hégémonique de la voiture personnelle en cherchant à diminuer le nombre de véhicules en circulation grâce au partage séquentiel ou simultané d'un véhicule [2]. Cependant, certaines limitations lui font obstacle, telles que les déséquilibres inhérents aux motifs de mobilité urbains, la complexité de la gestion optimale de flotte en présence d'une demande et d'une offre incertaines, ou encore le coût important des trajets à la demande. Les avancées technologiques récentes en matière de conduite autonome laissent envisager des services de mobilité à la demande basés sur les véhicules autonomes, ce que nous appelons dans cette thèse la Mobilité Autonome à la Demande (MAD).

Si la MAD pourrait permettre de surmonter les limitations citées plus haut, d'autres risques apparaissent, notamment l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus en raison des relocalisations à vide, et la génération d'une demande induite importante. En fait, la MAD n'est pertinente que lorsqu'elle fonctionne en synergie avec les transports en commun (TC), plus efficaces pour dégager des économies d'échelle. Dans le cadre d'une MAD privée, à l'image des services de mobilité à la demande existant tels que *Uber*, la coopération avec les TC n'est pas garantie. Plusieurs études ont montré leur effet négatif sur la fréquentation des TC [3, 4]: -1.9% à -3.4% par an sur la fréquentation des bus avec un effet plus accentué sur la fréquentation des métros et train urbains dans les métropoles de taille moyenne par rapport aux grandes agglomérations selon [5]. Les prises de décision opérationnelles des usagers (choix de mode et d'itinéraire) et du gestionnaire de service (dispatch et affectation des véhicules) sont généralement motivés par des objectifs qui leur sont propres (maximisation de l'utilité et du profit) et non par l'aspect environnemental. Dans le cas de la MAD, les véhicules autonomes (VA) se conforment aux instructions du gestionnaire contrairement aux chauffeurs, ce qui risque d'accroître les comportements égoïstes contradictoires avec l'optimum collectif. Ainsi, la question de la régulation de la MAD se pose.

Cette thèse est donc motivée par la question suivante : comment réguler de manière optimale la MAD pour favoriser sa coopération avec les TC ? Cette problématique est étudiée dans deux cas d'études distincts, un couloir de mobilité et une aire métropolitaine, à l'aide de deux approches distinctes. Sur chacun de ces cas, le travail répond à trois objectifs. Premièrement, il s'agit de rendre compte des bénéfices de la complétion des TC par la MAD en termes d'efficacité du système (temps de parcours, coût de trajet, individuels et cumulés), d'indicateurs environnementaux (part de la mobilité collective dans les déplacements, émissions carbone), et d'équité. Deuxièmement, nous cherchons à mettre en évidence les circonstances au cours desquelles MAD et TC coopèrent ou sont en compétition et de décrire les motifs de mobilité correspondant. Enfin, il s'agit de

proposer des politiques de régulation optimales, capables d’exploiter le plein potentiel de la MAD intermodale.

Ce travail de thèse présente trois types de contribution. Le premier consiste à tester des politiques de régulation dédiées à la MAD relativement peu étudiées dans la littérature, notamment avec une approche en optimisation et avec les fonctions objectif qui nous occupent. Dans le cas du couloir de mobilité, nous étudions la désagrégation de la MAD en plusieurs flottes opérant dans des zones de couverture bien distinctes. Dans le cas de l’aire métropolitaine, nous explorons plusieurs combinaisons de taxes et subventions adressées aux voyageurs et aux VA.

Le second consiste à proposer de nouvelles approches et à retravailler certaines briques de modélisation permettant d’étudier les interactions entre la MAD et les TC. Nous proposons un modèle simple et efficace pour le calcul de l’équilibre usager dynamique dans le cas du couloir de mobilité. Dans le cas de l’aire métropolitaine, nous proposons et étudions en détails plusieurs stratégies opérationnelles de dispatch des véhicules autonomes rendant compte de l’objectif de l’opérateur de la MAD, tourné vers la maximisation de son profit.

Enfin, la dernière contribution est l’intégration des différentes briques de modélisation proposées dans une approche en simulation qui se rapproche d’une méthodologie exhaustive, prenant à la fois en compte une intermodalité flexible, la dynamique du trafic, les contraintes opérationnelles de la MAD et le couplage entre la demande et l’offre tout en restant compatible avec l’optimisation de la régulation.

PARTIE II: Design d’une ligne de transport en commun et régulation de la mobilité autonome à la demande dans un couloir de mobilité

Cette partie introduit la modélisation du couloir de mobilité, la méthode de résolution de l’équilibre usager dans le système, et applique une méthode de résolution heuristique au problème conjoint de design optimal de la ligne de TC et de régulation optimale de la MAD.

