



HAL
open science

Contributions à l'analyse économique de la congestion des transports urbains

Martin Koning

► **To cite this version:**

Martin Koning. Contributions à l'analyse économique de la congestion des transports urbains. Autre. Université Lumière Lyon 2, 2020. tel-03109918

HAL Id: tel-03109918

<https://hal.science/tel-03109918>

Submitted on 14 Jan 2021

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

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

Université Lumière Lyon 2

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Présenté par :

Martin Koning

Chargé de recherche (IFSTTAR/SPLOTT/UGE)

**Contributions à l'analyse
économique de la congestion des
transports urbains**

Soutenu publiquement le 1^{er} décembre 2020

Garant :

Charles Raux – Ingénieur de recherche, HDR (CNRS/LAET/ULL2)

Rapporteurs :

Henrik Andersson – Maître de conférences, HDR (TSE/UT1C)

Laurent Denant-Boëmont – Professeur des Universités (CREM/UR1)

Thierry Blayac - Professeur des Universités (CEE-M/UM1)

Autres membres du jury :

Miren Lafourcade – Professeur des Universités (RITM/UPS/PSE)

Stéphanie Souche-Le Corvec – Professeur des Universités (LAET/ULL2)

Page délibérément laissée vierge

Table des matières

Remerciements	5
Avant-propos	6
Résumé	7
Rapport scientifique	9
1. Introduction	10
2. Approches théoriques	16
2.1 Un modèle simplifié de congestion.....	16
2.2 Un modèle plus général	23
2.3 Optimum de second-rang.....	28
2.4 Principales limites	31
3. Stratégies empiriques.....	34
3.1 Congestion routière multi-classes.....	35
3.2 Congestion routière et polluants.....	42
3.3 Congestion dans les métros.....	46
3.4 Synthèse	52
4. Principaux apports.....	53
4.1 Fonctions de congestion empiriques	53
4.2 Coûts marginaux externes.....	64
4.3 Pertes de bien-être collectif	68
4.4 Coût économique ou coût total de congestion	76
4.5 Effets externes et analyses coûts-bénéfices.....	78
5. Conclusions et perspectives	82
5.1 Synthèses des apports scientifiques	83
5.2 Travaux en cours et à venir.....	85
6. Bibliographie	87
7. Annexes.....	99
7.1 Enquêtes sur les automobilistes et sur les chauffeurs-livreurs..	99
7.2 Données utilisées pour le couplage des modèles Freturb, MODUS et COPCETE	101

7.3	L'enquête sur les quais des métros parisiens	105
7.4	Autres données mobilisées	110
7.5	Autres résultats pertinents	111
7.6	Tests de sensibilité	113
	Rapport d'activités	117
8.	Autres travaux de recherche.....	118
8.1	Caractéristiques des envois de marchandises.....	118
8.2	Décarbonation du transport de fret.....	119
8.3	Infrastructures ferroviaires et développement local	120
8.4	Valorisation de l'insécurité routière.....	121
9.	Enseignements et encadrements	122
10.	Animation de la vie scientifique	124
11.	Expertises.....	125

Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement Charles Raux qui a rapidement accepté d'être le garant de ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches et qui me permet de le présenter sous le sceau de l'Université Lumière Lyon 2. Outre sa grande disponibilité, ses conseils ont été fort utiles pour faire le tri dans mes idées et rendre plus digeste la version finale du manuscrit.

Je suis également très reconnaissant à Henrik Andersson, Laurent Denant-Boëmont et Thierry Blayac d'avoir consenti à réaliser les tâches ingrates (et chronophages) que sont la lecture de ce document et la rédaction de leurs avis circonstanciés. Faisant face aux mêmes contraintes caractérisant cette rentrée universitaire particulière, je salue chaleureusement Miren Lafourcade et Stéphanie Souche-Le Corvec qui me font le grand plaisir de participer à mon jury.

Ce manuscrit repose sur plusieurs articles académiques qui sont le fruit de collaborations passionnantes et parfois suivies avec (par ordre alphabétique) François Adoue, Adrien Béziat, Nathan Bounie, François Combes, Alison Conway, Nicolas Coulombel, Yves Crozet, Laetitia Dablanc, Mathieu Gardrat, Luke Haywood, Pierre Kopp, Matthieu de Lapparent, Alain L'Hostis, Guillaume Monchambert, Rémy Prud'homme et Florence Toilier. Qu'ils et qu'elles soient tou.te.s remercié.e.s pour avoir mis en pratique en ma compagnie une telle « division sociale du travail ».

L'IFSTTAR et, plus particulièrement le laboratoire SPLOTT, ont constitué un environnement idéal pour rédiger ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Je tiens donc à remercier l'ensemble de mes collègues pour leurs avis sur mes travaux, leur bienveillance et leur sympathie, avec une mention toute particulière pour François, Corinne et Nicole.

Cette liste ne serait pas complète si j'oubliais de remercier mes amis (notamment ceux qui m'ont aidé sur les quais des métros), ma famille et ma belle-famille, pour leur présence et leur aide constantes. Ces pensées s'adressent plus particulièrement à Cindy pour son soutien sincère et indéfectible mais aussi à Nina qui nous a rejoints en cours de route et qu'il me tarde de guider sur les sentiers de randonnée autour d'Annecy.

Avant-propos

Ce mémoire a été rédigé en vue de l'obtention d'une Habilitation à Diriger les Recherches en sciences économiques. Il se compose de deux volets :

- La première partie fait la synthèse des travaux académiques sur la congestion des transports urbains que j'ai réalisés depuis mon arrivée à l'IFSTTAR (nouvellement Université Gustave Eiffel) et mon affectation en sein du laboratoire SPLOTT en décembre 2012.
- La seconde partie du manuscrit présente une sélection des autres travaux scientifiques que j'ai menés à terme ou initiés depuis fin 2012, mes activités d'enseignements et d'encadrements ainsi que les expertises effectuées dans le cadre de mes fonctions de chargé de recherche.

Résumé

L'analyse économique de la congestion des transports urbains souffre aujourd'hui d'au moins deux « angles morts » : a) une bonne mesure de la contribution du transport de fret aux pertes de temps sur les routes ; b) l'étude de la saturation dans les transports en commun et des pertes collectives qui en découlent. La première partie de ce manuscrit synthétise les apports de plusieurs articles ayant abordé ces deux phénomènes. Nous présentons tout d'abord le cadre théorique « pigouvien » qui a été originalement transposé à l'estimation des pertes de bien-être liées à la sous-tarifcation de l'externalité d'inconfort dans les métros. Ce modèle est ensuite étendu à l'analyse de la congestion routière dans un cadre multi-classes, lorsque les camions et les VUL partagent la voirie avec les voitures. Nous considérons aussi bien les pertes de temps subies par les usagers des routes, liées à une fréquentation excessive par rapport à l'optimum économique, que les « surémissions » de polluants induites par la baisse des vitesses. Nous décrivons ensuite les stratégies empiriques développées pour faire émerger les fonctions de congestion nécessaires à la résolution des modèles théoriques. Concernant la congestion routière, nous proposons des estimations économétriques utilisant des données individuelles et nous couplons les résultats de divers outils de modélisation (du trafic et des émissions de polluants). Les coûts - privés et externes - d'un type donné de véhicules sont des fonctions croissantes du flux de véhicules similaires, mais aussi du volume des autres véhicules présents sur les routes. Concernant la congestion dans les transports publics, nous étudions les « préférences déclarées » d'usagers du métro parisien ayant été confrontés à des arbitrages hypothétiques entre des voyages plus ou moins rapides et plus ou moins confortables. L'analyse économétrique confirme que la valeur subjective du temps augmente avec la densité de passagers dans les rames. Nos principaux résultats sont les suivants. S'ils représentent 8% des distances parcourues en Ile-de-France, les véhicules de fret comptent pour 40% du bien-être collectif et 30% du coût environnemental imputable au trafic routier. Nous proposons des schémas de tarifcation, pour les voitures, les VUL et/ou les camions, visant à limiter les pertes collectives liées à la sur-utilisation des infrastructures. Dans le cas des métros parisiens, nous montrons qu'il y a environ 9% de voyageurs « en trop » par rapport à l'optimum. Si les pertes sociales liées à la sous-tarifcation de cette congestion sont actuellement limitées, elles pourraient vite augmenter et le coût externe est élevé, comparativement aux coûts environnementaux des voitures notamment. Au final, les méthodes et paramètres proposés dans nos articles « équipent » les chercheurs et praticiens intéressés par l'évaluation socioéconomique des projets de transports urbains.

Page délibérément laissée vierge

Rapport scientifique

1. Introduction

L'agglomération des individus et des activités dans les villes génère divers gains productifs et hédoniques désirés par les agents économiques (Ahlfeldt et Pietrostefani, 2019 ; Duraton et Puga, 2003). Ces bénéfices, liés notamment à un meilleur appariement sur le marché du travail et à des échanges d'idées plus intenses, sont amplifiés lorsqu'il est possible de facilement s'affranchir des contraintes spatiales grâce à l'existence de réseaux de transports performants et abordables (Graham, 2007 ; Graham et Gibbons, 2019 ; Eliasson et Fosgerau, 2019). Toutefois, lorsque les infrastructures sont caractérisées par des capacités d'accueil fixes et font face à une demande excessive, durant certaines périodes ou en certains points de l'espace, la qualité de service qu'elles offrent aux usagers peut foncièrement se dégrader. La congestion des transports urbains, souvent associée aux voitures privées (VP dans le reste de ce document), s'assimile ainsi à des rendements d'échelle décroissants qui majorent aussi bien le coût privé que le coût social de la mobilité (Small et Verhoef, 2007, O'Sullivan, 2012). Les usagers ne recevant pas le « signal prix » adéquate, i.e. celui qui les forcerait à intégrer dans leurs choix de mobilité les coûts externes qu'ils font subir aux autres individus, les infrastructures sont alors un peu « trop » demandées et leur congestion détruit du bien-être collectif. Cette « défaillance de marché » justifie pleinement la mise en œuvre de politiques publiques correctrices, à l'instar par exemple des péages de congestion introduits à Singapour, Hong-Kong, Londres ou Stockholm (ADEME, 2014 ; Börjesson et Kristoffersson, 2018 ; Cao et al., 2017 ; Croci, 2016 ; de Palma et Lindsey, 2011 ; Eliasson, 2008 ; Gostner, 2018 ; Prud'homme et Bocajero, 2005 ; Raux et al., 2009 ; Santos, 2005 ; Parry et al., 2007).

Si l'analyse de la congestion des transports urbains a suscité une grande variété de travaux académiques issus des sciences économiques donc, mais aussi de la géographie (Beziat, 2017 ; Lesteven, 2012 ; Godillon, 2016), de l'ingénierie du trafic (Ortuzar et Willumsen, 2011 ; TRB, 2010 ; Buisson et Lessort, 2010) ou encore de la physique (Louf et Barthélémy, 2014), on peut avancer que son étude est caractérisée par certains « angles morts ».

Alors même que les véhicules utilitaires légers (VUL) et les poids-lourds (PL) sont indispensables à la vitalité économique des territoires, on remarque tout d'abord que leurs impacts sur les coûts de congestion routière et sur les nuisances environnementales associées, bien que largement décriés, ont été beaucoup moins quantifiés que pour les VP. Ce constat n'occulte en aucun cas l'existence de travaux en sciences économiques qui portent spécifiquement sur le transport de fret (voir entre autres de Bok et al., 2020 ; Kleist et Doll, 2005 ; Holguin-Veras et al., 2006 ; Holguin-Veras et Cetin, 2009 ; Calthrop et al., 2007 ; Luechinger et Roth, 2016 ; Combes, 2018 ; Niérat, 1997 ; Combes et Lafourcade, 2001 ; de Palma et al., 2008).

Toutefois, il est notable que cette littérature est moins développée au niveau urbain et qu'elle dispose rarement de matériaux empiriques détaillés. Outre des problèmes liés à la diffusion des données opérationnelles sensibles (car relevant du secret commercial), il faut en effet reconnaître que les outils de mesures à la disposition des autorités publiques ou des chercheurs sont aujourd'hui encore partiels (Allen et al., 2013)¹. Les capteurs, caméras et autres boucles électromagnétiques ne couvrent ainsi qu'une infime part des réseaux routiers et peinent à distinguer les VP des VUL (Buisson et Lessort, 2010) ; les enquêtes cordons sont par définition limitées en durée et dans l'espace. Dans ces conditions, on comprend que les estimations des pertes de temps et des émissions de polluants imputables aux transports de marchandises en ville (TMV) sont aujourd'hui encore perfectibles. Il semble donc primordial de mieux les quantifier afin de porter un diagnostic éclairé et de mettre en place les politiques publiques les plus appropriées.

Tandis que les transports publics (TP) ont été favorisés dans de nombreuses agglomérations afin de stimuler le report modal depuis les VP et améliorer la durabilité de la mobilité urbaine, il est ensuite frappant de constater que leur congestion avait jusqu'à récemment fait l'objet d'un nombre restreint d'analyses (Kraus, 1991). Ces réseaux sont en effet associés à l'existence de rendements d'échelle croissants pour les usagers et les opérateurs, comme initialement formalisé par H. Mohring en 1972 (voir aussi Jansson, 1979, Glaister, 1974 ; van Goeverden et al., 2006 ; Basso et Jara-Diaz, 2010 ; Basso et Silva, 2014 ; Börjesson et al., 2017 ; Parry et Small, 2009 ; Proost et Dender, 2008 ; Graham et al., 2020). Une hausse de la fréquence des véhicules en circulation réduit ainsi les temps d'attente en station, ce qui attire des passagers puis abaisse en retour les coûts moyens d'exploitation et les besoins de subventions publiques. Ce cercle vertueux n'est toutefois pas infini et, lorsque l'offre ne peut plus être ajustée, une hausse excessive de la demande conduit à des effets de congestion, entre les usagers, entre les véhicules, mais aussi entre les véhicules et les usagers (Lam et al., 1999 ; Leurent et al. 2014 ; Coulombel et Monchambert, 2019). Autrement dit, négliger ce phénomène lors de l'élaboration et de la mise en œuvre des politiques de transports urbains peut conduire à des résultats contre-productifs, la congestion des TP représentant un effet repoussoir potentiellement important (Tirachini et al., 2013, 2014 ; de Palma et al., 2015, 2017 ; Hörcher et al., 2018, 2020 ; Batarce et al., 2016).

Rédigé dans l'optique d'obtenir une Habilitation à Diriger les Recherches en sciences économiques, ce manuscrit synthétise 6 articles qui abordent, d'un point de vue théorique comme empirique, la nature et l'ampleur des coûts de congestion imputables au TMV et à la sur-fréquentation des TP² :

¹ Ce constat doit être nuancé en raison d'un accès grandissant aux traces GPS des transporteurs professionnels qui permettent de reconstruire les trajets des VUL et des PL.

² Outre ces articles, nous faisons référence à d'autres études rédigées depuis ma prise de fonction à l'IFSTTAR-Université Gustave Eiffel (Koning et Kopp, 2014 ; Koning et Conway,

- Beziat A., Koning M. et Toilier F. (2017). Marginal congestion costs in the case of multi-class traffic: A macroscopic assessment for the Paris region, *Transport Policy*, 60: 87-98.
- Coulombel N., Dablanc L., Gardrat M. et Koning M. (2018). The environmental social cost of urban road freight: Evidence from the Paris region, *Transportation Research Part D – Transport & Environment*, 63: 514-532.
- Koning M., Combes F., Coulombel N. et Gardrat M. (2020). Welfare losses caused by heterogeneous and under-priced road transport: The Paris region case study, *Work in progress*.
- Haywood L. et Koning M. (2015). The distribution of crowding costs in public transport: New evidence from Paris, *Transportation Research Part A – Policy & Practice*, 77: 182-201.
- Haywood, L. Koning M. et Monchambert G. (2017). Crowding in public transport: Who cares and why?, *Transportation Research Part A – Policy & Practice*, 100: 215-227.
- Haywood L., Koning M. et Prud'homme R. (2018). The economic cost of subway congestion: Estimates from Paris, *Economics of Transportation*, 14 : 1-8.

Dans certaines de ces études, nous mobilisons un corpus théorique délibérément simple mais particulièrement pertinent pour quantifier et décomposer les effets socioéconomiques liés à la congestion des transports urbains, le cadre d'analyse statique « pigouvien » (en hommage à A.C. Pigou qui le popularisa en 1920 dans son étude du « welfare economics », voir Small et Verhoef, 2007 ; Lindsey, 2006 ; O'Sullivan, 2012 ; Button, 2020). Ce modèle conceptuel est ensuite alimenté avec des données originales sur le transport routier de fret dans l'agglomération francilienne et sur la perception des voyageurs quant à l'inconfort de leurs déplacements dans les métros parisiens. Nos travaux contribuent à l'état de l'art au travers de deux principales directions.

Tout d'abord, nous proposons des relations empiriques décrivant la baisse de la qualité de service pour les voyageurs lorsque la congestion des infrastructures augmente, dans les métros ou sur les routes, ce dernier cas considérant aussi la hausse des nuisances environnementales liée à une baisse des vitesses de circulation. Ces travaux enrichissent une littérature féconde sur les fonctions de congestion routière « agrégées », pour toute

2016 ; de Lapparent et Koning, 2016 ; Bounie, Adoue, Koning et L'Hostis, 2019 ; Crozet et Koning, 2019a, 2019b). Ces différents articles ne constituent pas l'intégralité de mon activité de recherche, comme détaillé dans le rapport d'activités qui constitue la seconde partie de ce manuscrit. Finalement, les articles présentés ici prolongent un travail doctoral qui abordait déjà les coûts de la congestion dans les transports parisiens (Koning, 2011 ; Prud'homme, Koning et Kopp, 2011 ; Haywood et Koning, 2012 ; Prud'homme, Koning, Lenormand et Fehr, 2012 ; Koning, 2013).

une agglomération (de Borger et al., 1996 ; Prud'homme, 1999 ; Akbar et al., 2018 ; Akbar et Duranton, 2017 ; Amirgholy et Gao, 2017 ; Couture et al., 2018 ; Duranton et Turner, 2011 ; Geroliminis et Daganzo, 2008 ; Kreindler, 2018), notre spécificité consistant surtout à développer de telles relations dans un cadre « multi-classes » (Dafermos, 1972 ; Yun et al., 2010 ; Müller et Schiller, 2015) qui considère les conflits d'usage sur les routes entre VP, VUL et PL. En ce qui concerne la congestion des métros, nos travaux viennent grossir les rangs étonnamment clairsemés des études qui valorisent l'inconfort dans les véhicules pour le cas français (Debrincat et al. 2006 ; Kroes et al., 2013 ; Bouscasse et de Lapparent, 2019). Si cette thématique a fait l'objet de très nombreuses analyses hors de l'Hexagone (Batarce et al., 2015, 2016 ; Hörcher et al., 2017 ; ITF-OECD, 2014 ; Li et Hensher, 2011 ; Pel et al., 2014 ; Tirachini et al., 2013, 2016 ; Wardman et Whelan, 2011 ; Whelan et Crockett, 2009), il est par ailleurs notable que très peu d'entre elles utilisent les estimations obtenues afin de faire émerger une fonction de congestion pour les TP opérationnelle et à même d'alimenter les calculs socioéconomiques.

Grâce à ces connaissances empiriques, nous sommes en effet en mesure de comparer l'utilisation actuelle des infrastructures de transport en Ile-de-France avec celle qui prévaudrait au cas où serait atteint un idéal théorique, celui de l'optimum économique (Small et Verhoef, 2007). Ce faisant, nous calculons les pertes de bien-être collectif liées au fonctionnement inefficent des marchés des transports urbains. Précisons que si le modèle pigouvien a été maintes fois mobilisé pour estimer les pertes sociales engendrées par la congestion automobile (Button, 2020 ; Newberry et Santos, 1999 ; Walters, 1961 ; Prud'homme, 1999), rares sont les études qui considèrent explicitement les véhicules de fret au sein de ce cadre d'analyse, plus rares encore sont celles qui le transposent à la congestion des TP. En outre, nous discutons la pertinence de différentes politiques publiques. Nous proposons notamment des grilles de tarification visant à couvrir l'externalité de congestion en Ile-de-France, dans les métros ou pour les différents types de véhicules routiers, ce dernier exercice considérant aussi leurs coûts environnementaux. Nous illustrons également l'utilité de certains paramètres que nous proposons en vue d'alimenter les analyses coûts-bénéfices de projets de transport (CGSP, 2013).

Bien que les articles présentés dans ce manuscrit aient tous pour terrain d'étude la région Ile-de-France, les deux grandes thématiques qui y sont abordées – les coûts directs et indirects de congestion imputables au TMV ainsi que les pertes de bien-être liées à la saturation des TP – ne sont en aucun cas circonscrites à ce seul territoire. Ainsi, les coûts externes générés par les VUL et les PL mériteraient d'être plus fréquemment étudiés, qu'elles que soient la taille, l'orientation économique ou le dynamisme des agglomérations. En outre, le report modal des VP vers les TP est un objectif partagé par la plupart des autorités locales. Si les réseaux d'autres agglomérations rencontrent une fréquentation moindre qu'en Ile-de-France, ils pourraient à terme connaître une congestion élevée et il serait

important de s'intéresser aux coûts perçus par leurs usagers. Les méthodes et modèles que nous développons dans nos articles peuvent donc être utilement transposés à d'autres études de cas. Ceci dit, on comprend qu'étudier la congestion des transports parisiens est très pertinent. Accueillant 18% de la population et 22% des emplois nationaux sur 2% du territoire français, l'Ile-de-France illustre bien les bénéfices et les coûts liés à la concentration spatiale. Même si des effets de sélection expliquent une part des écarts, les emplois franciliens sont ainsi 24% mieux rémunérés que la moyenne nationale car caractérisés par une plus forte productivité (Combes et al., 2015). A contrario, la très forte densité régionale génère divers coûts collectifs, liés au fonctionnement du système de mobilité notamment.

Alors que les TP régionaux accueillent quotidiennement près de 8 M de voyages en 2010, les VP demeurent le mode mécanisé le plus utilisé par les Franciliens (15 M de voyages/jour) et, malgré son maillage très fin, le réseau routier connaît d'intenses épisodes de congestion. D'après la Gendarmerie Nationale, les routes régionales concentrent ainsi près de 69% des ralentissements enregistrés en France, avec une perte annuelle estimée à 90 heures par automobiliste par an (voir Rapoport et al., 2018). Même si les indicateurs ne cessent de s'améliorer, force est ensuite de constater que l'Ile-de-France n'occupe pas le haut des classements des agglomérations les moins polluées de France ou d'Europe. Les transports routiers ne sont certes pas les seuls responsables mais la mobilité des biens et des individus représente près de 50% des rejets régionaux de NOx, 35% des émissions de PM_{2,5} et 30% des gaz à effet de serre (GES). En ajoutant à ces « maux » les gênes causées par le bruit des moteurs et l'accidentalité, Rapoport et al. (2018) avancent que les coûts externes des transports routiers en Ile-de-France atteignent un montant compris entre 13000 et 16000 M eu/an, soit environ 2% du PIB régional. Sans remettre en cause la nature préoccupante d'une telle « facture » pour la collectivité, nous serons amenés à discuter dans ce manuscrit sa réelle pertinence au regard des concepts théoriques des sciences économiques. Surtout, il est notable que ces estimations n'explicitent pas du tout la part des pertes sociales imputables au TMV, alors même que l'Ile-de-France est la première région en termes de tonnes chargées ou déchargées sur des modes routiers (données SITRAM³) et qu'elle concentre de très nombreux entrepôts logistiques. D'une manière plus générale, l'immense majorité des travaux en économie des transports s'intéressant à l'Ile-de-France (Bureau, 2011 ; Bureau et Glachant, 2008, 2011 ; Bignon et Pojani, 2018 ; Cornut et Madre, 2017 ; Coulombel et al., 2019 ; de Palma et Lindsey, 2006 ; Kilani et al., 2014 ; Kopp, 2011 ; Leurent et al., 2009 ; Prud'homme et Kopp, 2008 ; Durrmeyer et Franco, 2020 ; Klingen, 2019) accorde peu ou pas d'importance au TMV et aux coûts externes des PL et des VUL. Les études présentées dans ce manuscrit permettent donc de combler quelque peu ce déficit.

³<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-les-flux-de-marchandises-sitram-annee-2015>

La seconde grande thématique abordée dans nos articles – la congestion des TP – occupe aujourd’hui une place centrale dans les discussions sur les conditions de déplacement au sein de la région capitale. Les décideurs parisiens luttent en effet depuis près de 20 ans contre les méfaits des automobiles en réallouant la voirie accessible aux VP vers les modes doux et collectifs (marche, vélos, tramways et bus, voir Prud’homme et Koning, 2008 ; Godillon, 2016 ; Koning, 2011). En créant délibérément de la congestion routière, ces mesures ont permis de réduire substantiellement le trafic VP dans Paris. Le report modal vers les modes ferrés, bien qu’étant un des objectifs visés, est toutefois devenu problématique. La croissance de la demande de TP ayant été plus forte que celle de l’offre, des dés-économies d’échelle pour les voyageurs sont progressivement apparues et de nombreuses voix s’élèvent aujourd’hui pour souligner l’inconfort des déplacements dans les métros ou dans les trains régionaux, avec même des effets négatifs sur la fiabilité des trajets pour certains tronçons du RER (Rapoport et al., 2018). La saturation des TP constitue de fait une thématique structurante dans les projets en cours. Un des effets attendus du Grand Paris Express concerne par exemple la décongestion du réseau de métros et des RER dans la mesure où les futures lignes de rocade doivent autoriser les déplacements entre les différentes banlieues et ainsi éviter à des milliers d’individus de transiter par le cœur de l’agglomération. A contrario, la congestion accrue des réseaux ferroviaires et des bus a bien été identifiée par Rapoport et al. (2018) et par David et al. (2019) comme l’une des principales conséquences négatives d’une éventuelle réforme tarifaire instaurant la gratuité totale des TP en Ile-de-France. Si les études proposées dans notre travail doctoral (Haywood et Koning, 2012 ; Prud’homme, Koning, Lenormand et Fehr, 2012) fournissaient de premières connaissances empiriques permettant de valoriser ces effets de congestion, elles appelaient des enrichissements que nous allons présenter dans ce manuscrit⁴. En précisant les coûts de congestion dans les métros parisiens et en identifiant les canaux de l’inconfort qui perturbent le plus les usagers des TP, nos travaux possèdent donc une portée opérationnelle certaine.

Ce document se poursuit avec une présentation théorique des effets de la congestion des infrastructures sur le fonctionnement d’un marché hypothétique des transports. La section 2 détaille ainsi une version simple du modèle pigouvien puis développe un cadre d’analyse plus général qui permet d’appréhender les pertes de bien-être collectif lorsque les VP et les véhicules de fret utilisent simultanément les routes. La section 3 décrit les

⁴ En utilisant les estimations que nous avons proposées dans Haywood et Koning (2012), Rapoport et al. (2018) chiffrent les coûts de congestion dans les TP ferrés franciliens à 1000-2000 M eu/an. Bien que nos résultats initiaux aient eu un certain écho dans la communauté scientifique, la première enquête de terrain souffrait de limites concernant la description des niveaux de confort (de référence ou hypothétique), les enchères temporelles (invariantes) proposées aux individus en échanges d’un confort supérieur ou encore la modélisation économétrique. Ces manques sont discutés et dépassés dans Haywood et Koning (2015).

stratégies empiriques mises en œuvre pour calibrer les fonctions de congestion nécessaires à la résolution de ces modèles théoriques. Nos principales contributions scientifiques sont détaillées dans la section 4. Nous présentons tout d’abord les fonctions empiriques de congestion que nous avons estimées à l’aide de données originales⁵. Nous quantifions ensuite les coûts marginaux externes des transports urbains ainsi que les pertes de bien-être collectif imputables à leur sous-tarifification. Enfin, nous discutons quelques implications pour les politiques publiques. Après une rapide synthèse de nos principaux résultats, la section 5 aborde les études en cours ou envisagées pour parfaire notre compréhension des effets socioéconomiques de la congestion des transports urbains.

2. Approches théoriques

Nous débutons cette section en présentant un modèle de congestion initialement développé par A.C. Pigou (1920) et largement repris depuis (Button, 2020), notamment dans le manuel de Small et Verhoef (2007). Si ses hypothèses peuvent paraître simplistes, nous l’avons transposé de manière originale à l’étude des coûts de congestion dans les métros parisiens (Haywood, Koning et Prud’homme, 2018). Nous proposons ensuite un modèle plus général qui permet d’étudier les incidences, directes et indirectes, de la congestion dans le cas de flux routiers multi-classes, lorsque différents types de véhicules se partagent la voirie. Cette seconde approche guide le travail empirique que nous présentons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) et qui a pour objectifs d’estimer les impacts des véhicules de fret sur les coûts de congestion et sur les nuisances environnementales du trafic routier en Ile-de-France.

2.1 Un modèle simplifié de congestion

Nous considérons une infrastructure de transport à capacités fixes et utilisée par des voyageurs homogènes en termes de revenus, de paires origine-destination (OD) et de périodes auxquelles ils se déplacent. Conformément au cadre d’analyse partiel dans lequel s’inscrit ce modèle, il n’y a pas de distorsion sur les marchés « secondaires ». Par ailleurs, nous ignorons pour

⁵ Comme nos travaux s’inscrivent essentiellement dans le domaine de l’économie appliquée, nous présentons dans les annexes les matériaux empiriques mobilisés, notamment l’enquête de terrain récoltée sur les quais des lignes 1 et 4 du métro parisien pour y valoriser la congestion dans les véhicules.

le moment les externalités environnementales générées par les transports ainsi que les dépenses liées à l'exploitation de cette infrastructure⁶.

Soit q le nombre de voyageurs utilisant l'infrastructure sur cette OD-période. Il peut s'agir d'un flux horaire ou d'une demande totale de déplacements durant une certaine durée (journée, heures de pointe ou creuses, année...). Le niveau de fréquentation est ici représenté par une fonction de demande inverse $d^{-1}(q)$. Elle décrit le bénéfice marginal que retirent les usagers de l'infrastructure ou encore leur « consentement marginal à payer » pour l'emprunter. Elle diminue avec q ($\frac{\partial d^{-1}(q)}{\partial q} < 0$).

Le coût marginal privé $c(q)$ agrège les dépenses monétaires supportées par les individus - hors péage d'accès à l'infrastructure - ainsi que le temps qu'ils « consomment » durant leurs voyages, auquel est attribuée une valeur subjective. Ce « coût généralisé » $c(q)$ est croissant par rapport au niveau de trafic q en raison du phénomène de congestion ($\frac{\partial c(q)}{\partial q} > 0$). La moindre qualité de service offerte par l'infrastructure au fur et à mesure que la demande augmente peut provenir soit d'une vitesse de déplacement réduite (sur les routes ou dans les TP), soit de voyages plus inconfortables (dans le cas des transports collectifs ferrés notamment).

L'équilibre effectif sur ce marché des transports, caractérisé par l'indice e et avec q_e usagers, est tel que le dernier usager empruntant l'infrastructure égalise son bénéfice marginal au « prix généralisé effectif » du déplacement. Ce dernier élément somme le coût marginal privé $c(q_e)$ associé au niveau de trafic q_e et le péage d'accès à l'infrastructure τ_e que récolte la puissance publique dans la situation effective⁷ :

$$d^{-1}(q_e) = \tau_e + c(q_e) \quad (1)$$

L'équilibre optimal, caractérisé par l'indice o et avec q_o voyageurs, se détermine quant à lui en maximisant la fonction de bien-être social $SW(q)$ par rapport à q :

$$SW(q) = \int_0^q d^{-1}(q') dq' - q(\tau + c(q)) + q\tau \quad (2)$$

La différence entre les deux premiers termes de $SW(q)$ - les bénéfices et les coûts totaux respectivement - décrit le surplus économique des voyageurs. Le troisième terme de $SW(q)$ correspond aux recettes de l'Etat.

⁶ On peut supposer que ces coûts externes sont parfaitement couverts par des taxes ou des prélèvements qui apparaissent dans la composante monétaire du coût marginal privé. On lève plus loin cette hypothèse.

⁷ Sans perte de généralité, il est usuel de considérer que τ_e est nul ou couvre les autres coûts externes des transports (voire la note de bas de page précédente).

On constate que les péages d'accès à l'infrastructure τ sont des transferts et disparaissent de l'équation (2). La condition de premier-ordre s'écrit :

$$\frac{\partial SW(q)}{\partial q} = d^{-1}(q) - c(q) - q \frac{\partial c(q)}{\partial q} = d^{-1}(q) - s(q) = 0 \quad (3)$$

Soit :

$$d^{-1}(q_o) = s(q_o) \quad (4)$$

Les équations (3) et (4) impliquent que pour maximiser le bien-être collectif le bénéfice marginal du dernier voyageur arrivant sur l'infrastructure à l'optimum $d^{-1}(q_o)$ doit être égal au coût marginal social de son déplacement $s(q_o)$. Ce dernier terme additionne le coût marginal privé et le coût marginal externe de congestion. En effet, l'arrivée du voyageur marginal sur l'infrastructure participe à accroître le coût généralisé ($\frac{\partial c(q)}{\partial q} > 0$) supporté par les q_o individus qui l'utilisent simultanément.

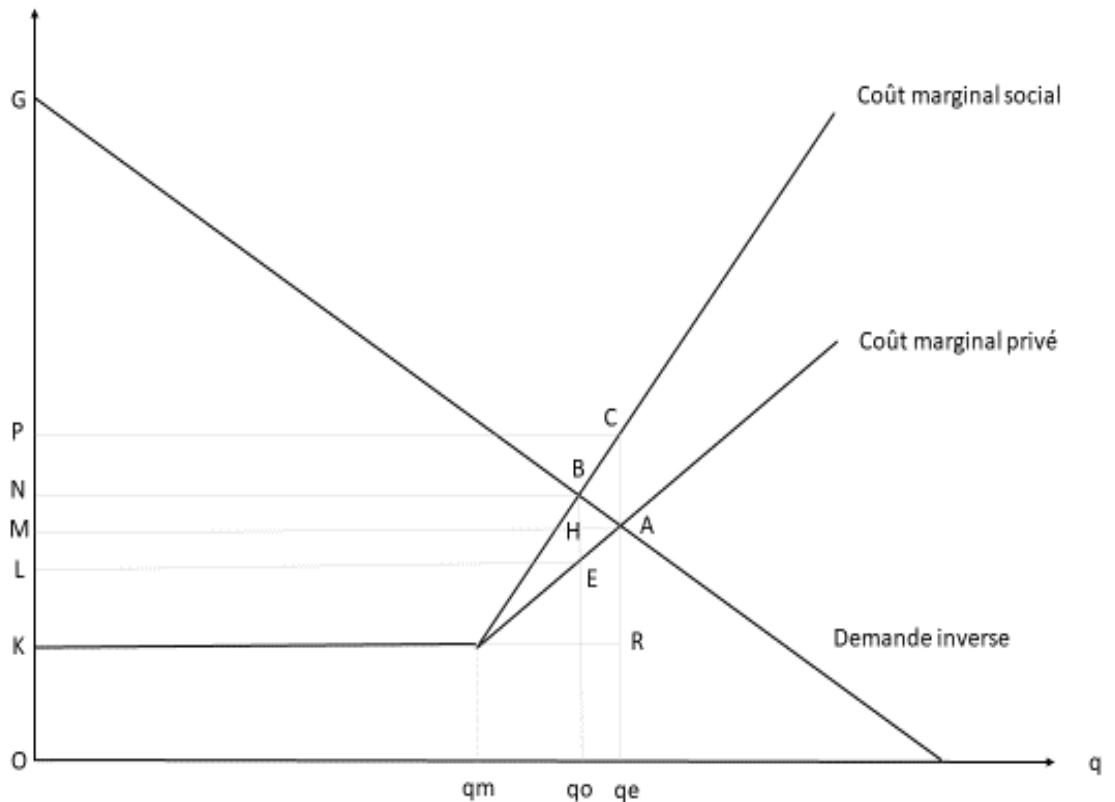
En comparant les équations (4) et (1), on comprend que l'infrastructure est « trop » utilisée ($q_e > q_o$) dès que le péage effectif τ_e est inférieur au (i.e. ne « couvre » pas) le coût marginal externe de congestion à l'optimum :

$$\tau_e < \frac{\partial c(q)}{\partial q} q_o = \tau_o \quad (5)$$

Une manière souvent mise en avant par les économistes (voir notamment Lindsey, 2006 ; Button, 2020 ; Small et Verhoef, 2007) pour décentraliser l'équilibre effectif vers l'optimum consiste donc à introduire un péage τ_o , tel qu'indiqué par la partie droite de l'équation (5). De la sorte, l'Etat force les voyageurs prendre compte lors de leurs choix de mobilité (à « internaliser ») le coût marginal externe de congestion qu'ils infligent aux autres individus présents sur l'infrastructure à l'optimum.

La figure 1 permet de visualiser les pertes de bien-être collectif causées par la sous-tarification de cette externalité technologique. Par souci de cohérence avec la suite de l'exposé, nous supposons que la fonction de demande inverse décroît de manière linéaire par rapport à q . Nous faisons également l'hypothèse que la « technologie de congestion » est décrite par une relation linéaire entre le coût marginal privé et q , une fois dépassé le niveau de trafic minimal q_m . Pour simplifier l'exposé, nous supposons que τ_e est nul. Dans ces conditions, l'équilibre effectif se trouve au point A, lorsque la fonction de demande inverse égalise celle de coût marginal privé. L'optimum est quant à lui au point B, où se rencontrent le coût marginal social et le bénéfice marginal privé. Le coût marginal externe effectif correspond au segment CA tandis que la taxe optimale équivaut ici à EB.

Figure 1 – Représentation des effets de la congestion sur un marché hypothétique des transports



Comme indiqué par l'équation (3), le bien-être collectif diminue dès que le coût marginal social est supérieur au bénéfice marginal des voyageurs. Sachant que $SW(q)$ atteint son maximum en q_0 mais aussi que les fonctions de coût marginal social et de demande inverse évoluent de manières opposées par rapport à q , le « coût économique de la congestion » (CEC) équivaut donc à :

$$CEC = \int_{q_0}^{q_e} \frac{\partial SW(q')}{\partial q'} dq' = \int_{q_0}^{q_e} (s(q') - d^{-1}(q')) dq' \quad (6)$$

On retrouve ainsi une variante du « triangle de Harberger » qui décrit la perte sèche liée au fonctionnement inefficace de ce marché des transports, i.e. la surface ABC sur la figure 1.

Le CEC peut aussi s'obtenir en comparant le bien-être collectif obtenu pour les deux équilibres :

$$\begin{aligned} CEC &= SW(q_0) - SW(q_e) \\ &= \int_0^{q_0} d^{-1}(q') dq' - q_0 c(q_0) - \int_0^{q_e} d^{-1}(q') dq' + q_e c(q_e) \quad (7) \end{aligned}$$

Dans l'équation (7), $SW(q_o)$ équivaut au surplus des voyageurs au cas où l'optimum serait atteint d'une manière « spontanée », sans péage internalisant, soit la surface GBEL sur la figure 1 ($=GBq_oO - LEq_oO$). Par ailleurs, $SW(q_e)$ correspond au surplus des voyageurs lorsqu'on se trouve à l'équilibre effectif, soit la surface GAM ($=GAq_eO - Maq_eO$). Autrement dit, les pertes collectives causées par la non-tarifcation de la congestion sont ici égales aux gains (MHEL) des q_o voyageurs qui continueraient d'utiliser l'infrastructure si l'optimum était atteint sans péage (et qui supporteraient donc un coût marginal privé plus faible, $c(q_e)-c(q_o)$), moins les pertes (BHA) des (q_e-q_o) individus qui doivent cesser de la fréquenter pour que soit atteint l'optimum.

Cette seconde définition du CEC illustre les enjeux redistributifs liés à l'utilisation optimale des infrastructures de transport. Ces problèmes de transferts de surplus économique sont encore plus prégnants si les décideurs ont recours à une taxe optimale (BE) pour décentraliser l'équilibre effectif (Di Ciommo et Shiftan, 2017 ; Eliasson, 2016), les recettes d'un tel péage (BEMN) étant en effet supérieures aux gains des voyageurs qui continueraient de se déplacer si l'optimum avait été atteint spontanément (le solde correspondant à BHMN). En outre, un tel schéma de tarifcation ne sera pas équitable s'il existe de fortes disparités de revenus au sein de la population et si les voyageurs les moins favorisées sont les plus captifs, dans quel cas ils devront dépenser une part plus importante de leurs ressources pour continuer de se déplacer. Afin de rendre plus acceptable une telle mesure et éviter qu'elle n'ait des effets trop régressifs (Raux et Souche, 2004 ; Dieplinger et Fürst, 2014 ; Bureau et Glachant, 2011), notamment dans une optique d'économie politique (de Borger et Proost, 2012 ; Hensher et Li, 2013), il convient donc de neutraliser ces effets négatifs en recyclant adéquatement le produit de la taxe additionnelle. L'Etat dispose à cette fin de plusieurs options (de Palma et al., 2006 ; Gostner, 2018 ; ADEME, 2014), comme une baisse d'autres prélèvements fiscaux ou le remboursement direct d'une partie du produit de la taxe. Une alternative, très souvent plébiscitée, consiste à utiliser les recettes du péage optimal pour investir dans les réseaux concurrents. Ce faisant, l'Etat offre une possibilité aux (q_e-q_o) individus de continuer à se déplacer, ce qui limite leurs pertes de bien-être et peut même améliorer leur situation si le coût marginal privé de cette nouvelle option venait à être inférieur au coût généralisé initial $c(q_e)$.

Avant de présenter les formes fonctionnelles retenues dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) afin d'appliquer ce modèle à l'analyse des coûts de congestion des métros, précisons que la figure 1 est également utile pour illustrer les divergences d'opinions caractérisant parfois l'ampleur des pertes sociales causées par cette « défaillance de marché ». Outre le CEC, il est usuel de lire - dans les rapports institutionnels notamment (Rapoport et al., 2018 ; RICARDO-AEA, 2014 ; CE Delft, 2019) - que la sur-utilisation des infrastructures engendre le « coût total de

congestion » (CTC) : celui-ci correspond à la différence entre le coût marginal privé effectif $c(q_e)$ et celui qui prévaudrait si l'infrastructure était « vide » ou non congestionnée ($c(q_m)$), pour les q_e voyageurs qui l'utilisent (Small et Verhoef, 2007). Alors même que nos travaux permettront de chiffrer l'ampleur de ces divergences dans le cas des transports franciliens (voir section 4), la figure 1 suggère que le CEC est bien inférieur au CTC, ici représenté par la surface AMRK. Surtout, on comprend que cette seconde mesure ne peut constituer une approximation pertinente des pertes collectives pour les économistes. Ainsi, il est raisonnable d'avancer que les infrastructures n'ont pas été construites pour être vides, voire même « peu » utilisées. Ce qui compte d'un point de vue socioéconomique, c'est que leur fréquentation soit optimale et permette de maximiser le bien-être total. Suivant cette logique, on constate que le CTC néglige complètement les bénéfices que retirent les usagers de l'utilisation de l'infrastructure, ces gains étant captés par l'aire sous la fonction de demande inverse⁸.

Comme mentionné précédemment, une de nos contributions scientifiques a consisté à transposer ce modèle classique à l'étude des coûts de congestion dans les métros parisiens (Haywood, Koning et Prud'homme, 2018), ce qui n'avait jamais été réalisé auparavant à notre connaissance. Il est important de préciser que la hausse du coût marginal privé $c(q)$ par rapport à q est ici associée à une détérioration du confort dans les véhicules, et non à un allongement de la durée des voyages (provenant d'engorgements sur les quais, à des temps supplémentaires pour faire sortir/entrer les voyageurs dans les véhicules ou des ralentissements entre les trains, voir Lam et al., 1999 ; Coulombel et Monchambert, 2019). Par ailleurs, nous avons retenu une technologie de congestion linéaire, en accord avec les preuves empiriques obtenues dans Haywood et Koning (2015) qui seront présentées dans la section 4 :

$$c(q) = k + mq \quad (8)$$

Le paramètre k (>0) décrit le coût marginal privé lorsque les voyages en métro sont « confortables ». Le phénomène de congestion apparaît ici au travers du terme mq (>0) qui représente la croissance du coût généralisé par rapport à la densité de voyageurs dans les véhicules, une fois dépassé un « seuil » qui correspond au nombre total de places assises dans le wagon (q_m sur la figure 1).