Chapter 2: Modélisation de la mobilité autonome à la demand intermodale dans un couloir

Une approche idéale pour étudier les interactions entre la MAD et les TC devrait prendre en compte la dynamique du système y compris la congestion, la présence de plusieurs offres de transport dont les options intermodales dans le choix de mode et d’itinéraire des voyageurs, et les limites opérationnelles de la MAD. Les approches en optimisation proposées dans la littérature peinent à inclure l’ensemble de ces points et se limitent souvent à une modélisation statique du système, une prise en compte du trafic de manière exogène, un nombre restreint de modes de transport à disposition des usagers, un modèle de choix absent (demande prédéfinie) ou borné au seul mode ou au seul itinéraire. Les études en simulation sont plus à même d’être exhaustives sur ces points mais peu parviennent coupler la simulation avec l’optimisation, se contentant d’évaluer un petit nombre

de scénarios de régulation [6]. Un élément particulièrement critique est la résolution de l'équilibre usager dynamique, qui requiert l'usage de méthodes itératives coûteuses en temps de calcul. Nous avons relevé dans la littérature seulement deux études couplant simulation sous équilibre usager et optimisation du design des TC et de la MAD [7, 8]. Si ces travaux sont d'une grande importance pour la question de recherche qui nous occupe, ils souffrent de l'effet boîte noire classique en simulation. Ils ne fournissent pas de compréhension fine sur comment le design des TC et de la MAD impactent la manière dont l'équilibre du système s'établit et évolue.

Dans ce chapitre nous tâchons de surmonter cette limitation en proposant un modèle simple et dynamique pour la résolution de l'équilibre usager dans un couloir de mobilité où une ligne de TC et la MAD interagissent lors des heures de pointe du matin. En se limitant à ce cas d'étude restreint en termes de réseau et d'intermodalité, la formulation d'un modèle d'équilibre explicite est possible. Il permet de comprendre les liens entre design de la ligne de TC, régulation de la MAD, dynamique de congestion, et relation de coopération ou compétition entre les modes opérant dans le couloir.

La modélisation du couloir de mobilité s'appuie sur une structure de réseau générique, qui peut correspondre à de nombreuses aires urbaines. Elle s'articule autour d'une ligne de TC forte, de type métro ou train urbain, d'une autoroute ou boulevard disposant d'un goulot d'étranglement en aval pour accéder au centre-ville, et d'un réseau secondaire de type Manhattan non congestionné. Ces trois types d'infrastructures sont connectés via des collecteurs. Un collecteur correspond à une station de TC, une rampe d'accès et de sortie de l'autoroute : il s'agit d'un point d'accès et de transfert. Le transfert vers la ligne de TC depuis l'autoroute et le réseau local est caractérisé par une capacité témoignant du nombre limité de places de type dépose-minute devant la station. Considérant les heures de pointe du matin dans une aire urbaine mon centrée, le schéma de mobilité associé correspond à un *many-to-one*, i.e., les voyageurs partent d'une origine localisée le long du couloir et cherchent à rejoindre le centre-ville. Pour ce faire, ils disposent de trois modes : leur voiture personnelle de porte à porte, la marche à pied puis la ligne de TC, la MAD puis la ligne de TC. Cette dernière option comporte en fait plusieurs itinéraires possibles, selon le point de transfert choisi. La congestion est prise en compte par l'existence d'au plus un goulot d'étranglement par itinéraire. Le choix du mode et de l'itinéraire est basé sur les temps de parcours qui dépendent de la distribution des voyageurs sur les différentes alternatives. Le calcul de l'équilibre usager dans le système revient à résoudre un problème de point fixe.

Ce problème est plus ou moins difficile à résoudre, selon la force des hypothèses prises quant à la géométrie du couloir (linéaire ou rectangulaire), à la distribution des origines des voyageurs (au niveau des collecteurs ou réparties dans le couloir), et aux capacités opérationnelles de la MAD (temps de service fixe ou calculé de manière endogène). Ainsi, trois niveaux de modélisation en dynamique sont proposés dans ce chapitre.