Pour la fonction de demande inverse, nous avons également supposé une spécification linéaire :

⁸ Une variante consiste à approximer les coûts collectifs par la surface CAPM. Précisons que cette seconde « erreur » est plus fréquemment faite pour quantifier les pertes environnementales engendrées par les transports (CE Delft, 2019). Comme précédemment, cette manière d'appréhender les coûts de congestion n'est pas pertinente pour un économiste car elle néglige les bénéfices que retirent les usagers des infrastructures de transport ainsi que la notion d'optimum économique.

$$d^{-1}(q) = a - bq \quad (9)$$

Avec $a > 0$ et $b > 0$.

En paramétrant ces fonctions à l'aide des données disponibles et en appliquant les équations (3)-(4), nous pouvons déterminer la densité optimale de voyageurs dans les métros :

$$q_o = \frac{(a - k)}{(2m + b)} \quad (10)$$

Connaissant également la densité effective de voyageurs (q_e), nous disposons de toutes les coordonnées nécessaires à une estimation du CEC, en mobilisant les deux approches synthétisées dans les équations (6) et (7). Après simplifications, on trouve :

$$CEC = \frac{(q_e - q_o)mq_e}{2} \quad (11)$$

Avec ces données, nous sommes également en mesure de déterminer le montant du péage qui forcerait les voyageurs à internaliser le coût marginal externe de congestion qu'ils infligent aux autres individus présents dans les wagons, si les métros étaient utilisés d'une manière optimale :

$$\tau_o = \frac{m(a - k)}{(2m + b)} = mq_o \quad (12)$$

Bien que d'une grande simplicité, les estimations que nous proposons dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) sont doublement originales. Tout d'abord, elles permettent de traduire dans une grandeur monétaire une part du mécontentement exprimé par les usagers des métros parisiens concernant le manque de confort de leurs déplacements. Par ailleurs, nos estimations et les paramètres qui en découlent pourraient alimenter les réflexions sur les mesures à mettre en œuvre afin d'améliorer le fonctionnement des TP ferrés en Ile-de-France. Sur la base de l'équation (12), on pourrait ainsi songer à une réforme tarifaire qui, à l'instar de ce qui se fait à Londres, Hong-Kong ou Copenhague, modulerait le prix des billets des métros et des RER pour prendre en compte la saturation du réseau durant les heures de pointe. A contrario, la fonction de congestion décrite par l'équation (8) pourrait permettre de considérer certains impacts négatifs d'une politique instaurant la gratuité totale au sein du réseau régional de transports publics (David et al., 2018, Rapoport et al., 2018). Comme nous le montrerons dans la section 4, les coûts externes de congestion trouvés pour l'équilibre effectif peuvent finalement être utiles pour quantifier les bénéfices générés par des investissements dans d'autres modes (vélos, tramways, bus) qui parviendraient à désengorger les métros parisiens.

2.2 Un modèle plus général

Nous étendons à présent ce modèle classique pour étudier la congestion routière et ses coûts collectifs dans un cadre d'analyse multi-classes (Dafermos, 1972 ; Holguin-Véras et Cetin, 2009), lorsque le flux de véhicules n'est pas homogène. Conformément au travail que nous présentons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), la demande de transports est représentée par le vecteur Q qui intègre trois classes de véhicules ($x=1$ pour les VP, $x=2$ pour les VUL, $x=3$ pour les PL) :

$$Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{pmatrix}$$

Précisons que la fonction de bien-être collectif $SW(Q)$ comporte désormais des dépenses d'usure et d'entretien de l'infrastructure (I_x) ainsi des externalités environnementales (GES, polluants locaux, bruit..., comprises dans $E_x(Q)$). Ce second modèle comporte donc la majorité des effets externes négatifs des transports étudiés dans la littérature, le principal absent étant l'accidentalité (CE Delft, 2019 ; Andersson, 2013) :

$$SW(Q) = U(Q) - \sum_{x \in M} Q_x (C_x(Q) + \tau_x) - \sum_{x \in M} Q_x E_x(Q) + \sum_{x \in M} Q_x (\tau_x - I_x) \quad (13)$$

La demande de mobilité sur l'OD-période émane d'un consommateur représentatif dont la fonction d'utilité est :

$$U(Q, h) = h + AQ - \frac{1}{2} {}^tQBQ \quad (14)$$

Avec h le bien numéraire (dont le prix est fixé à 1) et :

$$A = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} ; B = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & b_c \\ 0 & b_c & b_3 \end{pmatrix}$$

La fonction d'utilité décrite par l'équation (14) a été initialement proposée par Bowley (1924) pour les analyses multi-produits (voir aussi Amir et al., 2016). Dans le cas de notre modèle d'économie des transports, les paramètres de la matrice A décrivent ainsi les gains directs d'utilité liés aux déplacements routiers pour chaque classe de voyageurs. Les paramètres de la matrice B captent quant à eux la décroissance de l'utilité au fur et à mesure que le trafic augmente. Par ailleurs, cette seconde matrice suppose implicitement que les VUL et les PL sont des modes substituables, via le paramètre b_c . A contrario, les VP ne peuvent pas être ici remplacées par des véhicules de fret. Précisons que ces deux hypothèses ne sont pas du tout contraignantes et que tous les calculs qui suivent pourraient être

réalisés avec $bc=0$ ou, au contraire, en autorisant les automobilistes à substituer certains voyages avec des VUL ou des PL.

Les fonctions de demande inverse représentant l'utilité marginale des voyageurs, on écrit :

$$d^{-1}(Q) = \begin{bmatrix} d_1^{-1}(Q) \\ d_2^{-1}(Q) \\ d_3^{-1}(Q) \end{bmatrix} = A - BQ \quad (15)$$

Pour la fonction de coût marginal privé, nous supposons à nouveau une technologie de congestion linéaire :

$$C(Q) = \begin{bmatrix} C_1(Q) \\ C_2(Q) \\ C_3(Q) \end{bmatrix} = K + MQ \quad (16)$$

Avec :

$$K = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} ; M = \begin{pmatrix} c_1^1 & c_1^2 & c_1^3 \\ c_2^1 & c_2^2 & c_2^3 \\ c_3^1 & c_3^2 & c_3^3 \end{pmatrix}$$

Alors que les paramètres dans la matrice K décrivent, comme auparavant, le coût marginal privé des 3 modes lorsque l'infrastructure routière est « vide », ou peu congestionnée, ceux de la matrice M capturent les coûts imputables à la congestion routière dans un cadre multi-classes, à l'instar du phénomène que nous étudions dans Beziat, Koning et Toilier (2017) ou dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020). Plus précisément, les paramètres de la diagonale Nord Ouest – Sud Est mesurent l'effet d'un type de véhicule sur le coût marginal privé des véhicules du même type (c_1^1 approxime les pertes de temps pour les automobilistes liées au flux de VP par exemple). Les autres paramètres permettent quant à eux de caractériser le phénomène de « congestion réciproque ». Ainsi, c_1^3 représente l'influence du flux de PL sur le coût marginal privé des automobilistes.

Comme précisé ci-dessus, les modes routiers génèrent aussi des nuisances environnementales :

$$E(Q) = \begin{bmatrix} E_1(Q) \\ E_2(Q) \\ E_3(Q) \end{bmatrix} = e + XQ \quad (17)$$

Avec:

$$e = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} ; X = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_1^2 & x_1^3 \\ x_2^1 & x_2^2 & x_2^3 \\ x_3^1 & x_3^2 & x_3^3 \end{pmatrix}$$

Les paramètres dans la matrice e décrivent les externalités environnementales directement liées à la présence d'un type de véhicule sur la route, indépendamment du niveau de trafic. Ces paramètres sont ceux classiquement mobilisés dans la plupart des études qui traitent des externalités environnementales du trafic routier (CE Delft, 2019 ; RICARDO-AEA, 2014 ; Friedrich et Bickel, 2001). A l'inverse, les paramètres de la matrice X sont (à notre connaissance) moins fréquemment pris en compte. Ils ont pour but de capter les externalités environnementales « indirectes ». Comme étudié dans Coulombel, Dabanc, Gardrat et Koning (2018) ou dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), les émissions de polluants sont en effet fonction des consommations de carburants et des vitesses de circulation, elles-mêmes liées au flux de véhicules sur les routes au travers du phénomène de congestion (André et Hammarstrom, 2000 ; Grote et al., 2016). A titre d'exemple, le paramètre x_1^2 décrit la hausse des émissions d'une VP liée à la présence simultanée des VUL sur l'infrastructure, les VUL réduisant la vitesse de circulation de tous les véhicules à l'équilibre.

Avant de présenter la résolution de ce modèle, il reste à définir les deux derniers vecteurs :

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} ; T = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix}$$

Le vecteur I décrit les dépenses unitaires d'entretien de l'infrastructure supportées par l'Etat, indépendantes du niveau de trafic mais variables selon les types de véhicules. Le vecteur T représente quant à lui les divers prélèvements perçus par l'Etat dans la situation effective, également fonction des types de véhicules. S'il peut s'agir de péages d'accès aux infrastructures, comme auparavant, T peut également intégrer des taxes sur les carburants ou toutes autres formes de prélèvements spécifiques aux transports (voir Rapoport et al., 2018 ; Crozet et Koning, 2019b).

Comme dans le modèle précédent, nous commençons par déterminer l'équilibre effectif sur ce marché des transports, toujours indicé e et caractérisé par l'utilisation des routes Q^e . Cet équilibre s'obtient à nouveau lorsque le dernier usager égalise son bénéfice marginal au prix généralisé du déplacement :

$$d^{-1}(Q^e) = C(Q^e) + T \leftrightarrow A - BQ^e = K + MQ^e + T \quad (18)$$

Soit :

$$Q^e = (B + M)^{-1}(A - K - T) \quad (19)$$

Concernant l'équilibre optimal, toujours indicé o et caractérisé par le vecteur Q^o , il s'obtient en maximisant la fonction de bien-être collectif par rapport aux différents flux de véhicules, soit :

$$\frac{\partial SW(Q)}{\partial Q} = 0 \leftrightarrow A - BQ^o = K + (M + M^c + X + X^c)Q^o + e + I \quad (20)$$

Avec :

$$M^c = \begin{pmatrix} c_1^1 & c_2^1 & c_3^1 \\ c_1^2 & c_2^2 & c_3^2 \\ c_1^3 & c_2^3 & c_3^3 \end{pmatrix} = {}^tM ; X^c = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 \end{pmatrix} = {}^tX$$

Afin d'illustrer l'utilité des matrices M^c et X^c , il peut être judicieux de ne maximiser $SW(Q)$ que pour une classe donnée de véhicules (x). On retrouve la condition de premier ordre suivante, impliquant que le bénéfice marginal du dernier voyageur arrivant sur l'infrastructure est égal au coût marginal social son déplacement :

$$d_X^{-1}(Q_X^o) = C_X^o + mec_X^o \quad (21)$$

Avec C_X^o correspondant au coût marginal privé d'un véhicule x à l'optimum et mec_X^o décrivant son coût marginal externe, que l'on peut réécrire sous la forme :

$$mec_X^o = \left(\frac{\partial C_1}{\partial Q_X} + \frac{\partial E_1}{\partial Q_X}\right)Q_1^o + \left(\frac{\partial C_2}{\partial Q_X} + \frac{\partial E_2}{\partial Q_X}\right)Q_2^o + \left(\frac{\partial C_3}{\partial Q_X} + \frac{\partial E_3}{\partial Q_X}\right)Q_3^o + E_X^o + I_X \quad (22)$$

On constate que mec_X^o comprend des éléments fixes, tels que l'usure de l'infrastructure (I_X) ou le coût environnemental direct à l'optimum (E_X^o), mais aussi des effets externes variables car « croisés » avec les flux des autres véhicules. Ainsi, ajouter au flux total un véhicule x augmente, via le phénomène de congestion réciproque, le coût marginal privé des Q_1^o VP, des Q_2^o VUL et des Q_3^o PL simultanément présents sur l'infrastructure (cet effet étant pris en compte dans la matrice M^c). En outre, la présence de ce véhicule additionnel conduit à augmenter les émissions de polluants, et donc les coûts externes environnementaux, de tous les véhicules sur la route à l'optimum (via X^c).

En manipulant l'équation (20), on obtient :

$$Q^o = (B + M + M^c + X + X^c)^{-1}(A - K - e - I) \quad (23)$$

Les matrices M^c , X^c et X étant toutes composées de paramètres supposés positifs, on constate que $Q^o < Q^e$ dès que les taxes effectives (le vecteur T) ne couvrent pas les dépenses d'usure des infrastructures (I) et les coûts environnementaux qui ne dépendent pas du niveau de trafic (e). En outre, la sur-utilisation des routes par rapport à l'optimum est renforcée en raison des externalités environnementales indirectes et des coûts marginaux externes de congestion.

Les pertes de bien-être collectif liées à la sur-utilisation des routes peuvent maintenant s'approximer comme :

$$\begin{aligned} \Delta SW &= SW(Q^o) - SW(Q^e) \\ &= U(\Delta Q) - \sum_{X \in M} \Delta(Q_X C_X) - \sum_{X \in M} \Delta(Q_X E_X) - \sum_{X \in M} I_X \Delta(Q_X) \quad (24) \end{aligned}$$

Les pertes sociales sont ici supérieures au seul CEC présenté auparavant car, en plus de la variation de surplus économique des voyageurs ($U(\Delta Q) - \sum_{X \in M} \Delta(Q_X C_X)$), elles incluent également les économies réalisées par l'Etat sur l'entretien des routes à l'optimum⁹ ainsi que la baisse des externalités environnementales. Précisons à ce propos que ΔSW ne considère pas uniquement la baisse des trafics entre équilibres effectif et optimal (ΔQ), mais également les changements de coûts marginaux unitaires (privés ou environnementaux) dans la mesure où ces derniers sont fonction des flux. Finalement, les formes fonctionnelles (additives et linéaires) permettent de décomposer ΔSW entre les trois classes d'usagers des routes, et donc de mesurer leurs contributions respectives aux pertes collectives liées à la sur-utilisation des routes par rapport à l'optimum.

A l'instar du modèle précédent, une manière de réduire ces pertes sociales consiste à décentraliser l'équilibre effectif en modifiant les péages de telle sorte à ce que les usagers de l'infrastructure reçoivent un signal prix coïncidant avec une tarification au coût marginal social :

$$T^o = (M^c + X + X^c)Q^o + e + I \quad (25)$$

Le péage optimal sert donc à internaliser, pour une classe x de véhicules, le coût marginal externe de congestion infligé à tous les véhicules composant le trafic optimal Q^o . Par ailleurs, il doit également forcer les voyageurs à considérer l'impact de leurs décisions sur les dépenses

⁹ Comme on l'a constaté au travers des équations (2) et (13), les taxes et péages perçus par l'Etat sont des transferts qui disparaissent de la fonction de bien-être collectif, raison pour laquelle on ne compte ici que les économies liées aux dépenses d'entretien des routes si le trafic était moindre, à son niveau optimal.

d'entretien des routes ainsi que sur les nuisances environnementales, qu'elles soient directes ou indirectes¹⁰.

2.3 Optimum de second-rang

Bien que les progrès des NTIC puissent faciliter l'introduction de péages optimaux (voir par exemple de Palma et Lindsey, 2011) tels qu'indiqués par l'équation (25), les arguments précédents autour de leurs éventuels effets régressifs, de leur acceptabilité sociale et de la nécessaire compensation des transferts de surplus économique qu'ils induisent pourraient conduire les décideurs publics à ne mener qu'une réforme tarifaire partielle. Plutôt que de faire varier finement les péages suivant les types de véhicules et les niveaux de trafic, dans le temps comme dans l'espace, il est tout d'abord possible d'instaurer des montants visant à couvrir, non pas les coûts externes marginaux (de congestion, environnementaux et d'usure des routes), mais les coûts externes moyens, à l'instar des mesures entreprises à Londres, Singapour ou Stockholm. S'il n'est pas strictement conforme à la théorie, ce schéma de tarification permet notamment aux usagers des infrastructures d'avoir une certaine visibilité quant au montant des péages dont ils devront s'acquitter. Une autre possibilité consisterait à ne rendre payantes les routes que pour certains véhicules (Calthrop et al., 2007).

Nous illustrons à présent l'existence d'un tel scénario en supposant que les élus, ne souhaitant pas froisser leur électorat par exemple (de Borger et Proost, 2012 ; Hensher et Li, 2013), introduisent un péage optimal uniquement pour les véhicules de fret. Dans ce cas de figure, caractérisé par l'exposant $\bar{\sigma}$, la règle de décision pour les VP est inchangée, ce qui constitue une contrainte au sein du programme de maximisation de $SW(Q)$ et nous conduit donc à étudier un optimum de « second-rang » (par opposition à celui de « premier-rang » analysé auparavant). Les automobilistes utilisent toujours la route jusqu'à ce que leur bénéfice marginal égalise le prix généralisé effectif, soit, avec l'équation (18) :

$$d_1^{-1}(Q_1^{\bar{\sigma}}) = C_1^{\bar{\sigma}} + \tau_1 \leftrightarrow Q_1^{\bar{\sigma}} = \bar{a}_1 + \bar{q}_1^2 Q_2 + \bar{q}_1^3 Q_3 \quad (26)$$

Où :

¹⁰ En pratique, il existe une extrême variété de schémas de tarification des routes urbaines. Comme détaillé dans Crozet et Koning (2019b), Gostner (2018) ou ADEME (2014), les péages urbains diffèrent selon les périmètres ou leurs modalités d'application (accès à une infrastructure donnée, de cordon, de zone, kilométriques ou suivant la durée passée sur les routes). Conformément à la théorie, on observe également que les péages urbains varient suivant les types de motorisation, l'âge des véhicules ou encore le nombre de personnes qui les occupent. Cette pluralité des options se retrouvent également au niveau des technologies de collecte des péages urbains, mais également de leur efficacité socioéconomique.

$$\bar{a}_1 = \frac{a_1 - k_1 - \tau_1}{b_1 + c_1^1}, \quad \bar{q}_1^2 = -\frac{c_1^2}{b_1 + c_1^1}, \quad \bar{q}_1^3 = -\frac{c_1^3}{b_1 + c_1^1}$$

L'équation (26) implique que le flux de VP à l'optimum de second-rang $Q_1^{\bar{o}}$ est une fonction décroissante des flux de VUL et de PL, au travers d'un phénomène d'induction de trafic. Lorsqu'il y a moins de véhicules de fret sur les routes, les vitesses de circulation des VP vont en effet augmenter en raison d'une décongestion de la voirie, ce qui va réduire leur coût marginal privé et donc attirer les automobilistes dont le bénéfice marginal est supérieur.

Avant de résoudre ce programme de maximisation et de déterminer les flux de VUL et de VP pour l'optimum de second-rang, il peut être pertinent d'explicitier les conséquences de la contrainte imposée sur la règle de tarification des VP. Tout d'abord, on peut démontrer que la variation du bien-être collectif lorsqu'on ajoute au flux total une VP correspond à la différence entre le péage effectif de ces véhicules et leur coût marginal externe :

$$\frac{\partial SW(Q)}{\partial Q_1} = \tau_1 - mec_1 \quad (27)$$

Autrement dit, augmenter le trafic VP d'une unité réduira le bien-être collectif si les taxes actuelles ne couvrent pas leur coût marginal externe, et inversement en cas de « sur-taxation ».

En mobilisant l'équation (26), la dérivée première de $SW(Q)$ par rapport au flux de VUL (Q_2) devient :

$$\frac{\partial SW(Q)}{\partial Q_2} = \frac{\partial SW(Q)}{\partial Q_2} + \frac{\partial SW(Q)}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_1^{\bar{o}}}{\partial Q_2} = 0 \quad (28)$$

Soit :

$$\frac{\partial SW(Q)}{\partial Q_2} = d_2^{-1}(Q_2) - C_2^{\bar{o}} - mec_2 + (\tau_1 - mec_1)\bar{q}_1^2 = 0 \quad (29)$$

On retrouve ici une condition de premier ordre assez proche de celle présentée auparavant, mis à part la dernière partie de l'équation (29). Elle implique que le coût marginal social des VUL ($C_2^{\bar{o}} + mec_2 - (\tau_1 - mec_1)\bar{q}_1^2$) comporte des effets indirects, liés à la présence des VP sur les routes. Si les déplacements automobiles sont sous-tarifés ($\tau_1 - mec_1 < 0$), le coût marginal social des VUL est moindre que par rapport à l'optimum de premier-rang car la présence des véhicules de fret sur la route réduit le flux d'équilibre de VP, via l'équation (26), et donc les pertes de bien-être collectif.

L'écriture du système d'équations dans sa forme matricielle est semblable à celle présentée pour l'optimum de premier-rang, à une différence près. Nous introduisons désormais la matrice de « couplage » \bar{C} :

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \bar{q}_1^2 & 1 & 0 \\ \bar{q}_1^3 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Le vecteur de trafic d'équilibre pour l'optimum de second-rang $Q^{\bar{o}}$ est alors la solution de :

$$A - BQ^{\bar{o}} - (\mathbb{I}_3 - \bar{C})T = K + (M + \bar{C}M^c + \bar{C}X + \bar{C}X^c)Q^{\bar{o}} + \bar{C}e + \bar{C}I \quad (30)$$

Avec \mathbb{I}_3 la matrice identité qui permet de « renvoyer » l'éventuelle distorsion sur le marché des VP vers les flux optimaux de VUL et de PL, comme expliqué ci-dessus.

En manipulant l'équation (30), on obtient :

$$Q^{\bar{o}} = (B + M + \bar{C}M^c + \bar{C}X + \bar{C}X^c)^{-1}(A - K - \bar{C}e - \bar{C}I - (\mathbb{I}_3 - \bar{C})T) \quad (31)$$

On comprend à nouveau que $Q^{\bar{o}} < Q^e$ dès que les taxes actuellement fixées pour les VUL et les PL ne couvrent pas leurs coûts environnementaux indépendants des flux ni l'usure des routes qu'ils génèrent, la sur-utilisation de l'infrastructure étant une fois encore renforcée par l'existence de coûts marginaux externes de congestion et des coûts environnementaux indirects (dans la matrice inverse). Les VUL et PL étant, à l'optimum de second-rang, moins nombreux sur les routes qu'à l'équilibre effectif, l'équation (26) implique par ailleurs qu'il y aura un peu plus de VP dans cette configuration, via une induction de trafic.

L'estimation des pertes de bien-être collectif liées à la sous-tarification des coûts externes ne pose aucune difficulté : il suffit de calculer et de comparer $SW(Q)$ pour les niveaux de trafic Q^e et $Q^{\bar{o}}$ sur la base de l'équation (24). Conformément aux propos précédents, on pressent que les gains de bien-être collectif en passant de l'équilibre effectif à l'optimum de second-rang seront inférieurs à ceux calculés au cas où on migrerait de Q^e vers l'optimum de premier-rang.

Pour limiter la sur-utilisation de l'infrastructure et les pertes sociales qui en découlent, le décideur public peut encore une fois introduire un péage optimal pour les véhicules de fret, de telle sorte que $A - K - T^{\bar{o}} = MQ^{\bar{o}}$. Après simplification, on trouve¹¹ :

¹¹ L'équation (32) ne peut pas être simplifiée car la matrice \bar{C} est de rang 2 (une simplification la ferait donc "dégénérer"). Puisque $(\bar{C} - \mathbb{I}_3)T^{\bar{o}}$ est uniquement fonction de τ_1 , qui est ici exogène, la mise en œuvre de cette équation donne directement $T^{\bar{o}}$.

$$T^{\bar{o}} = (\bar{C} - \mathbb{I}_3)T^{\bar{o}} + \bar{C}(M^c Q^{\bar{o}} + X^c Q^{\bar{o}} + X Q^{\bar{o}} + e + I) \quad (32)$$

Lorsque les VP ne couvrent pas leurs coûts marginaux externes via le système de taxation effectif, les péages de second-rang pour les véhicules assurant le TMV doivent être inférieurs à ceux que nous avons trouvés pour l'optimum de premier-rang. Une réduction excessive des flux de VUL et de PL faisant suite à une réforme tarifaire trop ambitieuse attirerait en effet beaucoup de VP, avec leurs effets néfastes sur le bien-être collectif.

Même s'il découle d'un cadre théorique relativement simple, ce modèle de congestion routière multi-classes ainsi que la résolution empirique que nous en proposons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) sont originales pour au moins deux raisons. Tout d'abord, nous explicitons et quantifions les conséquences directes et indirectes liées à la présence des véhicules de fret sur les routes, les PL et les VUL étant fréquemment occultés des études en économie des transports. Ensuite, nous avons ici illustré le cas de l'optimum de second-rang en supposant que seuls les véhicules de fret voyaient leur tarification évoluer. Dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), nous étudions différentes configurations (où seules les VP sont taxées par exemple), ce qui nous permet de proposer une grande variété de péages et de pertes de bien-être collectif. Ce faisant, nous fournissons aux décideurs publics de riches informations qui pourraient être utiles au cas où ils souhaiteraient, à terme, introduire des péages d'accès aux infrastructures routières.

2.4 Principales limites

Ces développements théoriques souffrent de simplifications inhérentes au cadre de modélisation mobilisé. Ces limites caractérisant également nos travaux empiriques, il est utile d'en mentionner certaines afin de cerner le domaine de validité de nos résultats.

Que ce soit dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) ou dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), précisons tout d'abord que nous adoptons une approche « statique » au sens où les flux et les coûts qui en découlent sont supposés stables dans le temps et identiques pour tous les usagers des infrastructures une fois atteint l'équilibre (effectif ou optimal). Autrement dit, notre modélisation ne permet pas de réellement capter le caractère dynamique de la congestion alors même que la demande de mobilité et la qualité de service dont bénéficient les usagers peuvent grandement fluctuer au sein d'une période donnée. En ne représentant pas explicitement les horaires, nous faisons par ailleurs abstraction du fait que les déplacements sont une consommation intermédiaire nécessaire à la réalisation d'un ensemble d'activités, pour lesquelles les individus ont des préférences intrinsèques. Or, lorsque les infrastructures fonctionnent comme un « goulot d'étranglement », les gens peuvent souhaiter décaler

leurs horaires de départ (du domicile par exemple) ou d'arrivée à destination (le bureau) afin de ne pas perdre trop de temps sur les routes ou pour avoir une place assise dans les TP (voir Arnott et al., 1990 ; de Palma et al., 2017 ; Small et Verhoef, 2007). Cette seconde source d'inefficacité peut s'avérer très coûteuse car les voyageurs subissent alors des « scheduling costs » (Small, 2012), justifiant ainsi le recours aux modèles dynamiques pour étudier des péages de congestion qui soient finement modulables dans le temps et permettent de lisser les pointes.

Une seconde limite de notre travail concerne la description de l'offre de transports, délibérément simplifiée. Si la prise en compte des seules dépenses d'usure des routes dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) n'est pas problématique dans une optique de court terme, les décideurs publics pourraient jouer sur les capacités d'accueil des infrastructures afin de réduire leur congestion à moyen ou long-termes, et ce même si l'efficacité de telles mesures est questionnable (Duranton et Turner, 2011 ; Denant-Boëmont et Hammiche, 2012). Par ailleurs, le choix fait dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) de considérer l'offre de métros comme étant fixe et exogène s'écarte des nombreux travaux qui étudient les rendements d'échelle croissants dans les TP (Jansson, 1979, Basso et Jara-Diaz, 2010 ; Proost et Dender, 2008 ; Graham et al., 2020). Même à court terme, l'opérateur peut en effet décider d'accroître le nombre de véhicules en circulation afin de réduire le temps d'attente, attirer des voyageurs et au final réduire le coût moyen d'exploitation. Ce cercle vertueux - qui peut également être impulsé par une subvention publique - n'est toutefois pas infini et, lorsque l'offre n'est plus ajustable en raison de contraintes techniques notamment, les économies d'échelle font place à des coûts de congestion. Si notre hypothèse de travail dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) peut se justifier par une offre de métros déjà très élevée à Paris durant les pointes, elle simplifie à l'extrême la description du fonctionnement des TP et nous prive d'une réflexion plus riche sur les leviers qui pourraient être activés afin d'en limiter la saturation. A l'instar de l'information donnée aux voyageurs sur les niveaux de fréquentation dans les différentes rames (Kim et al., 2019), la taille et le design intérieur des véhicules peuvent en effet constituer de puissants vecteurs d'amélioration (Coulombel et Monchambert, 2019 ; Wardman et Murphy, 2015).

Une troisième limite de notre approche théorique, intimement liée à ces derniers éléments, concerne la vue partielle que nous portons sur l'efficacité réelle et sur la diversité des politiques publiques mises en œuvre afin de réduire les pertes collectives liées à la congestion des transports (ou aux pertes environnementales). Même si nous avons souligné que les péages optimaux induisent d'importants transferts de surplus économique et posent de réels défis d'acceptabilité sociale, nous avons par exemple négligé les coûts (technologiques, organisationnels ou administratifs) liés à leur collecte, dont l'ampleur est souvent significative et peut détériorer le ratio bénéfices/coûts d'une telle intervention (Gostner, 2018 ; ADEME,

2014)¹². Par ailleurs, il est tout à fait possible d'introduire un signal prix négatif. Ainsi, plusieurs études ont démontré la pertinence de subventions ou de rétributions pécuniaires pour les individus qui acceptent de ne pas se déplacer lorsque les réseaux sont saturés ou qui décalent les horaires de leurs déplacements hors des pointes (Tang et al., 2020 ; Halvorsen et al., 2016). Il est en outre envisageable de jouer sur la réglementation et d'interdire l'accès à certaines infrastructures pour certains types de véhicules durant certaines périodes de la journée (Ellison et al., 2013 ; Hanna et al., 2017 ; ADEME et al., 2018 ; Wolff, 2014) à l'instar des restrictions sur les autoroutes pour les PL lors des grands départs estivaux, des « zones à faibles émissions » ou encore des « high occupancy lanes ». Si les droits individuels à la mobilité ont plutôt vocation à réduire les externalités environnementales (dans une optique « à la Coase »), ce dispositif pourrait finalement être adapté pour limiter la congestion routière (Yang et Wang, 2011), sans toutefois occulter les importants coûts liés à la mise en œuvre d'un marché dédié.

La dernière principale faiblesse que nous souhaitons mentionner a trait à la règle de décision binaire (continuer de se déplacer ou non) qu'adoptent les usagers des infrastructures dans nos modèles théoriques lorsqu'ils font face à une évolution du prix généralisé. Comme mentionné précédemment, une approche dynamique de la congestion permettrait tout d'abord de considérer les modifications des horaires de départ et/ou d'arrivée (Arnott et al., 1990 ; de Palma et al., 2017), ce qui serait notamment pertinent dans le cadre des stratégies de livraisons nocturnes (Holguin-Véras et al., 2006). Par ailleurs, si nous autorisons une substitution entre VUL et PL dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), il est tout à fait possible que les transporteurs et chargeurs confrontés à un péage kilométrique essaient de jouer sur le remplissage des véhicules (de Bok et al., 2020), lorsque les contraintes logistiques les y autorisent. D'une manière similaire, on peut supposer que certains automobilistes souhaitant limiter leurs dépenses monétaires acceptent des surcoûts temporels et se mettent en place des pratiques collaboratives comme le covoiturage (Coulombel et al., 2019). Surtout, notre modélisation de la congestion gagnerait grandement à coupler les approches proposées dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) et dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018). En l'état, nous supposons en effet que les automobilistes dont le consentement marginal à payer est trop faible cessent de se déplacer une fois introduit le péage. Or, un modèle complet devrait les autoriser à changer de mode et à migrer vers les TP par exemple. Ce faisant, nous pourrions étudier les « effets croisés » de congestion - à l'instar de ce que proposent Kilani et al. (2014), Tirachini et al. (2014) ou Batarce et al. (2016) -, le report des VP

¹² Ce point pourrait être critique surtout pour la tarification des routes dans la mesure où la taxation des carburants, qui diffère foncièrement des péages urbains, constitue aujourd'hui le principal levier monétaire (hors péages autoroutiers). Concernant les TP, la plupart des usagers en Ile-de-France disposent de cartes d'abonnement qui pourraient facilement être utilisées pour introduire une tarification internalisante de la congestion.

vers les métros pouvant y détériorer les conditions de déplacement si les rendements croissants sont épuisés. Autrement dit, on pressent que les coûts marginaux sociaux des modes privés et collectifs, et donc leurs niveaux respectifs de tarification et de fréquentation optimale, sont interdépendants lorsqu'ils sont caractérisés par de la congestion¹³.

3. Stratégies empiriques

La mise en œuvre de ces modèles théoriques nécessite des fonctions empiriques permettant de caractériser la congestion des transports. Pour rappels, cette externalité technologique implique que la qualité de service dont bénéficient les usagers se dégrade au fur et à mesure que la fréquentation d'une infrastructure augmente. Dans un langage mathématique, le coût marginal privé des déplacements $c(q)$ est une fonction croissante du niveau de demande q :

$$c(q) = a(q) + w(q)t(q) \quad (33)$$

Avec $a(q)$ les dépenses monétaires, $t(q)$ la durée du déplacement et $w(q)$ la valeur du temps de transport.

Si les trois arguments du coût généralisé peuvent théoriquement tous dépendre de q , que ce soit pour les modes routiers et pour les TP, les articles que nous mobilisons ici se limitent à l'étude de trois phénomènes :

- Dans Beziat, Koning et Toilier (2017), Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) ou Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) nous nous intéressons à l'impact de la congestion routière sur les temps de parcours $t(q)$ dans un cadre multi-classes.
- Dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) ou Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), nous mobilisons les relations existantes entre consommation de carburants et vitesses de circulation (implicites dans $a(q)$) pour étudier les conséquences indirectes et environnementales de la congestion routière.
- Dans Haywood et Koning (2015), Haywood, Koning et Monchambert (2017) ou Haywood, Koning et Prud'homme (2018), nous analysons

¹³ Parmi les autres limites de nos modèles théoriques, mentionnons la non-prise en compte des accidents (pourtant liés au niveau de fréquentation des infrastructures), les effets de la congestion sur la fiabilité des horaires de voyages (Xiao et al., 2017), la prise en compte du coût d'opportunité des fonds publics (Proost et van Dender, 2008) ou les effets de la congestion sur l'offre et la qualité du travail, via l'intensité des économies d'agglomération dans le second cas de figure (Eliasson et Fosgerau, 2018 ; Hörcher et al., 2020).

l'influence de la fréquentation dans les wagons des métros sur la valeur du temps de transport $w(q)$ et sur le ressenti des voyageurs.

3.1 Congestion routière multi-classes

Nous nous intéressons ici seulement à la congestion routière « récurrente » et nous négligeons les ralentissements causés de manière ponctuelle par les accidents ou les travaux sur la voirie (Skabardonis et al., 2003). Nous ignorons également la congestion engendrée par le stationnement illégal des véhicules sur les routes, notamment dans le cadre des livraisons urbaines (Beziat, 2017). Ces précisions apportées, les ingénieurs ont développé diverses fonctions reliant les niveaux de trafics sur les routes et les temps de parcours. La plus utilisée de ces fonctions « temps-débits » provient du « Bureau of Public Roads » américain, d'où son appellation de « fonction BPR » (TRB, 2010 ; Buisson et Lessort, 2010) :

$$T = T_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{F}{K} \right)^\beta \right) \quad (34)$$

Avec T le temps de parcours effectif sur un axe routier donné, T_0 le temps « à vide », F le flux de véhicules présents sur la route et K sa capacité d'accueil théorique.

Les paramètres α et β (>0) décrivent la déviation de T par rapport à T_0 lorsque le « flow-to-capacity ratio » ($\frac{F}{K}$) augmente. Ils permettent donc de capter le phénomène de congestion routière, qui dépend également du flux de véhicules et des caractéristiques des voiries :

$$\frac{\partial T}{\partial F} = T_0 \alpha \beta \left(\frac{F}{K} \right)^{\beta-1} > 0 \quad (35)$$

Cette première fonction suppose que le flux total F est composé de véhicules homogènes. Dans un cadre d'analyse multi-classes (Dafermos, 1972 ; Müller et Schiller, 2015), il est possible de la réécrire sous la forme :

$$T = T_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{F_p + \delta F_G}{K} \right)^\beta \right) \quad (36)$$

Avec F_p le flux de « petits » véhicules (les VP et les VUL par exemple) et F_G le flux de « grands » véhicules (les PL). Le paramètre δ permet d'exprimer l'occupation de la voirie par les grands véhicules en un « équivalent

voiture ». Il est usuel de trouver dans la littérature des valeurs de δ comprises entre 2 et 4 (Webster et Elefteriadou, 1999). Ces estimations impliquent donc que les PL occupent (au moins) le double d'espace viaire que les VP, avec des effets proportionnels sur la croissance des temps de parcours lorsqu'arrive un véhicule sur l'infrastructure :

$$\frac{\partial T}{\partial F_G} = \delta \frac{\partial T}{\partial F_p} > 0 \quad (37)$$

Les modélisateurs ayant bien souvent une connaissance partielle, voire nulle, des flux de PL dans les zones urbaines, certaines études approximent les pertes de temps causées par les grands véhicules en supposant qu'ils représentent un certain pourcentage du trafic et en appliquant ce coefficient d'équivalence au coût marginal externe de congestion estimé pour les VP.

Précisons qu'une autre manière de considérer l'effet du trafic sur les temps de parcours dans un cadre d'analyse multi-classes a été proposée par Yun et al. (2010) :

$$T = T_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{F_p}{K} \right)^\beta \left(1 + \frac{F_G}{F_T} \right)^\gamma \right) \quad (38)$$

Avec F_T représentant le flux total sur l'axe routier. Cette variante de la fonction BPR est cohérente avec celles précédentes puisque, à l'instar de l'équation (36), on retrouve bien l'équation (34) lorsqu'il n'y a pas de PL sur la route.

Bien que ces relations temps-débits permettent de capter les incidences des véhicules de fret sur la congestion routière et soient largement mobilisées dans les modèles d'affectation du trafic, elles présentent certaines limites. Ainsi, elles ont toutes pour variable dépendante la vitesse moyenne d'un déplacement alors qu'on pourrait penser que le temps nécessaire à parcourir un kilomètre diffère entre les VP et les PL. Par ailleurs, elles supposent implicitement que les effets de congestion sont symétriques : les pertes de temps pour les VP causées par un PL marginal sont, par construction, égales à celles subies par les grands véhicules.

3.1.1 Utilisation de données individuelles

Afin de dépasser ces limites, nous avons proposé dans Beziat, Koning et Toilier (2017) une approche originale rendue possible grâce à la disponibilité de données individuelles sur les temps de parcours routiers en Ile-de-France, aussi bien pour les automobilistes que pour les PL et les VUL (voir annexe 7.1 et Toilier et al., 2016). Bien qu'elles soient déclaratives et donc sujettes à caution, car ne décrivant pas nécessairement les conditions

réelles de déplacement, ces informations nous ont permis d'estimer (via les MCO) la forme réduite de l'équation (38), où D_{ikt} représente la durée de déplacement de l'individu i , sur l'OD k , à la période t :

$$\ln(D_{ikt}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(D_{ik0}) + \alpha_2 \ln\left(\frac{F_{ipkt}}{K_{ik}}\right) + \alpha_3 \ln\left(1 + \frac{F_{iGkt}}{F_{iTkt}}\right) + \alpha_4 X_{ikt} \\ + I_i^p [\widehat{\alpha}_1 \ln(D_{ik0}) + \widehat{\alpha}_2 \ln\left(\frac{F_{ipkt}}{K_{ik}}\right) + \widehat{\alpha}_3 \ln\left(1 + \frac{F_{iGkt}}{F_{iTkt}}\right)] + \varepsilon_i \quad (39)$$

Avec D_{ik0} le temps de parcours « à vide » sur cette OD (indépendant de la période t), F_{ipkt} le flux moyen de petits véhicules (VP et VUL) rencontré par l'individu i sur cette OD-période, K_{ik} les capacités théoriques d'accueil des routes sur cette OD (indépendantes de la période), F_{iGkt} le flux moyen de grands véhicules (PL) rencontré par l'individu i sur cette OD-période et F_{iTkt} le flux moyen total. Le vecteur X_{ikt} contrôle pour les caractéristiques de l'individu i , de la période t et de l'OD k .

Trois précisions sont nécessaires à une bonne compréhension de l'approche que nous proposons dans Beziat, Koning et Toilier (2017). Tout d'abord, l'équation (39) synthétise une fonction de congestion multi-classes agrégée car elle décrit des temps de parcours individuels pour tout un déplacement, et non pour les différentes étapes de ce trajet. Ensuite, la transformation logarithmique appliquée aux variables continues permet d'interpréter les estimateurs comme des élasticités : α_2 mesure ainsi l'évolution (en %) du temps de parcours de l'individu i si le « flow-to-capacity ratio » de petits véhicules qu'il rencontre durant son trajet augmente de 1%. Surtout, le recours aux « termes d'interaction » nous permet de caractériser et de différencier les effets de congestion réciproque. Si l'individu i conduit un PL, l'indicatrice I_i^p vaut 0 et l'élasticité du temps de parcours par rapport à $\frac{F_{ipkt}}{K_{ik}}$ est égale à α_2 . A contrario, si cet individu conduit un VUL ou une VP, I_i^p vaut 1 et l'élasticité sera alors égale à $\alpha_2 + \widehat{\alpha}_2$. Les paramètres marqués d'un chapeau (et leur significativité statistique) autorisent donc de capter les effets différenciés des conditions de circulation sur les temps de parcours.

Cette connaissance peut s'avérer utile pour appréhender des coûts marginaux externes de congestion variables selon les types de véhicules, mais aussi pour décomposer les pertes de temps infligées par un véhicule additionnel entre les différents utilisateurs des routes à l'instar du phénomène décrit par l'équation (22). Afin d'illustrer nos propos, nous réécrivons tout d'abord le temps de parcours de l'individu i comme :

$$D_{ikt} = A_i D_{ik0}^{\mu_1} \left(\frac{F_{ipkt}}{K_{ik}}\right)^{\mu_2} \left(1 + \frac{F_{iGkt}}{F_{iTkt}}\right)^{\mu_3} \quad (40)$$

Avec $A_i = \exp(\alpha_0 + \alpha_4 X_{ikt})$, $\mu_1 = \alpha_1 + \widehat{\alpha}_1$, $\mu_2 = \alpha_2 + \widehat{\alpha}_2$ et $\mu_3 = \alpha_3 + \widehat{\alpha}_3$.

Cette équation permet de calculer la hausse de la durée du déplacement de l'individu i liée à l'arrivée dans le flux total d'un petit véhicule (on occulte ici les OD et la période) :

$$\frac{\partial D_i}{\partial F_{ip}} = \frac{A_i D_{i0}^{\mu_1} \mu_2 \left(\frac{F_{ip}}{K_i}\right)^{(\mu_2-1)} \left(1 + \frac{F_{iG}}{F_{iT}}\right)^{\mu_3}}{K_i} \quad (41)$$

D'une manière similaire, si on ajoute un PL, la durée de parcours de i va augmenter :

$$\frac{\partial D_i}{\partial F_{iG}} = \frac{A_i D_{i0}^{\mu_1} \left(\frac{F_{ip}}{K_i}\right)^{\mu_2} \mu_3 \left(1 + \frac{F_{iG}}{F_{iT}}\right)^{(\mu_3-1)}}{F_{iT}} \quad (42)$$

On comprend que la croissance des temps de parcours causée par une hausse marginale du flux dépend des caractéristiques des individus i impactés, via A_i et/ou les paramètres μ . Sur la base des résultats économétriques, nous sommes donc en mesure d'estimer les pertes temporelles externes totales liés à l'arrivée sur les routes d'une VP additionnelle (pte_p) comme :

$$pte_p = \frac{\partial D_p}{\partial F_p} F_p + \frac{\partial D_G}{\partial F_p} F_G \quad (43)$$

La variable D_p représente la durée moyenne du déplacement d'un petit véhicule et D_G la durée moyenne du trajet d'un grand véhicule. Fort logiquement, un calcul similaire permettrait d'estimer et de décomposer les pertes de temps additionnelles liées à un PL marginal sur les routes.