Le modèle de couloir linéaire prend les hypothèses les plus fortes mais permet d'explicitier l'équilibre usager dynamique, dont l'unicité est assurée par les propriétés intéressantes de la modélisation (temps de parcours strictement ordonnés en conditions d'écoulement libre, activation progressive des goulots d'étranglement empêchant la comparaison entre eux d'itinéraires aux temps de parcours invariant lorsque les flux évoluent). En exprimant les temps de parcours sur les

différentes alternatives et en appliquant directement le premier principe de Wardrop sur les flux de voyageurs, le chapitre fournit les équations décrivant la dynamique du système, i.e., la distribution des voyageurs sur les itinéraires au cours du temps. En sus des équations décrivant finement l'écoulement, les concepts d'activation, de synchronisation et désynchronisation des goulots d'étranglement, et de motif de déviation sont introduits. Cette partie du chapitre étend le travail de [9] en passant du cas *one-to-one* au cas *many-to-one*.

Les deux modèles rectangulaires désagrègent les origines des voyageurs dans la longueur et l'épaisseur du couloir. Ils prennent en compte le temps d'accès aux infrastructures en définissant les aires d'attraction par véhicule et par marche à pied de chaque collecteur. Le modèle pseudo-dynamique conserve l'hypothèse d'un temps de service de la MAD fixe, ce qui permet de résoudre simplement et de manière exacte l'équilibre usager en procédant aux choix individuels de manière séquentielle dans l'ordre d'arrivée théorique en condition d'écoulement libre. Le modèle dynamique, relâche cette hypothèse et intègre le temps de service de la MAD de manière endogène. Il implique une boucle de convergence et une approximation du temps de service en fonction de la demande adressée à la MAD. La combinaison de la Méthode des Moyennes Successives (MMS) et de la résolution séquentielle de l'équilibre utilisée dans le modèle pseudo-dynamique permet de converger rapidement vers un profil de temps de service cohérent avec la distribution des voyageurs sur le réseau.

Enfin, le chapitre formule un modèle équivalent statique de façon à pouvoir comparer les résultats obtenus en dynamique. Ce dernier modèle est basé sur l'équilibrage des flux de voyageurs dans un graphe représentant le couloir multimodal où l'effet du trafic sur les temps de parcours est donné par une fonction de type *Bureau of Public Transport* (BPR). La résolution est faite à l'aide de la MMS.

Chapter 3: Résolution du problème conjoint de design de la ligne de transport en commun et de régulation de la mobilité autonome à la demande

Ce chapitre exploite les quatre modèles introduits précédemment. Les modèles statiques et dynamiques sont confrontés quant à leur aptitude à rendre compte de la sensibilité de l'équilibre au design de la ligne de transport en commun. Pour cela, nous menons une étude de sensibilité caractérisant l'impact du nombre de collecteurs dans le couloir sur les parts modales en volume et en distance en considérant une répartition homogène des collecteurs (i.e., une distance d'interstation constante) et des origines des voyageurs. Cette étude a mené à deux résultats intéressants. Premièrement, le modèle dynamique permet de capturer des schémas de coopération-compétition plus riches entre la ligne de TC et la MAD sur la plage de nombre de collecteurs étudiée. Le modèle statique prévoit deux schémas tandis que le modèle dynamique en prévoit trois : la coopération du TC et de la MAD face à la voiture personnelle pour un petit nombre de collecteurs, la concurrence entre le TC et la MAD en faveur du TC pour un nombre moyen de collecteur, et la concurrence entre le TC et la MAD en faveur de la MAD pour un plus grand nombre de collecteurs. Deuxièmement, l'analyse de l'évolution des parts modales en distance précise ces résultats. Deux

schémas de mobilité extrêmes émergent de la réalisation des choix individuels. Le premier kilomètre direct survient pour un nombre réduit de collecteurs et correspond à des synergies positives entre TC et MAD : les usagers utilisent les VA pour rejoindre le collecteur le plus proche, ce qui améliore l’accessibilité de la ligne de TC et permet de dérober des parts modales aux voitures personnelles. Le long premier kilomètre a lieu pour un nombre plus important de collecteurs et correspond à une relation de compétition entre TC et MAD : les usagers utilisent les VA pour rejoindre le collecteur non congestionné le plus en aval possible et la partie du trajet réalisée en VA est plus longue que de raison.

Les modèles pseudo-dynamique et dynamique sont également confrontés dans ce chapitre. Alors que les principes d’équilibrage présentés au chapitre précédent pour le modèle de couloir linéaire (motifs de déviation, synchronisation et désynchronisation des points de congestion) peuvent directement être déclinés pour le modèle pseudo-dynamique, leur stricte application au modèle dynamique n’est pas possible. Ainsi, nous analysons l’impact du design sur la coopération ou compétition entre le TC et la MAD en lien avec ces principes d’équilibrage pour le modèle pseudo-dynamique puis nous comparons les parts modales et distributions de voyageurs obtenues avec les deux modèles. Si les frontières entre les schémas de coopération/compétition sont différentes, les mêmes schémas ressortent. Le premier kilomètre direct est plus prononcé lorsque le temps de service de la MAD est supposé fixe alors que le long premier kilomètre est moins marqué.

Au regard de ces analyses, le modèle dynamique, le plus abouti des quatre, est couplé avec une méthode d’optimisation heuristique (algorithme génétique et recherche exhaustive) pour résoudre le problème d’optimisation du design de la ligne de TC et de la MAD. Si plusieurs ensemble de variables de décision ont été étudiées dans la littérature pertinente [10], nous nous concentrons ici sur un ensemble inédit. Cet ensemble mélange deux variables de décisions classiques côté design de la ligne de TC (nombre de collecteurs et leur localisation), avec deux variables de décisions originales côté régulation de la MAD (nombre de flottes et frontières de leurs zones de couvertures respectives). Au-delà d’un simple problème d’optimisation, nous introduisons 8 scénarios distincts pour répondre aux questions de recherche formulées dans le premier chapitre. Ces scénarios correspondent à trois objectifs prioritaires pour les pouvoirs publics (maximiser l’usage de la ligne de TC, minimiser le temps de parcours moyen, minimiser l’usage de la voiture personnelle) et à trois positionnements possibles quant au déploiement de la MAD dans le couloir : le protectionnisme (non attribution des licences aux VA), opportunisme (attribution des licences par flotte avec une zone de couverture limitée pour chacune), et libéralisme (attribution des licences sans condition). Les trois positionnements correspondent au scénario de référence sans MAD où le design de la ligne de TC est optimisée de manière unilatérale, au scénario avec MAD régulé où les designs de la ligne de TC et de la MAD sont optimisés conjointement, et au scénario avec MAD non régulé où le design de la ligne de TC est d’abord optimisé unilatéralement, puis le design de la MAD est optimisé de sorte à maximiser l’usage des VA. Cela correspond à une situation de compétition.

La partie ouest de la ville de Lyon a été retenue comme territoire pertinent pour l’application de ce cadre méthodologique. En effet, l’autoroute A6 relie plusieurs villes de banlieue au centre-ville de Lyon où le tunnel de Fourvière agit comme un goulot d’étranglement causant des embouteillages

quotidiennement. La ligne de tram-train y est sous-fréquentée à cause de sa faible fréquence et de l'absence de mode d'accès pratique menant à une part modale de la voiture de 64% contre 31% pour les TC.

Les résultats obtenus montrent bien l'intérêt de la régulation dans un tel couloir de mobilité. L'opportunisme fournit les meilleurs résultats quelque soit l'objectif des pouvoirs publics. Quand il s'agit de maximiser l'usage de la ligne de TC, le design conjoint du TC et de la MAD permet d'augmenter la part modales TC en distance de 6% par rapport au protectionnisme. Le libéralisme n'est pas recommandé car il mène à une diminution de cette même part modale de 26%. La stratégie de régulation opportuniste consiste à segmenter la MAD le long du couloir de sorte à avoir une flotte opérant sur le bassin d'attraction en véhicule de chaque collecteur. Ce design force le premier kilomètre direct. Quand il s'agit d'améliorer les temps de parcours dans le couloir, l'opportunisme et le libéralisme fournissent des résultats similaires avec une diminution de l'ordre de 46% du temps de parcours moyen : la compétition n'est pas contre-indiquée dans une optique d'amélioration des performances uniquement. De plus, elle mène à de meilleurs indicateurs d'égalité des voyageurs face aux retards (temps de service et temps d'attente aux points de congestion).

PARTIE III: Design d'un schéma de tarification dans une agglomération

Cette partie introduit la stratégie opérationnelle de la MAD utilisée dans le cas de l'aire urbaine et analyse finement son domaine de pertinence. Elle présente un cadre méthodologique basé sur la simulation intégrant cette stratégie et traitant de l'optimisation multi-objectifs du design d'un schéma de tarification exploitant les synergies entre TC et MAD.

Chapter 4: Spécification et analyse d'une stratégie opérationnelle pour la mobilité autonome à la demande

Dans cette thèse, on pose l'hypothèse que le gestionnaire de la MAD est un acteur privé motivé par la maximisation de son profit et qu'il n'a pas de logique économique long terme. La recherche du profit se fait à l'aide de variables de décision opérationnelles, i.e., grâce aux choix d'appariement des VA aux requêtes, d'itinéraires, et de relocalisations pour rééquilibrer l'offre en fonction de la demande. Ces choix guident les VA vers les requêtes les plus profitables, impactent le niveau de service de la MAD dans les différentes zones de l'agglomération, et donc les choix des usagers. Ainsi, il existe un lien étroit entre la stratégie opérationnelle de la MAD et les relations de coopération ou compétition entre MAD et TC. Ce chapitre s'attache donc à présenter, justifier et étudier en détail une stratégie opérationnelle adaptée.