La modélisation de la congestion routière que nous proposons dans Beziat, Koning et Toilier (2017) présente finalement une troisième originalité. Elle autorise en effet une estimation innovante du « coefficient d'équivalence » entre grands et petits véhicules (le paramètre δ dans l'équation (36)). Il semble en effet réaliste d'assimiler ce paramètre technique à un « taux marginal de substitution ». Dans cette optique, δ décrirait la variation du temps de parcours de l'individu i si on venait à remplacer un petit véhicule sur son trajet par un grand véhicule :

$$\bar{\delta}_i = \frac{\frac{\partial D_i}{\partial F_{iG}}}{\frac{\partial D_i}{\partial F_{ip}}} = \frac{\mu_3 F_{ip}}{\mu_2 F_{iT}} \left(1 + \frac{F_{iG}}{F_{iT}}\right)^{-1} \quad (44)$$

Cette dernière équation est pertinente car introduisant une autre forme d'hétérogénéité dans l'analyse des effets de la congestion routière. Contrairement aux pratiques usuelles consistant à appliquer un coefficient d'équivalence exogène, on constate en effet que $\bar{\delta}_i$ dépend des conditions de circulation, de la composition du trafic, mais aussi des caractéristiques du conducteur i impacté, via les paramètres μ (voir annexe 7.5).

3.1.2 Utilisation d'un modèle d'affectation

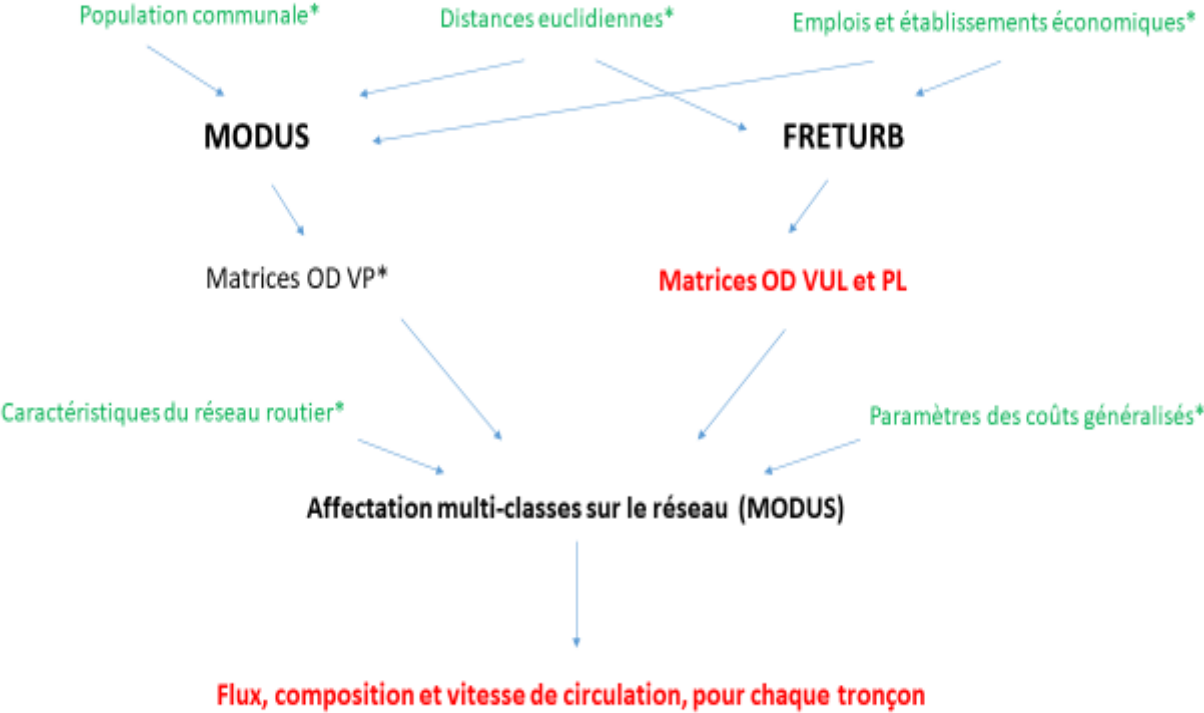
Malgré l'originalité de notre approche dans Beziat, Koning et Toilier (2017), les résultats qui en découlent sont approximatifs. Outre le fait que les durées de parcours utilisées comme variable dépendante soient des données déclaratives, les conditions de circulation mobilisées comme variables explicatives ont été reconstituées sans s'intéresser précisément aux choix des itinéraires routiers. D'une manière alternative, nous avons mis en œuvre - dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) et dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) - un modèle d'affectation du trafic largement éprouvé en Ile-de-France. Une de nos principales contributions a consisté à alimenter le modèle MODUS avec des données originales sur les flux de VUL et de PL. La figure 2 détaille l'architecture globale du travail de modélisation, commune à nos deux articles, et l'annexe 7.2 présente l'ensemble des données mobilisées.

Si MODUS a fait l'objet de nombreuses applications par les services de la DRIEA, ce « modèle à 4 étapes » (Ortuzar et Willumsen, 2011) a rarement été couplé avec les sorties de Freturb pour intégrer les véhicules de fret dans le cadre d'une affectation multi-classes. Sans détailler *in extenso* l'outil de simulation Freturb (développé au LAET), précisons que les régularités statistiques qui le structurent proviennent d'observations collectées dans quelques agglomérations françaises durant les années 90' et largement confirmées depuis (Toilier et al., 2018 ; Bonnafous et al., 2013 ; Routhier et Toilier, 2007 ; Bonnafous et al., 2016). Tandis que les améliorations progressivement apportées à Freturb permettent aujourd'hui à ses utilisateurs d'étudier différentes facettes du transport de marchandises en ville (bilan environnemental, occupation de la voirie et besoins de stationnement, etc...), nous l'avons essentiellement utilisé afin d'obtenir des matrices OD pour les VUL et les PL, dans une perspective de couplage avec le module affectation de MODUS.

Plus précisément, nous avons commencé par alimenter Freturb avec un fichier administratif (SIRENE) qui décrit la distribution communale des établissements économiques franciliens en 2012, suivant leur taille, leur secteur d'appartenance ou encore leurs types de locaux. Sur la base d'une première typologie d'établissements, Freturb estime alors le nombre hebdomadaire de mouvements de marchandises (livraisons et/ou enlèvements) ayant pour origine et/ou destination une zone géographique

donnée. En mobilisant une seconde typologie qui caractérise les « profils logistiques » des établissements (véhicules utilisés, trace directe ou tournée, compte propre ou d'autrui) ainsi que différentes caractéristiques des territoires (éloignement au centre de l'agglomération, densité de populations et d'activités, etc..), Freturb génère ensuite des « fonctions de distances » qui représentent les parcours moyens des mouvements de marchandises connectés à un espace donné (que ce soit pour les flux OD ou pour ceux de transit). Une fois agrégés pour tous les territoires d'étude et croisés selon une logique euclidienne, ces résultats permettent finalement d'estimer des matrices OD pour le TMV, différenciées suivant les types de véhicules (VUL, PL rigides ou PL articulés) et pour trois grandes périodes de la journée (pointes du matin, HPM, et du soir, HPS, heures creuses, HC).

Figure 2 – Architecture du modèle de trafic multi-classes



Dans un second temps, nous avons donc combiné ces sorties de Freturb avec des matrices OD décrivant les déplacements automobiles en Ile-de-France, ces informations étant quant à elles issues des étapes de génération et de distribution de MODUS. En considérant les caractéristiques du réseau routier (à chaque tronçon est associée une fonction temps-débit comme indiquée par l'équation (36)), des facteurs d'équivalence exogènes pour prendre en compte l'occupation de la voirie par les véhicules de fret ainsi que différents paramètres de coûts (en liens avec l'équation (45) ci-

dessous), nous estimons alors l'affectation d'équilibre sur le réseau. Cette seconde étape nous donne donc des informations, au niveau de chaque tronçon, sur les flux de véhicules, la composition du trafic et la vitesse moyenne de circulation.

Dans un langage économique, cette affectation du trafic s'assimile (plus ou moins, Dixit et Denant-Boëmont, 2014) à un « équilibre de Nash » où chaque voyageur n'a plus intérêt à modifier son choix d'itinéraire étant données les décisions stratégiques des autres usagers. Plus précisément, les « principes de Wardrop » (Ortuzar et Willumsen, 2011 ; Correa et Stier-Moses, 2011) impliquent que l'affectation d'équilibre est atteinte lorsque tous les individus sont « indifférents » entre les itinéraires permettant de réaliser leurs trajets, i.e. les routes candidates ont un coût généralisé équivalent, et que les itinéraires non-utilisés présentent des coûts généralisés supérieurs. Dans notre cadre d'analyse multi-classes, la fonction de coût généralisé pour le véhicule i empruntant l'itinéraire k s'écrit comme :

$$c_{ik} = l_{ik}a_i + t_{ik}(\alpha_i^v w_i^v + \alpha_i^m w_i^m + w_i^t) \quad (45)$$

Avec l_{ik} la distance parcourue par i sur la route k , a_i les dépenses monétaires kilométriques (incluant les taxes et les éventuels péages), t_{ik} le temps de parcours, α_i^v le nombre de voyageurs dans le véhicule, w_i^v la valeur du temps des voyageurs, α_i^m la quantité de marchandises transportées dans i , w_i^m la valeur du temps des marchandises (« valeur du temps du chargeur ») et w_i^t le coût d'opportunité lié à l'immobilisation des véhicules (« valeur du temps du transporteur »).

L'équation (45) appelle trois commentaires. Tout d'abord, la congestion routière guide l'affectation d'équilibre au travers du temps de parcours t_{ik} . Si un itinéraire est peu chargé, les véhicules y roulent plus vite, ce qui attire de nouveaux voyageurs et, au final, réduit la vitesse de circulation. Ce processus itératif a lieu jusqu'à ce que les différents usagers n'aient plus d'intérêt à modifier leurs choix de route et donc que vitesses et flux atteignent les valeurs d'équilibre. On comprend ensuite que, pour une durée de voyage donnée, les différences entre les classes d'usagers peuvent aboutir à des décisions hétérogènes. Ainsi, certains véhicules pourraient systématiquement privilégier les itinéraires rapides tandis que d'autres valoriseront plutôt ceux associés à des dépenses monétaires moindres. Finalement, cette fonction de coût généralisé ne comporte pas de coûts liés à d'éventuelles déviations par rapport à un horaire idéal de départ et/ou d'arrivée, impliquant donc que le modèle d'affectation ici utilisé est « statique » et que les individus n'arbitrent pas entre les différentes périodes de la journée pour leurs déplacements.

Que ce soit dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) ou dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), nous n'avons pas utilisé de

la même manière les résultats empiriques obtenus à partir de ce socle commun de modélisation. La finalité première de notre travail dans Coulombel, Dabanc, Gardrat et Koning (2018) portant sur les émissions de polluants liées au transport routier de fret en Ile-de-France, nous avons uniquement différencié les principaux indicateurs de trafic selon plusieurs grandes zones de la région capitale. Bien que cette analyse descriptive mette parfaitement en lumière les relations existantes entre congestion routière, flux de véhicules et agglomération spatiale des activités, ces informations ne permettent pas de résoudre le modèle pigouvien présenté dans la section précédente.

Afin de calculer les pertes de bien-être collectif liées à la sous-tarification des transports routiers, nous avons dupliqué dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) la chaîne de modélisation synthétisée sur la figure 2 en ajustant de +/-10% et +/-25% les matrices OD estimées via Freturb et MODUS, pour chaque classe de véhicules conjointement et/ou séparément. L'intuition derrière cette approche est simple. Les résultats du modèle d'affectation multi-classes, une fois sommés puis normalisés pour tout le réseau routier francilien, donnent les coûts privés kilométriques « moyens » des VP, des VUL et des PL pour un niveau de trafic qui correspond à l'équilibre effectif Q_e . Or, les paramètres qui composent les matrices K et M dans l'équation (16) ne peuvent être déterminés qu'en connaissant plusieurs points de la distribution (coût marginal privé ; flux de véhicules). En faisant varier les matrices OD et en déterminant, pour chaque niveau de trafic associé, les coûts privés moyens des différents véhicules, nous recréons d'une manière artificielle cette distribution. Au final, nous utilisons les résultats des 375 simulations¹⁴ pour estimer l'équation suivante (via les MCO) :

$$c_i(Q_1, Q_2, Q_3) = k_i + c_i^1 Q_1 + c_i^2 Q_2 + c_i^3 Q_3 \quad (46)$$

Avec i représentant la classe de véhicules ($i=1$ si VP, $i=2$ si VUL, $i=3$ si PL) et Q_i les flux correspondants. Le paramètre k_i représente le coût généralisé du véhicule i si la route est vide (ou peu congestionnée) et les paramètres c_i^j permettent de capter l'effet du flux de véhicules j sur le coût marginal privé du véhicule i .

3.2 Congestion routière et polluants

Les pertes sociales liées à la sous-tarification des déplacements routiers ne proviennent pas uniquement de la congestion. Comme formalisé précédemment, les usagers des routes peuvent également ne pas

¹⁴ On obtient 375 simulations car il y a 3 classes de véhicules (VP, VUL, PL), 5 niveaux de trafic possibles pour chacune des classes (75%, 90%, 100%, 110%, 125%) et 3 périodes temporelles (HPM, HPS, HC). Soit, $375=3*(3^5)$.

internaliser les nuisances environnementales liées à leur mobilité et infligées à autrui : les riverains (et les sols ou les bâtiments) dans le cas des émissions de polluants locaux (voire sonores) ; l'Humanité et la biosphère dans le cas des GES. S'il existe une riche littérature qui quantifie, valorise et cherche à limiter ces différentes « défaillances de marché » (CE Delft, 2019 ; CGSP, 2013 ; Parry et al., 2007 ; Muller et Mendelsohn, 2007 ; Kampa et Castanas, 2008 ; Friedrich et Bickel, 2001 ; Ducos, 2014), les résultats que nous proposons dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) et dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) sont originaux car ils traitent explicitement des émissions de polluants engendrées par TMV. Par ailleurs, ils aboutissent à une fonction qui rend endogènes les coûts externes environnementaux par rapport aux flux des différents véhicules. L'annexe 7.2 présente l'ensemble des matériaux et données utilisés pour ces analyses environnementales.

Le point de départ de notre raisonnement concerne la consommation de carburants, les émissions de polluants étant en effet reliées à cette variable. Comme illustré dans le Tableau 1, les consommations unitaires moyennes dépendent de plusieurs facteurs propres aux véhicules : leurs tailles et leurs poids, le type de motorisation (essence ou diesel), leur âge moyen.

Tableau 1 – Consommations unitaires moyennes (litres/100km)

	VP		VUL		PL
	<i>Essence</i>	<i>Diesel</i>	<i>Essence</i>	<i>Diesel</i>	<i>Diesel</i>
Flottes de 2004	7,80	6,62	8,71	9,41	36,25
Flottes de 2008	7,75	6,60	8,36	9,29	35,26
Flottes de 2012	7,66	6,36	8,29	9,20	34,97
Flottes de 2016	7,27	6,06	7,87	8,78	33,97

Source : Calculs des auteurs à partir des données Statista.com

Si des variables externes jouent également sur les consommations unitaires (pente des routes, taux de chargement, température extérieure, etc..., voir Ntziachristos et Samaras, 2000), ces effets peuvent être considérés comme étant de second ordre et n'ont pas été explicitement étudiés dans nos travaux. A contrario, nos analyses mobilisent les relations techniques existantes entre consommations de carburants, émissions de polluants et vitesses de circulation routière (André et Hammarstrom, 2000). Ce faisant, nous étudions les conséquences indirectes, car environnementales, de la congestion, comme illustré dans l'équation (17) de la section précédente. En pratique, nous avons utilisé dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) et dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) les résultats du modèle d'affectation multi-classes obtenus via MODUS pour alimenter le calculateur d'émissions COPCETE (Demeules et Larose, 2012).

Le logiciel COPCETE a été développé par les services Ministériels sur la base de la méthodologie européenne COPERT IV (Ntziachristos et al., 2009). Il

permet d'estimer les émissions de différents polluants atmosphériques directement au niveau des tronçons routiers. Précisons que, contrairement à d'autres outils qui évaluent les émissions des véhicules sur la base de leurs trajectoires individuelles (voir Shorshani et al., 2015), la méthodologie COPERT est macroscopique et donc appropriée pour évaluer l'impact environnemental du trafic routier dans des conditions moyennes de circulation. Formellement, les émissions totales ET_j^k du polluant j sur la route k sont calculées comme :

$$ET_j^k = L_k \sum_i \sum_x \phi_i^x Q_i^k e_x^{ij}(V_k) \quad (47)$$

Avec L_k la longueur du tronçon routier k, i le type de véhicules (VP, VUL ou PL) avec un flux Q_i^k , x un type de motorisation associé à une gamme de technologie (les normes EURO), ϕ_i^x la part du flux de véhicules i utilisant la technologie x, e_x^{ij} les émissions unitaires du polluant j par les véhicules i de technologie x, fonction de la vitesse V_k sur le tronçon k.

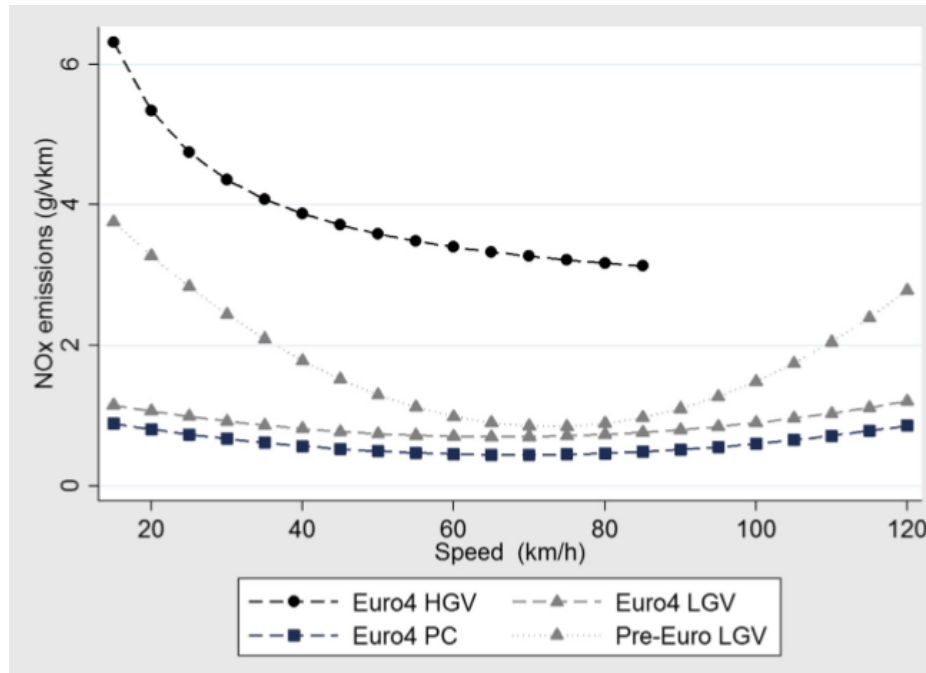
Outre sa simplicité d'utilisation dans une optique de couplage avec les sorties des modèles d'affectation, le logiciel COPCETE présente deux grands avantages. Il renseigne tout d'abord sur la composition technologique du « parc roulant » en France (i.e. le paramètre ϕ_i^x), pour plusieurs années et pour plusieurs types de liaisons (nationales, urbaines, rurales). Surtout, COPCETE contient et compile une grande multitude de fonctions (polynomiales) qui permettent de relier, pour chaque classe de véhicules et chaque technologie, les émissions unitaires et les vitesses moyennes de circulation, pour plus de 30 polluants différents. Comme illustré sur la figure 3 dans le cas du NOx, ces relations émissions-vitesses prennent généralement la forme d'une fonction quadratique en U pour les VP et les VUL. On observe également sur cette figure l'effet des changements technologiques, les VUL EURO 4 émettant moins, pour une vitesse donnée, de NOx que les anciens véhicules (pre-EURO).

En créant une chaîne de modélisation entre Freturb, MODUS et COPCETE, nous avons donc estimé dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) les émissions de CO₂, NOx et PM₁₀ au niveau de chaque tronçon routier francilien. De la sorte, nous avons identifié la part des nuisances environnementales imputables au TMV et nous pouvons mettre en relation flux de véhicules, vitesses de circulation, et émissions unitaires de polluants à un niveau spatial relativement fin. Partant de ces résultats, nous avons ensuite mobilisé les valeurs tutélaires des polluants proposées dans le rapport Quinet (CGSP, 2013 ; Ducos, 2014) pour estimer le coût total des externalités environnementales générées par le transport routier en Ile-de-France :

$$CXT = \sum_k \sum_j ET_j^k Z_j^k \quad (48)$$

Avec ET_j^k les émissions totales (en grammes par exemple) du polluant j sur la route k et Z_j^k la valeur tutélaire unitaire (en euros/gramme par exemple) du polluant j, fonction de la densité de populations exposés car résidant à proximité de la route k. Ici encore, nous pouvons décomposer CXT selon que les pertes collectives aient été causées par le transport routier de fret ou par les voyageurs¹⁵.