Plusieurs approches sont possibles pour la gestion de flotte, mais toutes ne sont pas compatibles avec le cadre méthodologique choisi pour cette partie, i.e., l'approche en simulation et optimisation. Les approches de types problèmes de *dial-a-ride* [11, 12], les politiques centralisées ou décentralisées apprises [13] sont inadaptées de par leur inefficacité en termes de temps de calcul (apprentissage compris). Les stratégies heuristiques instantanées (basées sur événements) fournissent des solutions

trop éloignées de l’optimum. Ainsi, nous optons dans cette partie pour une stratégie de *batch-matching* sur horizon roulant.

La stratégie requiert en entrée un ensemble de requêtes caractérisées par une origine (ou point de prise en charge), une destination (ou point de dépôt), et une fenêtre temporelle spécifiant la date à partir de laquelle l’usager peut être pris en charge et la date à partir de laquelle la prise en charge n’est plus possible. Les choix d’appariement sont faits à partir de la résolution d’un problème linéaire en nombre entier (ILP) toutes les αH minutes. Ce problème d’optimisation cherche à maximiser la somme des utilités $u_{v,r}$ pour un appariement entre un VA v et une requête r . Deux définitions de l’utilité sont proposées. L’utilité *impatiente* correspond au profit associé au service de la requête r par le VA v réduit d’une pénalité pour la durée passée par v à attendre l’usager. L’utilité *productiviste* correspond au profit par unité de temps associé au service de la requête r par le VA v (relocalisation comprise). Deux modes d’appariement sont également proposés. Dans le mode *permanent*, tout appariement solution de l’ILP est définitif alors que dans le mode *temporaire*, l’appariement est définitif si la borne inférieure de la fenêtre temporelle de r est dans $[t, t + \alpha H]$, et temporaire sinon. Un appariement temporaire initie une relocalisation du VA visé, mais peut être interrompue au prochain tour d’appariement. Ces définitions d’utilité et ces modes d’appariement constituent quatre variantes de la stratégie de *batch-matching* sur horizon.

Ces quatre variantes ont leur propre sensibilité aux paramètres de *batch-matching* sur horizon, à savoir la longueur de l’horizon (H), la fréquence de résolution de l’ILP (liée à α), le nombre de requêtes maximal en dessous duquel un VA est pris en compte dans le tour d’appariement, et la taille de la flotte. Nous analysons finement ces sensibilités au regard de plusieurs indicateurs de niveau de service (taux de réponse aux requêtes dans les différentes zones de la ville, temps d’attente cumulé), d’efficacité de la stratégie (profit de la MAD), et d’équité (égalité des taux de réponses à travers les zones, lien avec l’accessibilité en TC dans la zone) tout en faisant le lien avec le temps de calcul, élément critique du déploiement la stratégie dans notre cadre méthodologique. Cette étude de sensibilité est menée dans une ville théorique similaire à celle étudiée dans le chapitre 5.

Les résultats révèlent qu’étendre l’horizon de 0 à 25 minutes permet d’augmenter le profit dégagé par le gestionnaire de la MAD, d’améliorer les taux de réponses pour les usagers et ce de manière assez égalitaire. En revanche, la stratégie *temporaire-impatiente* n’est pas pertinente car elle mène à un grand nombre d’interruption des relocalisations en cours. Sous utilité *impatiente*, les VA tendent à aller chercher la demande à l’extérieur du centre-ville ce qui diminue les inégalités spatiales. Sous utilité *productiviste* en revanche, les VA tendent à attendre passivement les requêtes dans le centre-ville et délaisser la périphérie. L’utilité *productiviste* permet d’atteindre un profit et un taux de réponse global plus élevés qu’avec une politique d’appariement instantanée basée sur des règles simples que la flotte soit sous ou surdimensionnée. Elle répond aux besoins du chapitre 5 à condition de choisir des paramètres de mise en œuvre pertinents. Les éléments présentés dans ce chapitre servent de base au développement du modèle de simulation pour l’optimisation du design de la politique de régulation de la MAD tarifaire.

Chapter 5: Résolution du problème de design optimal d'un schéma de tarification en multi-objectifs

Les taxes sont généralement efficaces pour orienter les comportements mais sont difficiles à faire accepter et peuvent poser des problèmes d'équité. Les subventions quant à elles sont susceptibles d'induire de la demande et de coûter beaucoup à la communauté. Ainsi, dans ce chapitre, nous étudions plusieurs ensembles de taxes et subventions appliquées aux voyageurs et aux VA pour exploiter les bénéfices de la MAD intermodale.

Nous adoptons une approche en simulation permettant de modéliser finement les comportements de chaque agent du système et de rendre compte des contraintes opérationnelles de la gestion de flotte et des interactions entre usagers et service de mobilité. La plateforme de simulation *Multimodal network Modeling and Simulation* (MnMS), développée par le LICIT-ECO7 et basée sur l'approche de modélisation du trafic macroscopique *trip-based MFD* est utilisée et enrichie pour répondre aux besoins propres de notre étude. Deux modules de simulation sont particulièrement impactés : (i) le module de choix de mode et d'itinéraire par les voyageurs, que nous enrichissons de fonctions de coût généralisés et d'une recherche d'option intermodale, (ii) le module gérant les services de mobilité que nous complétons avec un service de type MAD utilisant une version itérative de l'algorithme de *batch-matching* sur horizon introduit au chapitre précédent. L'utilité *productiviste* est retenue ici, ayant démontré les meilleurs résultats en termes de profit pour la MAD. Au lieu de calculer un équilibre usager comme dans la première partie, nous faisons le choix d'un système prédictif (i.e., avec horizon) et contraint (mise en place de fenêtres temporelles pour chaque requête dont la durée dépend des coûts sur les autres modes/itinéraires) pour garantir les performances de la simulation et sa compatibilité avec des méthodes d'optimisation.

La plupart des travaux en optimisation sur le design de politiques de régulation des services de mobilité à la demande se limitent à un seul objectif, éventuellement une somme pondérée de plusieurs termes non homogènes [14, 15]. En pratique, les pouvoirs publics ont rarement un nombre fixe de considérations avec un poids bien défini pour chacune. Comprendre la nature des relations entre les différents objectifs possibles est davantage pertinent car il permet aux pouvoirs publics d'explorer plusieurs politiques et de choisir le meilleur compromis en fonction du contexte. Ainsi, nous couplons la simulation MnMS avec une technique d'optimisation boîte noire multi-objectifs : l'optimisation Bayésienne multi-objectifs.

L'algorithme MOBOpt [16] nous permet de caractériser les relations entre plusieurs objectifs y compris ceux du régulateur, des usagers, et du gestionnaire de la MAD. L'étude est menée dans une ville théorique disposant d'un réseau multimodal avancé. Trois politiques de régulation sont comparées: (A) taxer les voyageurs utilisant un VA pour un trajet porte-à-porte et subventionner les usagers utilisant un VA en lien avec les TC pour minimiser les émissions carbone du système et s'approcher le plus possible d'un équilibre financier nul pour schéma de tarification, (B) taxer les voyageurs réalisant un trajet porte-à-porte en VA, les VA servant une requête porte-à-porte, subventionner les voyageurs et les VA dans le cadre de trajets en VA intermodaux pour minimiser les émissions carbone, s'approcher d'une balance monétaire nulle, minimiser le coût de transport global pour les usagers, et maximiser le profit du gestionnaire de la MAD, (C) taxer et subvention-

ner les voyageurs selon qu'ils utilisent les VA en porte-à-porte ou en intermodal et selon leur origine pour minimiser les émissions carbone, s'approcher d'une balance monétaire nulle, et maximiser l'acceptabilité de la régulation en minimisant un indicateur d'équité verticale proportionnelle. Sur chaque front de Pareto obtenu, une ou plusieurs régulations sont sélectionnées et confrontées au scénario non régulé.

Les résultats pour la politique de régulation A montrent qu'un schéma de tarification à l'équilibre financier peut générer la grande majorité des réductions d'émissions carbone du système : subventionner davantage ne génère que des gains marginaux et taxer davantage n'est pas pertinent. Les résultats pour la politique B montrent que la réduction des émissions est nécessairement en conflit avec la diminution du coût de transport global mais peut être compatible avec l'augmentation du profit du gestionnaire de la MAD. Enfin, les résultats pour la politique C montrent qu'il existe un intervalle pour lequel l'indicateur d'équité se maintient tandis que les émissions carbone diminuent. Toutes les stratégies relevées sur les fronts de Pareto des politiques A, B et C exploitent la coopération entre TC et MAD : les VA répondent à davantage de requêtes sur des distances plus courtes, mais voient leur kilométrage à vide augmenter, ce qui montre que la MAD est moins efficace pour répondre à ce genre de motif de mobilité par rapport à des motifs plus équilibrés. Les métros et les bus sont les TC récupérant le plus de part de marché grâce à cette coopération.