Figure 3 – Relations entre vitesse et émissions de NOx



A l'instar de nos propos précédents, ce couplage de modèles ne nous renseigne que sur le point (coûts externes environnementaux ; niveau de trafic) correspondant à l'équilibre effectif Q_e . Or, nous devons connaître les paramètres qui composent les matrices e et X dans l'équation (17) afin d'estimer le trafic optimal Q_o et intégrer les conséquences environnementales de la congestion routière dans notre analyse de bien-être collectif. Dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), nous avons donc suivi un procédé similaire à celui présenté auparavant. Nous avons ainsi mobilisé les résultats des 375 affectations du trafic pour faire émerger 375 coûts externes environnementaux « moyens » et pour estimer (via les MCO) l'équation suivante :

$$E_i(Q_1, Q_2, Q_3) = e_i + x_i^1 Q_1 + x_i^2 Q_2 + x_i^3 Q_3 \quad (49)$$

¹⁵ Pour faire le rapprochement avec la figure 1, le coût total des externalités environnementales correspond à la surface CAMP, s'il n'y a pas d'autres externalités.

Avec i représentant la classe de véhicules ($i=1$ si VP, $i=2$ si VUL, $i=3$ si PL) et Q_i les flux correspondants. Le paramètre e_i représente le coût environnemental direct du véhicule i et les paramètres x_i^j captent l'effet des véhicules j sur le coût marginal environnemental (indirect) du véhicule i .

Dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), nous avons également considéré au sein de $E_i(Q_1, Q_2, Q_3)$ les coûts marginaux externes des nuisances sonores (variables par classe de véhicules, les routes utilisées et selon la densité de population résidant autour de chaque tronçon routier) ainsi que les « effets amont » liés à la mise à disposition des différents types de véhicules (CGSP, 2013). Ces valeurs tutélaires sont exprimées en une unité kilométrique et sont indépendantes des volumes de trafic. En pratique, ces coûts externes vont donc se retrouver dans les constantes e_i .

3.3 Congestion dans les métros

Une de nos principales contributions a consisté à quantifier certaines dés-économies d'échelle dans les TP ferrés, ces réseaux étant plutôt associés à l'existence de rendements croissants (pour les usagers et l'opérateur). Il est important de préciser que les résultats que nous présentons dans Haywood et Koning (2015) ; Haywood, Koning et Monchambert (2017) ; Haywood, Koning et Prud'homme (2018) n'étudient qu'une facette bien spécifique de la congestion des métros. Si, à l'instar de ce qui se passe parfois sur les routes, une fréquentation excessive des TP peut augmenter la durée objective des déplacements une fois le réseau transformé en « goulot d'étranglement » - via des temps d'attente accrus sur les quais, une plus longue ouverture des portes pour faire monter/sortir les voyageurs des wagons, ou encore un ralentissement des rames qui se gênent entre elles, voir Leurent et al., 2014 ; Lam et al., 1999 ; Coulombel et Monchambert, 2019) -, nous ne nous sommes uniquement intéressés à la congestion dans les véhicules (« in-vehicle crowding » dans la littérature anglo-saxonne ; ITF-OECD, 2014). La croissance du coût marginal privé par rapport au niveau de la demande transite ici via la valeur du temps qui dépend du confort dont bénéficient les individus durant leur voyage, approximé par la densité d'individus dans les rames.

3.3.1 Préférences déclarées et arbitrages « temps-confort »

Afin d'appréhender au niveau empirique cette forme de congestion, nous commençons par spécifier dans Haywood et Koning (2015) la fonction d'utilité d'un usager i comme :

$$U_i = \alpha + \beta a_i + \gamma t_i + \delta X_i \quad (50)$$

Où a_i représente le prix du ticket de métro, t_i la durée du voyage et le vecteur X_i comporte l'ensemble des caractéristiques de l'individu i qui peuvent influencer son utilité.

Dans ce cadre standard, la valeur du temps w correspond au taux marginal de substitution entre dépenses monétaires et durée du voyage, i.e. le ratio des désutilités marginales ($\gamma < 0$ et $\beta < 0$) :

$$w = \frac{\frac{\delta U_i}{\delta t_i}}{\frac{\delta U_i}{\delta a_i}} = \frac{\gamma}{\beta} \quad (51)$$

Afin de considérer les effets de l'inconfort sur l'utilité individuelle, nous pouvons discrétiser et différencier le temps de voyage suivant J niveaux de densité dans les wagons :

$$U_{ij} = \alpha + \beta a_i + \sum_{j=J} \gamma_j c_{ij} t_i + \delta X_i \quad (52)$$

Où c_{ij} est une variable indicatrice valant 1 si l'individu i voyage avec le niveau de confort j .

L'hypothèse implicite derrière l'équation (52) est assez simple : la minute marginale ne générera pas la même désutilité si elle est « consommée » confortablement ($j=0$), en étant assis par exemple, ou si l'individu i est debout et entassé contre de très nombreuses personnes ($j=1$). Autrement dit, on peut supposer que $\gamma_1 < \gamma_0 < 0$, ce qui implique que la valeur du temps sera supérieure lorsque les métros sont congestionnés ($w_1 > w_0$ si β est constant entre les deux niveaux de confort). En outre, la spécification multiplicative entre confort et temps de déplacement peut se justifier par le fait que les diverses nuisances liées à une densité excessive dans les wagons (voir ci-dessous) sont subies en proportion de la durée du voyage.

S'il est tout à fait possible de valoriser cette forme de congestion en analysant les préférences des voyageurs « révélées » par leurs choix d'itinéraires au sein du réseau de TP, i.e. un voyage impliquant un détour ou plus coûteux mais associé à un confort supérieur (voir Batarce et al., 2015 ; Tirachini et al., 2016 ; Hörcher et al., 2017), nous avons mobilisé une approche reposant plutôt sur l'étude de leurs « préférences déclarées », à l'instar de Batarce et al. (2016), Pel et al. (2014), Tirachini et al. (2013) par exemple. Ce travail a été rendu possible grâce à l'élaboration et à la récolte d'une enquête originale sur les quais des lignes 1 et 4 du métro parisien (voir une présentation détaillée dans l'annexe 7.3).

Après avoir demandé aux individus d'indiquer sur un support visuel quelle sera la densité de passagers qu'ils allaient rencontrer dans les wagons pendant leur voyage, nous leurs proposons de choisir entre ce déplacement de référence et un autre, plus long mais garantissant un confort supérieur. Nous avons décidé de mobiliser des enchères temporelles (et non monétaires) afin d'améliorer la crédibilité des réponses individuelles à ces scénarios contingents (sur cette méthode de valorisation, voir Haab et McConnel, 2003). En effet, si les individus avaient été confrontés à des voyages plus confortables mais plus chers, ils auraient pu cacher leur vraie préférence pour le confort et espérer que les autres usagers supportent à leur place le surcoût associé (biais de « free-riding »). Surtout, il est fréquent de voir certaines personnes rester sur les quais et laisser passer un métro car espérant trouver une place assise dans celles qui suivront. Dans ce cas, les voyageurs sont bien en train d'échanger du temps de déplacement contre du confort, ce qui limite le « biais hypothétique ».

L'analyse des réponses individuelles à ces arbitrages hypothétiques « temps-confort » s'inscrit parfaitement dans le cadre des modèles économétriques de choix discrets. Formellement, nous réécrivons la fonction d'utilité décrite par l'équation (52) comme :

$$U_{ij}^k = \alpha^k + \beta a_i + \sum_{j=J} \gamma_j c_{ij}^k (t_i + b_i^k) + \delta X_i + \varepsilon_i^k \quad (53)$$

Où l'exposant k décrit les scénarios (A=actuel et H=hypothétique) et b_i^k représente l'enchère temporelle proposée au voyageur i (avec $b_i^A = 0$).

Si l'individu i préfère le voyage hypothétique par rapport à son voyage de référence, nous déduisons :

$$Prob(Oui) = Prob(U_{ij}^H > U_{ij}^A) = \Theta_\varepsilon \left[\alpha^* + \sum_{j=J} \gamma_j^* (c_{ij}^H T_i^H - c_{ij}^A T_i^A) \right] \quad (54)$$

Avec $T_i^k = (t_i + b_i^k)$, Θ_ε la fonction de densité cumulée du nouveau terme d'erreur $\varepsilon = \varepsilon_i^H - \varepsilon_i^A$ (de variance σ_ε^2) et $\gamma_j^* = \gamma_j / \sigma_\varepsilon^2$.

En estimant l'équation (54) à l'aide de modèles probit, nous obtenons les paramètres γ_j^* pour les 7 niveaux de confort que suppose le protocole expérimental développé dans Haywood et Koning (2015). Dans la mesure où ne disposons pas des informations permettant d'estimer la désutilité marginale de l'argent β , nous avons adopté une approche indirecte pour faire varier la valeur du temps selon le niveau de congestion. En définissant $j=0$ comme le confort de référence (la densité qui garantit un voyage assis par exemple), nous pouvons mobiliser nos résultats économétriques pour

déduire un « time multiplier » ($TM^{1/0}$) qui majore la valeur du temps « normale » (w_0) pour le niveau de congestion $j=1$. Comme indiqué dans l'équation (55), le time multiplier correspond en fait à un taux marginal de substitution entre temps de voyage confortables et inconfortables :

$$TM^{1/0} = \gamma_1/\gamma_0 = w_1/w_0 = \frac{\gamma_1}{\beta} / \frac{\gamma_0}{\beta} \quad (55)$$

Précisons que le recours à de tels « coefficients de pénibilité » est une procédure classique pour valoriser les attributs qualitatifs des déplacements en TP, que ce soit les temps d'attente sur les quais ou la durée des transferts entre les lignes pour ne donner que ces deux exemples (voir ITF-OECD, 2014). Par ailleurs, nous avons utilisé dans Bounie, Adoue, Koning et L'Hostis (2019) une stratégie empirique similaire à celle proposée dans les équations (50)-(55) pour obtenir des time multipliers qui valorisent la qualité de la connexion au réseau Internet dans les métros parisiens, en liens avec l'utilisation des smart phones par les voyageurs durant leurs temps de transport.

Disposant de plusieurs time multipliers pour plusieurs niveaux de confort dans les wagons, nous avons finalement estimé dans Haywood et Koning (2015) (via les MCO) une relation (qui s'est avérée être linéaire) permettant de faire varier $TM(q)$ suivant le degré de congestion dans les métros q :

$$TM(q) = \rho_0 + q\rho_1 \quad (56)$$

Où $TM(q)$ a été normalisé par rapport au niveau de confort $j=0$, de telle sorte que $\rho_0 = 1$.

En pratique, la fonction de coût marginal privé $c(q)$ que nous utilisons dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) pour estimer les pertes de bien-être collectif liées à la sous-tarifcation de la congestion dans les métros parisiens (voir équation (8)) découle de la relation précédente :

$$c(q) = a_i + t_i w_0 TM(q) = a_i + t_i w_0 (1 + q\rho_1) \quad (57)$$

Cette fonction de coût généralisé a été validée par l'étude alternative que nous proposons dans de Lapparent et Koning (2016), en utilisant les mêmes données. Certes, nos tests économétriques pourraient favoriser légèrement une spécification qui intègre la congestion sous une forme additive et non d'une manière proportionnelle au temps de transport. Il convient toutefois de noter qu'une telle fonction de coût généralisé est peu conforme aux intuitions théoriques – les effets de la congestion sur le coût perçu par les individus étant *a priori* liés au temps passé dans les wagons – et les « primes d'inconfort » sont dans ce cas plus dures à transférer entre les individus et/ou les voyages. Par ailleurs, nous démontrons dans de

L'apparent et Koning (2016) que la spécification linéaire est plus pertinente que des fonctions intégrant le confort sous des formes exponentielle, puissance ou en S.

3.3.2 Satisfaction déclarée à l'égard du confort

L'enquête de terrain fut également l'occasion de porter un regard plus qualitatif sur le confort dans les TP. A l'instar d'une littérature grandissante en socioéconomie des transports (Eboli et Mazzulla, 2007 ; Cantwell et al., 2009 ; Dell'Olio et al., 2011 ; de Ona et de Ona, 2015 ; Redman et al., 2013 ; Börjesson et Rubensson, 2019), nous avons souhaité étudier dans Haywood, Koning et Monchambert (2017) la « satisfaction déclarée » des voyageurs à l'égard du confort de leurs déplacements. En effet, plusieurs articles ont montré que le « in-vehicle crowding » était un des principaux facteurs diminuant le bien-être subjectif des voyages en TP, à côté de l'irrégularité ou des temps d'attente notamment.

Contrairement à Börjesson et Rubensson (2019) ou Cantwell et al. (2009) par exemple qui analysent le poids respectif de plusieurs attributs (argent, durée, fiabilité, attente, informations, propreté...) au sein de la satisfaction déclarée d'un voyage, nous ne nous intéressons dans Haywood, Koning et Monchambert (2017) qu'à la seule satisfaction de l'individu i à l'égard du confort de son déplacement (SC_i), à l'instar de Wang et Zacharias (2020) :

$$SC_i = DV_i(\alpha + \beta_i X_i) + \sum_{k=K} \gamma_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (58)$$

Où X_{ik} décrit l'ensemble des K caractéristiques de i pouvant influencer sa satisfaction pour le confort et DV_i la densité de voyageurs dans les wagons.

L'équation (58) appelle trois commentaires. Précisons tout d'abord que nous disposons de deux mesures alternatives pour DV_i , la première (notre préférée) provenant du support visuel sur lequel les voyageurs montraient la densité qu'ils pensaient rencontrer durant leur voyage (voir annexe), la seconde d'un comptage dans les trains réalisé par nos soins en même temps que l'enquête de terrain. Ensuite, le paramètre α permet de capter l'effet « pur » de la congestion dans les wagons sur SC_i . A contrario, lorsqu'on ne contraint pas β_i à être nul, ce paramètre modère l'effet de DV_i sur la satisfaction déclarée pour le confort au travers de la caractéristique X_i . Finalement, la variable SC_i provenait des réponses à la question suivante : « *Donnez une note comprise entre 0 et 10 afin de décrire votre satisfaction à l'égard du confort du déplacement que vous venez de montrer sur la carte, avec 0 si vous êtes très insatisfait et 10 si vous êtes très satisfait* ». Etant donné le recours à cette échelle de Likert, l'équation (58) a été estimée avec un modèle probit ordonné.

Alors que cette analyse offre un regard novateur sur les liens entre bien-être individuel et congestion dans les TP, nous avons également mobilisé les données de terrain pour identifier les canaux au travers desquels une densité de passagers excessive dégrade le ressenti des voyageurs. En effet, la perception qu'ont les individus des sources de l'inconfort peut foncièrement varier selon leurs caractéristiques idiosyncratiques. Par conséquent, toute mesure visant à améliorer l'expérience des voyageurs dans les véhicules se doit au préalable de comprendre qui est sensible à quels types de nuisances ? Après avoir répondu aux arbitrages « temps-confort » présentés ci-dessus, les individus pouvaient prolonger le questionnaire avec un volet plus qualitatif. Notamment, on leur demandait d'attribuer une note comprise (entre 0 et 10) pour décrire leur insatisfaction vis-à-vis de différentes nuisances liées à une très forte densité de voyageurs dans les wagons (0 impliquant que la nuisance n'est pas du tout problématique). Les 8 gênes associées à la congestion des TP que nous avons considérées dans Haywood, Koning et Monchambert (2017) sont :

- La promiscuité physique : la congestion dans les métros génère une intrusion dans l'espace personnel, impliquant un stress accru et une perte de contrôle individuel (Cox et al., 2006 ; Evans et Wener, 2007 ; Mahudin et al., 2011 ; Wener et al., 2005) ;
- La station debout : lorsqu'il y a trop de mondes dans les wagons, il est compliqué de trouver une place assise et voyager debout peut générer fatigues et souffrances physiques (Cox et al., 2006) ;
- Le bruit : une forte densité de passagers réduit la distance entre les individus qui subissent donc plus les nuisances sonores émises par leurs voisins, avec une fatigue mentale (Wang et Zacharias, 2020) ;
- Les mauvaises odeurs : d'une manière similaire, une forte congestion dans les wagons peut être associée à des nuisances olfactives et à des préoccupations hygiénistes (Wang et Zacharias, 2020) ;
- Les pertes de temps objectif : lorsqu'il y a trop de mondes dans les wagons, les portes du métro restent ouvertes plus longtemps pour laisser entrer ou sortir les voyageurs (Lam et al., 1999) ;
- Une utilisation non polychronique du temps : un excès de voyageurs dans les véhicules peut empêcher les individus d'utiliser leur temps de transport pour réaliser d'autres tâches (travailler, lire un journal, utiliser son smart phone) (Bounie et al., 2019) ;
- Risques de chutes : lorsque les wagons sont bondés, il est compliqué de se tenir aux rambardes et le risque de chutes lors des phases d'accélération/décélération augmente ;
- Risques de vols : une fréquentation excessive dans les trains augmente le risque de pickpocket et le stress associé à une surveillance accrue de ses effets personnels (Uzzel et Brown, 2007).

En mobilisant les réponses à ces questions auxiliaires, nous avons donc pu affiner l'analyse de la satisfaction déclarée à l'égard du confort en estimant la relation suivante :

$$SC_i = DV_i \left(\sum_{d=D} \alpha_d IN_{id} \right) + \delta \overline{IN}_i + \sum_{k=K} \gamma_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (59)$$

Où IN_{id} représente la note attribuée par l'individu i pour décrire leur insatisfaction vis-à-vis de la nuisance d et \overline{IN}_i correspond à la somme des notes données pour les 8 nuisances.

Précisons que la variable \overline{IN}_i est intégrée dans l'équation (59) afin de contrôler le fait que certains individus ont tendance à donner systématiquement de plus fortes (ou de plus faibles) notes, indépendamment de leur réel ressenti. Surtout, on comprend que les paramètres d'intérêt sont désormais les α_d : lorsqu'ils sont significativement différents de zéro, la nuisance d est un des canaux au travers duquel la congestion réduit la satisfaction du voyageur i à l'égard du confort de son déplacement. Il s'agit donc d'un phénomène vis-à-vis duquel les opérateurs ou les décideurs publics doivent être vigilants.

3.4 Synthèse

Cette section a décrit les stratégies empiriques originales développées dans nos articles pour estimer différentes relations reliant la fréquentation des infrastructures de transport et la qualité de service proposée aux usagers.

Si, dans le cas des métros, nous avons supposé une technologie de congestion très simple, rares sont les études qui, à l'instar de ce que nous faisons dans Haywood et Koning (2015), mobilisent les time multipliers obtenus pour faire émerger une fonction opérationnelle comme celle décrite dans les équations (56) et (57). Bien que l'analyse de la satisfaction des voyageurs dans Haywood, Koning et Monchambert (2017) ne permette pas de traduire dans une grandeur monétaire les effets de congestion, l'identification des canaux au travers desquels transite la perception de l'inconfort dans les métros est par ailleurs donc fort instructive.

En ce qui concerne la congestion routière, l'originalité de nos travaux est double. Nous mettons tout d'abord en évidence l'existence de relations macroscopiques dans un cadre multi-classes qui capturent les effets différenciés des VP et des véhicules de fret sur les temps de parcours (Beziat, Koning et Toilier, 2017) ou sur les coûts généralisés (Koning, Combes, Coulombel et Gardrat, 2020). En outre, la prise en compte des effets indirects de la congestion sur les émissions de polluants proposée dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) et dans Koning,

Combes, Coulombel et Gardrat (2020) enrichit les fonctions de coût marginal social des déplacements routiers.

Les équations que nous venons de présenter sont donc pertinentes pour déterminer les pertes de bien-être collectif liées à une sur-utilisation des infrastructures de transport, lorsque l'externalité de congestion n'est pas correctement intégrée au prix généralisé des déplacements. Précisons que la procédure retenue dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) et dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) pour calibrer les fonctions de demande inverse (i.e. autre élément nécessaire aux analyses de bien-être) est quant à elle très simple. Elle nécessite essentiellement de trouver - dans la littérature grise ou académique (voir annexe 7.4) - des mesures de l'élasticité de la demande de transports par rapport au coût généralisé et de les croiser avec les coûts et les trafics observés dans la situation effective afin de « reconstruire » la fonction de demande inverse¹⁶.

4. Principaux apports

Nous pouvons à présent discuter les principaux apports de nos articles. Ainsi, nous débutons cette section en présentant les relations empiriques permettant d'endogénéiser la qualité de service ou les coûts environnementaux par rapport à la fréquentation des infrastructures, via le phénomène de congestion. Avec ces fonctions, nous pouvons ensuite déduire les coûts marginaux externes des déplacements et approximer les pertes de bien-être collectif liées à leur sous-tarifcation, comme détaillé à un niveau théorique dans la section 2. Finalement, nous illustrons la pertinence de certains paramètres pour les calculs socioéconomiques entourant les projets de transport.