PARTIE IV: Conclusion

Chapter 6: Résumé des résultats et perspectives de recherche

Cette thèse aborde la question de la régulation de la MAD avec l'angle de l'intermodalité. Elle se concentre sur deux cas d'études adressant les heures de pointe du matin dans un couloir de mobilité et dans une agglomération. La régulation retenue dans le cas du couloir consiste à désagréger la MAD en plusieurs flottes de VA opérant sur des zones de couverture bornées. Dans le cas de l'agglomération, nous étudions plusieurs ensembles de prix (taxes et subventions) adressés aux voyageurs et aux VA pour influencer le motif de mobilité émergent et le comportement de l'unique flotte de VA. Trois étapes ont été nécessaires sur chacun de ces cas : la modélisation du cas, sa simulation, et l'optimisation de la régulation.

Dans le couloir, le réseau est tel que les flux passent tous par un petit nombre de goulots d'étranglement, engendrant des congestions importantes. Ainsi, la dynamique du système et le couplage entre offre et demande ont été adressés avec attention dans la modélisation du cas. La charge de calcul pour la simulation du cas étant réduite, y compris avec le modèle dynamique, l'utilisation d'une méta-heuristique de type évolutionnaire a permis d'optimiser les variables de décisions choisies dans un scénario témoin, un scénario de compétition entre TC et MAD, et un scénario de coopération forcée. Plusieurs conclusions résultent de ce travail :

- Quand le motif de mobilité du couloir est de type *many-to-one*, l'équilibre usager dynamique se complexifie par rapport au cas *one-to-one*. Les mêmes principes de déviations s'appliquent, mais à ceux-ci s'ajoutent des effets de synchronisation et désynchronisation des goulots

d'étranglement selon le profil spatio-temporel de la demande. Les effets de désynchronisation constituent un moyen de forcer la coopération entre la ligne de TC et la MAD.

- Le design du couloir (nombre et positionnement des collecteurs) influence largement la nature des relations entre MAD et TC. Lorsque l'inter-station est constante, un petit nombre de collecteurs favorise l'apparition d'un schéma de type premier kilomètre direct, alors qu'un grand nombre de collecteurs mène à un schéma de type long premier kilomètre qui est délétère pour le TC.
- Que ce soit pour maximiser l'usage de la ligne de TC, améliorer les temps de parcours, ou minimiser l'usage de la voiture, la régulation permet d'atteindre les meilleurs résultats par rapport au scénario témoin sans VA et à la compétition. La compétition est antagoniste à l'amélioration de l'attractivité de la ligne de TC, mais pas à l'amélioration des performances du système.
- Autoriser une flotte par zone d'attractivité d'une station de TC est la meilleure stratégie de régulation pour augmenter la part de mobilité collective.

Dans l'agglomération, le réseau est plus étendu, les alternatives sont plus nombreuses et moins bien définies, ce qui augmente la marge de manœuvre opérationnelle de la MAD. Ainsi, nous spécifions et analysons avec soin la stratégie opérationnelle de la flotte de VA. Nous enrichissons la plateforme de simulation MnMS de façon à rester proche de l'équilibre du système sans procédure de convergence. Nous formulons le problème de design du schéma de tarification comme une optimisation multi-objectifs et adoptons une méthode d'optimisation Bayésienne multi-objectifs pour le résoudre. Les principales conclusions de ce travail sont les suivantes :

- La stratégie de *batch-matching* sur horizon est plus efficace pour gérer la flotte de VA qu'une stratégie instantanée basée sur des règles. En revanche, le choix des paramètres tels que la longueur de l'horizon, la définition de l'utilité d'un appariement et la mode de gestion de l'horizon est crucial pour améliorer le profit dégagé par la MAD.
- Encourager les trajets en VA intermodaux et dissuader les trajets en VA porte-à-porte mène à la réalisation d'un motif de mobilité plus déséquilibré, ce qui nécessite davantage de relocalisations à vide. Plus de kilomètres à vide sont réalisés pour moins de kilomètres servis mais le profit de la MAD ne diminue pas forcément car plus de requêtes sont servies.
- Les gains maximaux atteignables en termes d'émissions carbone en conservant une balance monétaire nulle se situent autour de 30%. Séparer les prix en deux parties, celle adressée aux usagers et celle adressée aux VA aide à mieux flécher l'argent pour limiter les pertes de profit de la MAD et l'augmentation des coûts de trajets pour les usagers. Différencier les prix selon l'origine des voyageurs aide à mieux répartir les augmentations et diminutions de coûts pour les usagers, ce qui facilite l'acceptation de la régulation.

References

- [1] United Nations. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. Tech. rep. New York: United Nations: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019.
- [2] Susan Shaheen and Nelson Chan. “Mobility and the Sharing Economy: Potential to Facilitate the First- and Last-Mile Public Transit Connections”. In: *Built Environment* 42.4 (2016), pp. 573–588. ISSN: 0263-7960. DOI: 10.2148/benv.42.4.573. URL: <http://www.ingentaconnect.com/content/10.2148/benv.42.4.573>.
- [3] Lisa Rayle et al. “Just a better taxi? A survey-based comparison of taxis, transit, and ridesourcing services in San Francisco”. In: *Transport Policy* 45 (2016), pp. 168–178. ISSN: 0967070X. DOI: 10.1016/j.tranpol.2015.10.004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967070X15300627>.
- [4] Erik Nelson and Nicole Sadowsky. “Estimating the Impact of Ride-Hailing App Company Entry on Public Transportation Use in Major US Urban Areas”. In: *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy* 19.1 (2019). ISSN: 1935-1682. DOI: 10.1515/bejeap-2018-0151. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/bejeap-2018-0151/html>.
- [5] Gregory D. Erhardt et al. “Why has public transit ridership declined in the United States?” In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 161 (2022), pp. 68–87. ISSN: 0965-8564. DOI: 10.1016/j.tra.2022.04.006. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856422000945>.
- [6] Krishna Murthy Gurumurthy, Joshua Auld, and Kara Kockelman. “A system of shared autonomous vehicles for Chicago: Understanding the effects of geofencing the service”. In: *Journal of Transport and Land Use* 14.1 (2021), pp. 933–948. ISSN: 1938-7849. DOI: 10.5198/jtlu.2021.1926. URL: <https://www.jtlu.org/index.php/jtlu/article/view/1926>.
- [7] Helen K.R.F. Pinto et al. “Joint design of multimodal transit networks and shared autonomous mobility fleets”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 113 (2020), pp. 2–20. ISSN: 0968090X. DOI: 10.1016/j.trc.2019.06.010. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X18317728>.
- [8] Baichuan Mo et al. “Competition between shared autonomous vehicles and public transit: A case study in Singapore”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 127 (2021), p. 103058. ISSN: 0968090X. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103058. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X21000863>.
- [9] J. A. Laval. “Graphical solution and continuum approximation for the single destination dynamic user equilibrium problem”. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 43.1 (2009), pp. 108–118. ISSN: 01912615. DOI: 10.1016/j.trb.2008.05.009. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261508000684>.

- [10] Yining Liu and Yanfeng Ouyang. “Mobility service design via joint optimization of transit networks and demand-responsive services”. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 151 (2021), pp. 22–41. ISSN: 01912615. DOI: 10.1016/j.trb.2021.06.005. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261521001168>.
- [11] Jean-François Cordeau and Gilbert Laporte. “The dial-a-ride problem: models and algorithms”. In: *Annals of Operations Research* 153.1 (2007), pp. 29–46. ISSN: 0254-5330, 1572-9338. DOI: 10.1007/s10479-007-0170-8. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10479-007-0170-8>.
- [12] Sin C. Ho et al. “A survey of dial-a-ride problems: Literature review and recent developments”. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 111 (2018), pp. 395–421. ISSN: 01912615. DOI: 10.1016/j.trb.2018.02.001. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261517304484>.
- [13] Maxime Gueriau et al. “Shared Autonomous Mobility on Demand: A Learning-Based Approach and Its Performance in the Presence of Traffic Congestion”. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 12.4 (2020), pp. 208–218. ISSN: 1939-1390, 1941-1197. DOI: 10.1109/MITS.2020.3014417. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9186028/>.
- [14] Florian Dandl et al. “Regulating mobility-on-demand services: Tri-level model and Bayesian optimization solution approach”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 125 (2021), p. 103075. ISSN: 0968090X. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103075. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X21000991>.
- [15] Jingjing Tian et al. “A Long-Term Shared Autonomous Vehicle System Design Problem considering Relocation and Pricing”. In: *Journal of Advanced Transportation* 2022 (2022). Ed. by Nirajan Shiwakoti, pp. 1–19. ISSN: 2042-3195, 0197-6729. DOI: 10.1155/2022/1905526. URL: <https://www.hindawi.com/journals/jat/2022/1905526/>.
- [16] Paulo Paneque Galuzio et al. “MOBOpt — multi-objective Bayesian optimization”. In: *SoftwareX* 12 (2020), p. 100520. ISSN: 23527110. DOI: 10.1016/j.softx.2020.100520. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352711020300911>.