4.1 Fonctions de congestion empiriques

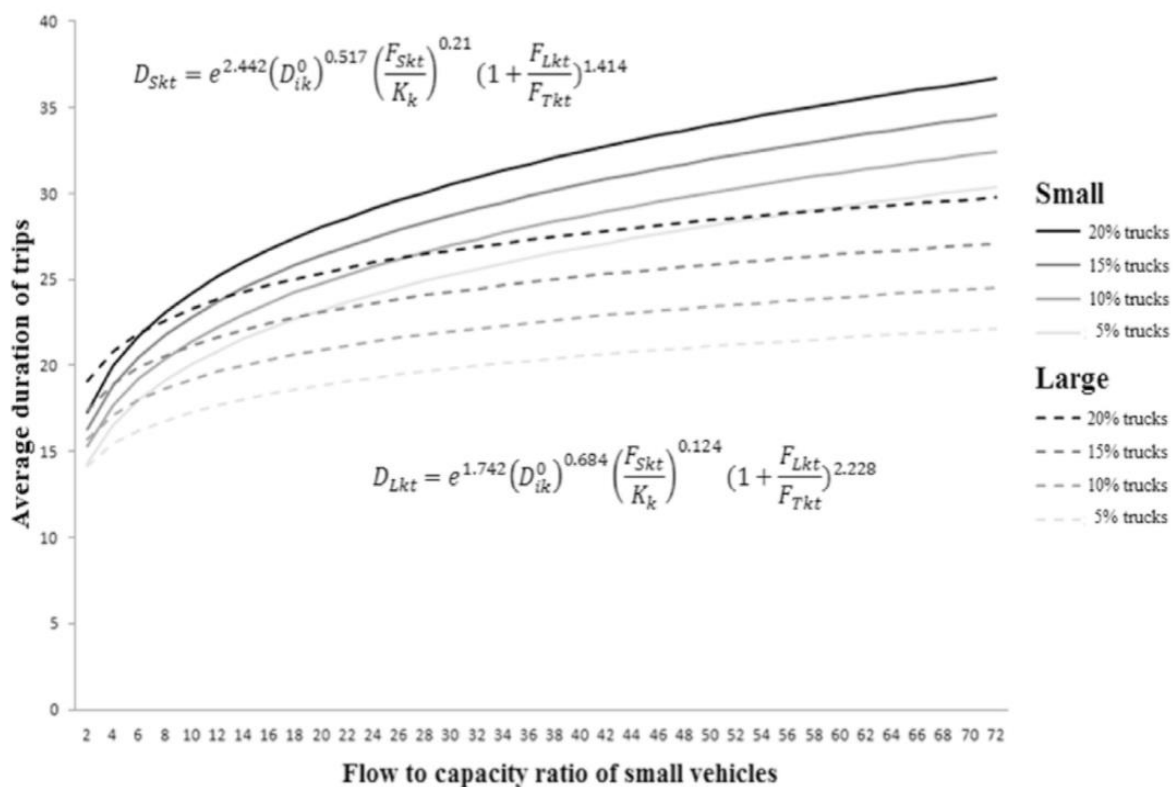
Dans le cadre de nos études, nous avons fait émerger plusieurs fonctions agrégées particulièrement utiles pour estimer les coûts directs ou indirects liés à la congestion des infrastructures de transport.

¹⁶ Soit ε l'élasticité de la demande par rapport au coût généralisé. En connaissant le niveau de trafic et le coût généralisé associés à l'équilibre effectif Q_e , on peut calibrer la pente de la demande inverse (équation (9)) comme : $-b = \frac{\partial a^{-1}(q)}{\partial q} = \frac{a^{-1}(Q_e)}{\varepsilon Q_e}$. En effet, l'équilibre effectif est tel que la demande inverse égalise le coût généralisé. On détermine la constante comme : $a = d^{-1}(Q_e) - bQ_e$. Pour l'analyse multi-classes de Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), la procédure est similaire mais s'inscrit dans un cadre matriciel.

4.1.1 Congestion routière multi-classes

Pour rappel, notre objectif dans Beziat, Koning et Toilier (2017) était d'estimer une fonction temps-débit dans un cadre multi-classes afin de mettre en lumière des effets de congestion réciproque hétérogènes selon les usagers des routes. Conformément au modèle structurel inspiré par la fonction BPR, nos résultats économétriques confirment que les voyages sont plus longs lorsque la durée minimale du trajet est importante (en raison d'une grande distance à parcourir surtout), si la demande de routes des petits véhicules (VP+VUL) rapportée à l'offre théorique est forte et quand la part des grands véhicules (PL) dans le trafic total est élevée. Surtout, les élasticités des temps de parcours par rapport aux conditions de trafic dépendent des types des conducteurs, les termes d'interaction de l'équation (39) étant tous significativement différents de zéro. Ainsi, les VP et les VUL sont relativement moins affectés que les PL par la proportion de grands véhicules dans le trafic total. Inversement, ils sont relativement plus touchés que les PL par une hausse du « flow-to-capacity ratio » des petits véhicules.

Figure 4 – Fonctions temps-débits pour les petits et les grands véhicules



En insérant ces estimations dans l'équation (40), nous pouvons proposer les fonctions temps-débit représentées sur la figure 4. Elles décrivent très

clairement des effets de congestion différenciés selon les gabarits des véhicules, notamment au travers de la pente de la fonction qui est plus forte pour les VP et les VUL (indités « S » sur la figure 4, pour « small ») que pour les PL (« L », pour « large »). Autrement dit, les petits véhicules souffrent comparativement plus d'une hausse de la demande de routes (les VP et les VUL représentant l'immense majorité du trafic) que les PL. Par ailleurs, on constate bien que les temps de parcours des grands comme des petits véhicules augmentent lorsque les PL représentent une part importante du trafic et occupent une forte portion de la voirie.

Bien qu'ils soient très informatifs sur les conditions de trafic en Ile-de-France, les résultats obtenus dans Coulombel, Dabanc, Gardrat et Koning (2018) avec le modèle d'affectation multi-classes ne permettent pas d'obtenir une fonction opérationnelle en vue d'estimer les pertes de bien-être collectif liées à l'externalité de congestion routière. Comme expliqué dans la section 3, nous avons donc dupliqué dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) 375 fois la chaîne de modélisation, en ajustant à la hausse et/ou à la baisse les matrices OD de référence.

Le tableau 2 présente les coûts généralisés kilométriques et les flux kilométriques moyens ainsi obtenus. Le coût généralisé moyen des PL (1,256 eu/vkm) est plus de deux fois supérieur à celui des VP (0,569 eu/vkm), la facture pour les VUL atteignant un niveau intermédiaire (0,822 eu/vkm). Sachant que la part monétaire du coût généralisé kilométrique est constante, on comprend en regardant les écarts-types (ou les valeurs minimales et maximales) que la composante temporelle peut énormément varier, via le phénomène de congestion. La figure 5 explicite ce point pour les VP. On remarque ainsi une relation croissante entre le coût généralisé kilométrique des VP et le flux de ces véhicules, avec une hausse quasi-linéaire. En outre, les volumes des véhicules de fret jouent sur les coûts privés des VP, pour un flux donné d'automobilistes. Nous aboutissons à des observations qualitativement similaires pour les VUL et les PL.

Tableau 2 – Coûts privés et flux moyens des 375 simulations

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
CG_VP (€/vkm)	0,569	0,110	0,445	0,871
Flux_VP (veh/h/km)	460,9	186,5	169,8	735,5
CG_VUL (€/vkm)	0,822	0,220	0,577	1,457
Flux_VUL (veh/h/km)	18,2	9,2	8,8	38,5
CG_PL (€/vkm)	1,256	0,290	0,931	2,084
Flux_PL (veh/h/km)	15,5	7,7	7,7	32,6

Figure 5 – Effets des niveaux de trafics sur le coût généralisé kilométrique des VP

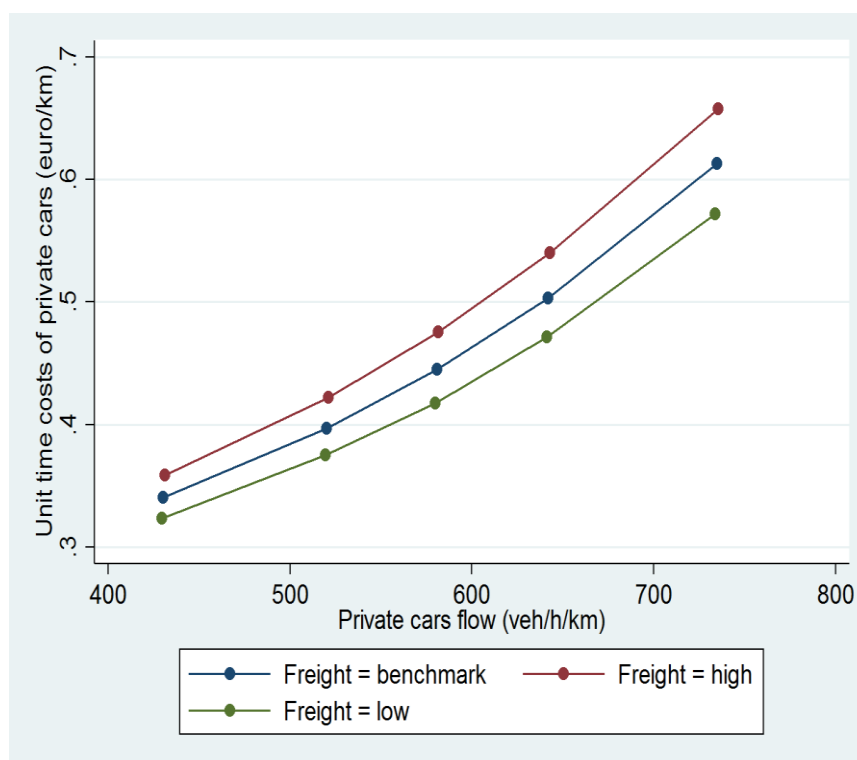


Tableau 3 – Fonctions de coûts généralisés multi-classes

	CG_VP	CG_VUL	CG_PL
Effets du flux de VP sur :	0,00045	0,00085	0,00114
Effets du flux de VUL sur :	0,00208	0,00490	0,00610
Effets du flux de PL sur :	0,00244	0,00553	0,00719
<i>Constante initialement estimée</i>	<i>0,20194</i>	<i>0,16932</i>	<i>0,33055</i>
<i>R²</i>	<i>91,5</i>	<i>91,6</i>	<i>92,0</i>
Constante ajustée pour HPM	0,18835	0,14228	0,29329
Constante ajustée pour HPS	0,17844	0,12362	0,27081
Constante ajustée pour HC	0,21792	0,19943	0,36879

A l'aide de ces simulations, nous pouvons estimer (via les MCO) les paramètres des matrices K et M qui définissent les coûts marginaux privés dans un cadre multi-classes (les équations (16) et (46))¹⁷. Contrairement

¹⁷ Contrairement aux résultats du tableau 2, nous avons mené ces régressions en retirant des dépenses monétaires (et donc de la constante du modèle) les taxes spécifiquement perçues par les autorités, ces dernières apparaissant en effet d'une manière isolée dans le vecteur T (équation (18)). Par ailleurs, si nous supposons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) que les « effets croisés » des flux de véhicules sur les coûts généralisés (les pentes) sont identiques pour toutes les périodes de la journée, nous avons ajusté les

aux fonctions temps-débit obtenues dans Beziat, Koning et Toilier (2017), les paramètres du tableau 3 décrivent une certaine homogénéité dans les effets de congestion réciproque. Ainsi, la VP marginale a des impacts sur les coûts généralisés des différents véhicules inférieurs à ceux du VUL marginal, eux-mêmes moindres que pour un PL marginal. Par ailleurs, la part constante du coût généralisé (non sujette à la congestion) compte environ pour 50% du coût moyen des VP, mais pour une part plus faible en ce qui concerne les VUL et les PL.

4.1.2 Coûts environnementaux et congestion

Le chaînage Freturb-MODUS-COPCETE que nous proposons dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) a permis d'estimer, au niveau de chaque tronçon routier, les émissions de CO₂, de NO_x et de PM₁₀, mais aussi d'identifier la part des nuisances imputable au TMV. Plutôt que de détailler *in extenso* ces résultats, nous préférons centrer nos propos sur les effets indirects et environnementaux de la congestion routière.

Paris et les espaces les plus denses de la région représentent ainsi 35% du total des vkm parcourus mais 39% environ des émissions de polluants. En effet, ces territoires sont ceux où la congestion est la plus forte et les vitesses de circulation les plus faibles. D'une manière similaire, s'ils représentent 6% des flux et 8% des vkm totaux, les VUL et les PL sont responsables de 19% des rejets de CO₂ et de 29% des émissions de NO_x et de PM₁₀, notamment car ils circulent plus dans le cœur de l'agglomération parisienne. En croisant les émissions de polluants avec leurs valeurs tutélaires, nous estimons que le coût social environnemental du trafic routier en Ile-de-France se chiffre à 23,1 M euros/an. A l'instar de nos propos précédents, la part du coût externe total générée dans les espaces les plus denses est plus que proportionnelle au volume du trafic qu'ils reçoivent. En sus des vitesses de circulation (plus faibles) et de la présence (plus forte) des véhicules de fret, chaque kilogramme de PM émis dans Paris et ses alentours touche en effet beaucoup plus de personnes. Par ailleurs, on constate que le TMV représente 36% des coûts externes totaux, avec une part d'autant plus forte qu'on s'intéresse aux espaces centraux. La comparaison de 4 chiffres nous semble illustrer parfaitement ces effets indirects de la congestion : la Ville de Paris, qui accueille 11% des kilomètres parcourus en Ile-de-France à une vitesse moyenne de 21 km/h durant les pointes (contre 41 km/h pour toute la région) compte pour 14% des émissions totales de polluants et 26% du coût social environnemental de la région.

constantes (à la suite des estimations) pour nous assurer que les équations du tableau 3 aboutissent bien aux coûts moyens observés dans la situation de référence.

Tableau 4 – Coûts environnementaux du trafic routier dans la région Ile-de-France

	IdF	Paris	VDUA	DUA	UA	DIUA	IA
Total social costs (M€/day)	23.06	6.02	11.64	3.38	1.04	0.88	0.10
<i>PCs</i>	14.80	3.22	7.58	2.37	0.79	0.74	0.09
<i>LGVs</i>	1.34	0.49	0.63	0.15	0.04	0.03	0.00
<i>HGVs</i>	6.91	2.31	3.43	0.85	0.21	0.11	0.01
Total social costs (%)	100.0	26.1	50.5	14.7	4.5	3.8	0.4
Share of URF (%)	35.8	46.4	34.9	29.7	24.2	15.5	8.0
<i>Including CO₂ related costs</i>							
Social costs (M€/day)	1.12	0.15	0.29	0.22	0.16	0.25	0.05
Share of URF (%)	19.4%	33.9%	23.2%	19.3%	15.9%	11.0%	6.6%

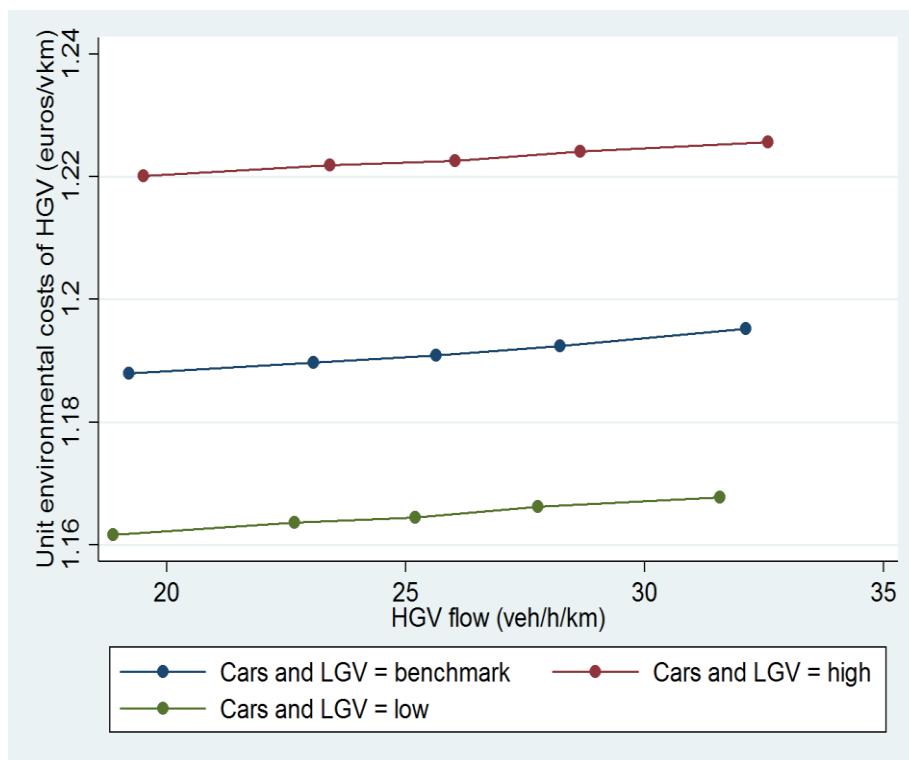
Note: “VDUA” stands for very dense urban area, “DUA” for dense urban area, “UA” for urban area, “DIUA” for diffuse urban area and “IA” for interurban area. PM_{2,5} emissions are found by applying a 0.65 factor to PM₁₀ emissions (Table 7)

Comme précédemment, ces résultats sont très illustratifs mais peu utiles pour estimer les pertes de bien-être collectif liées à l’utilisation non-optimale des routes. Comme précédemment, nous avons donc dupliqué dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) la chaîne de modélisation afin de faire émerger une distribution de couples (coûts environnementaux ; niveaux de trafic) propices à l’estimation des paramètres qui composent les matrices e et X (équations (17) et (49)). Le tableau 5 présente résultats ainsi obtenus. Les polluants locaux (PM, NOx et SO₂) sont de loin les externalités les plus coûteuses. On observe ensuite que les PL, avec un coût externe moyen de 1,167 eu/vkm, ont un bilan environnemental « catastrophique » par rapport aux VP (0,104 eu/vkm) et aux VUL (0,206 eu/vkm). On pourrait finalement penser que les variations de vitesses liées aux modifications des trafics lors des simulations jouent peu sur les émissions, comme l’attestent les écarts-types. La figure 6 nous force cependant à nuancer cette conclusion. En effet, on observe une relation positive et quasi-linéaire entre coût environnemental kilométrique et flux de PL, via la hausse des émissions imputable à la congestion routière. En outre, le coût externe dépend, pour un flux donné de PL, du niveau de trafic des autres véhicules. Un phénomène qualitativement similaire est observé pour les VUL et les VP.

Tableau 5 – Coûts environnementaux moyens du trafic routier issus des 375 simulations

	VP	VUL	PL
Cm_CO₂ (€/vkm)	0,006 (0,0004)	0,009 (0,0003)	0,026 (0,0024)
Cm_Locaux (€/vkm)	0,087 (0,001)	0,184 (0,003)	1,101 (0,025)
Cm_Bruit (€/vkm)	0,001 (0,0000)	0,001 (0,0000)	0,009 (0,0004)
Cm_Amont (€/vkm)	0,009 (0,0000)	0,012 (0,0000)	0,031 (0,0000)
Cm_Environnement (€/vkm)	0,104 (0,0018)	0,206 (0,0033)	1,167 (0,0270)

Figure 6 - Effets des niveaux de trafic sur le coût environnemental kilométrique des PL



A l'aide des 375 simulations, nous avons estimé les fonctions de coûts environnementaux synthétisées dans le tableau 6. Pour une raison que nous ignorons, les résultats pour les VUL sont d'une moins bonne qualité que ceux obtenus pour les VP et les PL. Si les valeurs des constantes impliquent que la part du coût externe liée au phénomène de congestion est relativement modeste, nous sommes néanmoins convaincus de l'originalité de ces résultats. Ces fonctions permettent en effet d'endogénéiser les coûts environnementaux par rapport aux flux des différents types de véhicules. Surtout, c'est grâce à ces paramètres que nous sommes en mesure d'estimer les coûts externes indirects et de réaliser nos analyses de bien-être, comme nous allons le montrer ci-dessous.

Tableau 6 - Coûts externes environnementaux en fonction des flux de véhicules

	Env_VP	Env_VUL	Env_PL
Effets du flux de VP sur :	0,0000071	0,0000016	0,0001191
Effets du flux de VUL sur :	0,0000379	0,0000947	0,0004353
Effets du flux de PL sur :	0,0000447	0,0000931	0,0005384
<i>Constante initialement estimée</i>	0,0989551	0,2021583	1,096263
<i>R²</i>	92,3	24,5	97,1
Constante ajustée pour HPM	0,09878363	0,20061795	1,09475409
Constante ajustée pour HPS	0,09842078	0,19888915	1,09065964
Constante ajustée pour HC	0,0992440	0,20368385	1,09853001

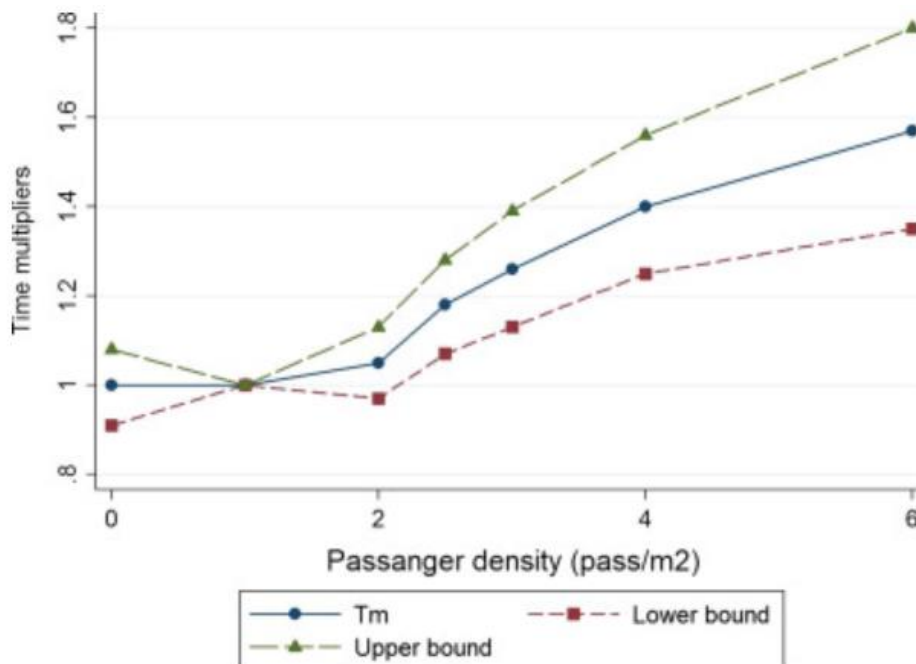
4.1.3 Fonctions de congestion dans les métros

Les modèles de choix discrets estimés dans Haywood et Koning (2015) sur la base des réponses des individus aux scénarios contingents entre durée supplémentaire de voyage et confort supérieur¹⁸ confirment que la désutilité marginale du temps est d'autant plus forte (i.e. d'autant plus négative) que la densité de voyageurs dans les wagons est importante. Ainsi, rallonger un déplacement d'une minute sera perçu comme étant bien plus pénible s'il y a 4 passagers/m² dans les véhicules comparativement à une situation où il est possible de s'asseoir. Nous constatons très peu d'hétérogénéité individuelle, l'utilité marginale du temps variant uniquement entre le soir et le matin (plus pénible pour les déplacements du matin).

A partir de ces estimations, nous avons supposé que la station assise (avec environ 1 voyageur/m² autour de soi) constitue la situation de référence pour la valeur du temps lorsque celui-ci est consommé d'une manière « confortable », les TP n'ayant pas été construits pour être vides. Ainsi, l'utilité marginale du temps de cette configuration est choisie comme dénominateur des time multipliers. La figure 7 illustre les coefficients de pénibilité que nous prédisons avec la « delta method ». On constate que le time multiplier passe de 1,05 lorsqu'il y a 2 voyageurs/m² dans les wagons à 1,57 pour la situation la plus congestionnée, avec 6 voyageurs/m². Autrement dit, les individus seraient prêts à échanger 1,6 minutes de voyage assis pour éviter de passer 1 minute dans les pires conditions. Autrement dit, la valeur du temps doit être majorée de 60% (au maximum) pour prendre en compte les effets de congestion dans les TP. Si cette majoration est inférieure à celles obtenues pour l'Angleterre, l'Australie ou le Chili par exemple (voir Li et Hensher, 2011 ; Wardman et Whelan, 2011 ; Batarce et al., 2016), nos résultats sont incroyablement proches de ceux estimés dans le cadre d'une étude commandée par (ce qui s'appellait à l'époque) le STIF (Kroes et al., 2013). Les autorités franciliennes peuvent donc être confiantes quant à la valorisation de la congestion dans les TP.

¹⁸ Les voyageurs étant confrontés à un système de « doubles enchères fermées » (Haab et McConnel, 2003), nous avons d'abord considéré un probit bivarié, où la structure des préférences peut varier entre les deux tours et les choix individuels sont reliés au travers du seul terme d'erreur. A contrario, le modèle probit à effets aléatoires suppose qu'il n'existe qu'une seule structure des préférences et que les réponses aux deux enchères sont interdépendantes via un effet individuel inobservable et aléatoire. Si nous obtenons des résultats qualitativement similaires, ce second modèle est supérieur d'un point de vue économétrique.

Figure 7 – Time multipliers en fonction de la densité de voyageurs dans les wagons



Conformément à ce qu'on peut observer sur la figure 7, la spécification linéaire simple s'ajuste très bien à nos données :

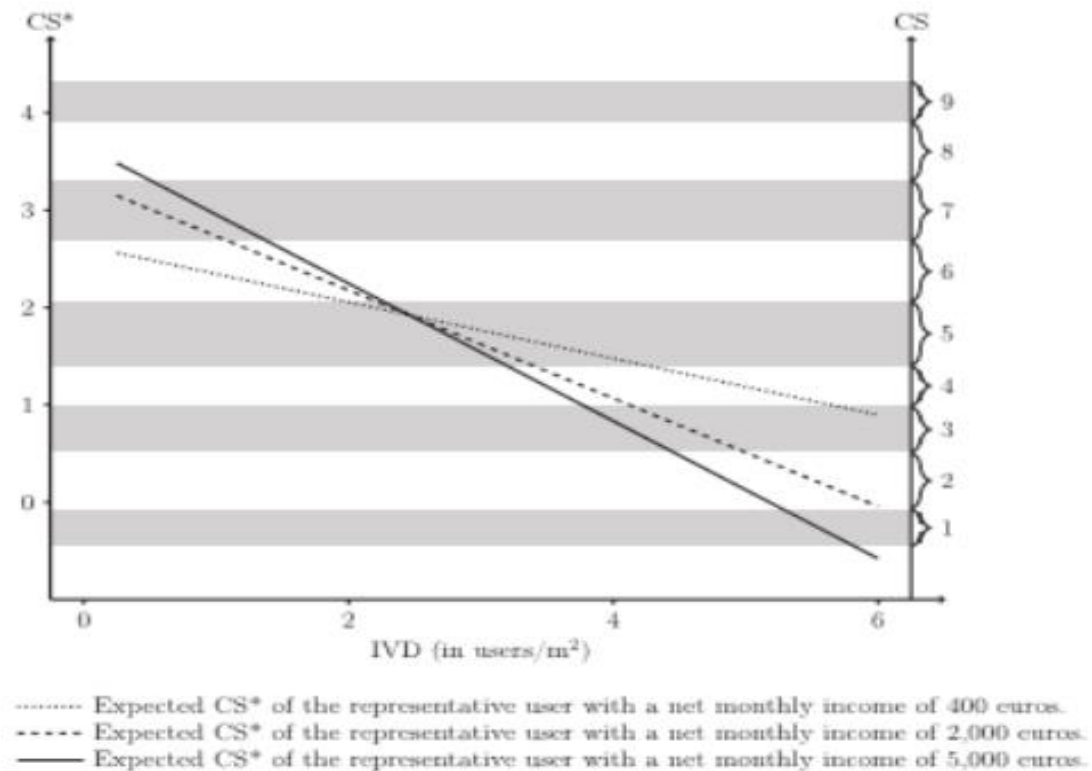
$$Tm(q) = 1 + 0,11q \quad \text{si } q > 1 \text{ passenger/m}^2 \quad (60)$$

Si nous allons utiliser cette fonction pour estimer le coût marginal externe de la congestion dans les métros ainsi que les pertes de bien-être collectif liées à sa non-tarifcation, précisons que le coefficient de 0,11 que nous avons trouvé est (logiquement) très proche de celui (de 0,09) proposé dans le rapport Quinet (CGSP, 2013), déduit des résultats de Kroes et al. (2013). En utilisant les valeurs du temps officielles et la densité perçue en moyenne par les usagers du métro parisien durant les heures de pointe (3,1 voy/m²), nous obtenons aussi dans Haywood et Koning (2015) un time multiplier moyen de 1,34 et un coût généralisé moyen de 3,07 eu/voy. Le coût généralisé serait de 2,42 eu/voy si les individus étaient assis.

Notre enquête sur les quais des lignes 1 et 4 comportait également des questions qualitatives sur la satisfaction des voyageurs vis-à-vis du confort des déplacements. Les différents modèles probit ordonnés estimés dans Haywood, Koning et Monchambert (2017) montrent logiquement que plus la densité dans les wagons est importante, plus faible est la satisfaction déclarée. A contrario, la durée des déplacements ne semble pas jouer sur la perception du confort dans les TP. Les voyages du soir sont perçus comme étant plus inconfortables, peut-être en raison de la fatigue accumulée durant une journée, et les hommes semblent moins impactés que les femmes. Un autre modèle fait inter-réagir la densité avec les différentes

variables individuelles, conformément à la spécification de l'équation (58). Seul le revenu des répondants influence la satisfaction déclarée à l'égard du confort : *Ceteris paribus*, les personnes riches sont moins satisfaites du confort de leur déplacement lorsqu'il y a beaucoup de personnes dans les métros et leur niveau de satisfaction augmente plus rapidement lorsque la congestion baisse (figure 8).

Figure 8 – Relation entre satisfaction déclarée et densité, en fonction du revenu des individus



Outre cette fonction de congestion subjective, le volet qualitatif de l'enquête avait pour objectif d'identifier les canaux de l'inconfort dans les TP. Pour rappel, nous analysons dans Haywood, Koning et Monchambert (2017) les réponses des individus ayant accepté de participer au verso du questionnaire et ayant noté la gêne associée à 8 facteurs reliés à la congestion. Le tableau 7 décrit les résultats économétriques associés.

Seules trois dimensions inter-réagissent avec une très forte densité de voyageurs pour niveler significativement la satisfaction des répondants à l'égard du confort. En comparant la taille des coefficients, on constate que le principal facteur est le fait d'être debout, vraisemblablement car cette station génère une plus grande fatigue physique. Ensuite, la mauvaise utilisation du temps (pour travailler, échanger au téléphone avec ses proches, se divertir), complexifiée en raison d'une trop forte fréquentation dans les wagons, explique le niveau d'insatisfaction à l'égard du confort. Ce résultat est conforme avec nos observations dans Bounie, Adoue, Koning et

L’Hostis (2019) où nous valorisons la connectivité des smart phones à Internet dans les TP franciliens¹⁹. Finalement, le troisième canal de l’inconfort semble être d’une nature plus psychologique, la promiscuité physique étant souvent associée à une intrusion dans « l’espace personnel », avec des conséquences néfastes sur le stress des individus.

Tableau 7 – Les canaux de l’inconfort dans le métro

Main model	CS*	
	Coef.	Std. err.
Crowding effect		
IVD × Standing CCD	-0.033***	0.013
IVD × Over-closeness CCD	-0.028*	0.016
IVD × Noise CCD	-0.020	0.012
IVD × Robbery CCD	-0.002	0.015
IVD × Fall CCD	0.012	0.014
IVD × Smell CCD	-0.012	0.013
IVD × Time Loss CCD	-0.022	0.014
IVD × Wasted Time CCD	-0.030**	0.014
Journey characteristics	Y	
Individual characteristics	Y	
∑ CCD	0.026**	0.011
Constant	5.085***	1.246
Likelihood function	-1121.009	
Wald chi2(18)	225.58	
Prob > chi2	0.000	
Selection model	sub-sample participation (dummy)	
Excluded Instruments		
Motive (1 = work/0 = other)	-0.140	0.091
Gender mismatch (dummy)	0.152**	0.075
Controls		
Morning peak (dummy)	-0.469***	0.086
Door to door travel time (hours)	0.039	0.074
Daily usage of the line	0.170*	0.095
Age (years)	0.015	0.352
Constant	-0.492***	0.170
ρ	0.774***	0.096
Wald test of indep. eqns. (rho = 0):		
chi2(1)	18.51	
Prob > chi2	0.000	
Number of observations	999	
Censored observations	721	
Uncensored observations	278	

Notes. This table reports result estimating Eq. (2) taking into account selection. ρ is the estimated correlation between residual of Eq. (2), ε , and residuals of the selection equation.

Si l’aménagement intérieur des véhicules et une offre supérieure de places assises sont primordiales pour améliorer la perception individuelle du confort, les politiques publiques peuvent donc activer d’autres leviers. Ainsi, il pourrait être tout aussi important de s’assurer que la connectivité à Internet des téléphones, montres ou autres objets « intelligents » soit bonne et que les individus puissent utiliser au mieux leurs temps de déplacement. En outre, une communication ciblée visant à limiter les incivilités et à inciter les gens au respect de l’espace personnel d’autrui

¹⁹ Dans Bounie, Adoue, Koning et L’Hostis (2019) nous trouvons que la valeur du temps baisserait de 12% si la connectivité à Internet dans les TP franciliens était « optimale » (i.e. un time multiplier moyen de 0,88). Nous proposons également d’autres time multipliers, pour des changements plus graduels ou pour différents types de voyageurs.

pourrait être bénéfique pour certains publics. Dans Haywood, Koning et Monchambert (2017), nous montrons en effet que les femmes sont généralement plus préoccupées que les hommes par les 3 facteurs de l'inconfort que nous venons d'identifier mais également que les individus les plus riches sont plus perturbés par une mauvaise utilisation du temps de voyage ou par une promiscuité physique excessive dans les TP.

4.2 Coûts marginaux externes

Tandis que les fonctions de congestion proposées dans Beziat, Koning et Toilier (2017) permettent d'estimer des pertes de temps marginales dans un cadre multi-classes ainsi que des coefficients d'équivalence VP endogènes (voir annexe 7.5), nous préférons centrer nos propos sur les résultats obtenus avec les fonctions de coûts généralisés et de coûts environnementaux estimées dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020). En croisant les paramètres des tableaux 3 et 6 avec les flux kilométriques moyens de la situation effective, nous constatons que les coûts marginaux externes des VP sont inférieurs à ceux des véhicules de fret, mais aussi que chaque kilomètre additionnel est plus coûteux s'il est parcouru durant les heures de pointe du matin. Ainsi, le coût externe d'une VP à ces moments de la journée est de 0,432 eu/vkm (0,236 eu/vkm durant les heures creuses), contre 1,763 eu/vkm pour les VUL (0,827 eu/vkm) et 2,963 eu/vkm pour les PL (1,869 eu/vkm). Etant donné le faible taux de chargement des VUL (tableau 19 en annexe 7.2), on comprend qu'exprimer les coûts externes des véhicules de fret en tonne*kilomètre (tkm) revient à inverser leurs performances relatives (voir tableau 14 ci-dessous).

Conformément à la plupart des études sur ce sujet (Parry et al., 2007 ; CE Delft, 2019 ; Gostner, 2018), l'externalité de congestion routière est la plus coûteuse, suivie par les coûts externes environnementaux puis les dépenses liées d'entretien des routes. Par ailleurs, les coûts marginaux externes de congestion varient grandement entre les périodes de la journée, suivant l'évolution des flux kilométriques horaires, notamment pour les PL dont le coût externe est de 0,700 eu/vkm durant les heures creuses et 1,769 eu/vkm durant les pointes du matin. A l'opposé, les coûts externes environnementaux sont plus stables, les valorisations des émissions de CO₂, de polluants locaux ou sonores étant supérieures uniquement de 2% à 6% durant la pointe du matin. Cette hausse provient des effets indirects de la congestion routière qui est plus intense à ces heures de la journée, avec des vitesses de circulation plus faibles et donc des émissions de polluants plus importantes.

Tableau 8 – Coûts marginaux externes du trafic routier en Ile-de-France

	VP			VUL			PL		
	HC	HPM	HPS	HC	HPM	HPS	HC	HPM	HPS
Flux (veh/h)	227,7	580,8	572,3	12,4	30,3	11,9	10,5	25,6	10,4
Congestion (eu/vkm)	0,125	0,316	0,280	0,598	1,513	1,312	0,700	1,769	1,537
<i>Cong. VP</i> (eu/vkm)	0,102	0,261	0,258	0,474	1,208	1,190	0,556	1,417	1,396
<i>Cong. VUL</i> (eu/vkm)	0,011	0,026	0,010	0,061	0,148	0,058	0,069	0,168	0,066
<i>Cong. PL</i> (eu/vkm)	0,012	0,029	0,012	0,064	0,156	0,063	0,075	0,184	0,075
Emissions (eu/vkm)	0,102	0,106	0,104	0,218	0,237	0,226	1,116	1,137	1,123
<i>Directes</i> (eu/vkm)	0,099	0,099	0,098	0,204	0,201	0,199	1,099	1,095	1,091
<i>Indirectes VP</i> (eu/vkm)	0,002	0,004	0,004	0,009	0,022	0,022	0,010	0,026	0,026
<i>Indirectes VUL</i> (eu/vkm)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001
<i>Indirectes PL</i> (eu/vkm)	0,001	0,003	0,001	0,005	0,011	0,005	0,006	0,014	0,006
Usure routes (eu/vkm)	0,009	0,009	0,009	0,010	0,011	0,010	0,054	0,053	0,053
Coût externe (eu/vkm)	0,236	0,432	0,392	0,827	1,760	1,549	1,869	2,959	2,713
Taxes (eu/vkm)	0,083	0,083	0,083	0,084	0,084	0,084	0,176	0,176	0,176
Taux de couverture	35,2%	19,2%	21,2%	10,2%	4,8%	5,4%	9,4%	5,9%	6,5%

Les fonctions de coûts généralisés et environnementaux que nous proposons permettent par conséquent de distinguer, au sein des coûts marginaux externes, leurs parts constantes et variables. En procédant de la sorte, nous pouvons quantifier les effets croisés de congestion ainsi que les coûts environnementaux indirects, principales originalités de nos études. Etant donnée leur importance dans le trafic routier total, on constate tout d’abord que les VP « reçoivent » une large part du coût externe de congestion (entre 80% et 90%). Le coût généralisé des véhicules de fret est toutefois largement impacté par ses propres flux, le VUL marginal augmentant par exemple les pertes temporelles des PL d’un montant équivalent à 0,156 eu/vkm pendant la pointe du matin²⁰. Concernant les coûts environnementaux indirects, ils peuvent sembler négligeables à première vue. Précisons toutefois que les paramètres estimés pour les VUL et les PL dépassent ceux recommandés par la DGITM pour prendre en

²⁰ Ces résultats sont conformes à ceux obtenus dans Beziat, Koning et Toilier (2017) et présentés en annexe 7.5.

compte les dépenses liées à l'usure des routes. Ainsi, ajouter un PL au flux des heures de pointe du matin revient, via la hausse des émissions liées à une congestion routière accrue, à augmenter le coût externe environnemental des PL de 0,026 eu/vkm. A titre de comparaison, l'usure des infrastructures par une VP est 3 fois moins coûteuse (0,009 eu/vkm).

Finalement, le tableau 8 illustre les taux de couverture des coûts externes par les taxes actuelles, péages ou autres prélèvements spécifiques aux déplacements routiers. Pour rappels, nous avons montré dans la section 2 que, d'un point de vue théorique, le bien-être collectif est maximisé lorsque la mobilité est tarifée à son coût marginal social. Dès que ce n'est pas le cas, les voyageurs reçoivent un signal prix biaisé et se déplacent trop par rapport à l'optimum. Comme nous pouvons le constater, nos estimations aboutissent à des taux de couverture bien inférieurs à 100%, quels que soient les véhicules ou la période considérés. Les routes franciliennes étant libres d'accès dans leur immense majorité, les taxes afférentes aux dépenses de transport (essentiellement la TICPE et la TVA sur celle-ci, voir le tableau 19 en annexe 7.2) dépassent uniquement les frais d'entretien des infrastructures. Autrement dit, les coûts marginaux externes environnementaux et de congestion ne sont pas intégrés au système actuel de prix. C'est surtout vrai pour les VUL, dont les taux de couverture atteignent au maximum 10% durant les heures creuses. Les « meilleurs élèves » sont dans cette optique les VP, même si elles souffrent d'une large sous-tarifcation, leur taux de couverture étant de 20% durant les heures de pointe. Bien qu'adoptant une posture différente pour les coûts de congestion, nous aboutissons à des résultats qualitativement similaires dans Crozet et Koning (2019a, 2019b) et les chiffres du tableau 8 sont conformes à ceux proposés dans Rapoport et al. (2018).

La fonction de congestion que nous avons estimée dans Haywood et Koning (2015) est quant à elle particulièrement utile pour valoriser les effets externes d'inconfort dans les TP. L'équation (60) permet ainsi de quantifier la hausse du time multiplier, et donc de la valeur du temps, lorsque la densité de voyageurs dans les wagons augmente. A l'aide de cette relation, il est par conséquent possible d'endogénéiser la fonction de coût généralisé du métro - en supposant une offre fixe - et de calculer des coûts marginaux externes de congestion pour les voyages dans la situation effective. Le tableau 9 détaille les paramètres obtenus dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) pour les différentes lignes du réseau parisien, durant les heures de pointe (soir et matin confondus).

Le premier constat concerne l'ampleur du coût externe de congestion dans les métros qui atteint 0,123 eu/pkm en moyenne. Ce « mal » des transports urbains est certes inférieur au coût marginal de congestion que l'on peut estimer pour les VP dans Paris (0,303 eu/vkm, soit 0,233 eu/pkm en supposant 1,3 individus par VP, voir tableau 32 dans l'annexe 7.5) mais il dépasse leur coût environnemental (0,077 eu/pkm), d'où l'importance de bien prendre en compte l'externalité d'inconfort dans les TP dans une

perspective de comparaisons intermodales (Crozet et Koning, 2019b). On observe ensuite une réelle hétérogénéité du coût marginal externe de congestion entre les lignes. Précisons que la valeur de ce paramètre ne dépend pas uniquement de la fréquentation moyenne des différentes lignes mais aussi du nombre de places assises qu’elles proposent ainsi que de leurs longueurs et de leurs vitesses commerciales, l’inconfort étant subi plus ou moins longtemps suivant ces deux dimensions. Comme nous le montrerons plus loin, ces coûts externes possèdent une réelle portée opérationnelle dans le cadre des analyses coûts-bénéfices des politiques de transport qui réussiraient à désengorger les métros lorsqu’ils sont saturés.

Tableau 9 – Coûts externes de congestion dans les métros

Ligne	Pl_assises (voy/train)	Traf_moy (voy/train)	Cm_Cong (eu/pkm)	Ligne	Pl_assises (voy/train)	Traf_moy (voy/train)	Cm_Cong (eu/pkm)
1	242	857	0,178	9	266	592	0,135
2	158	541	0,214	10	266	328	0,069
3	266	416	0,098	11	212	209	0,000
4	230	766	0,154	12	266	452	0,102
5	266	557	0,114	13	188	500	0,136
6	266	507	0,107	14	216	339	0,055
7	188	574	0,176	Moy.	236	531	0,123
8	188	550	0,160	-	-	-	-

Avant de détailler les estimations des pertes de bien-être collectif liées à la sous-tarifcation des coûts marginaux externes, précisons que nous avons décidé de ne pas proposer de taux de couverture pour les TP. La première raison a trait aux coûts fixes nécessaires à leur fonctionnement, même dans une perspective de court terme. Contrairement aux infrastructures routières dont les capacités ne sont pas ajustables et dont les coûts fixes ont probablement déjà été amortis, leur existence implique qu’une tarification au coût marginal de production maximiserait certes le bien-être des usagers mais générerait une perte financière pour l’exploitant, justifiant donc une subvention pour combler l’écart par rapport au coût moyen de production. Ensuite, les montants respectifs de la contribution individuelle des usagers des métros parisiens (0,17 eu/pkm) et de l’aide publique actuellement reçue par l’exploitant (0,34 eu/pkm) sont proches des valeurs qui correspondraient à la subvention optimale s_o (voir Parry et Small, 2009 ; Basso et Silva, 2014). Outre l’objectif d’équilibre financier pour l’exploitant, celle-ci comporte une seconde composante liée aux bénéfices collectifs émanant d’un report modal depuis les VP (lorsque ces dernières présentent un taux de couverture des coûts externes inférieur à 100%). En adaptant Proost et Thisse (2019), on pose :

$$s_o = (CMP^{TC} - Cmp^{TC}) + \beta(\tau^{VP} - Cme^{VP}) \quad (61)$$

Où CMP^{TC} décrit le coût moyen d’exploitation des métros (0,51 eu/pkm), Cmp^{TC} est le coût marginal de production du service (0,18 eu/pkm), τ^{VP} est le niveau des taxes actuelles pour les VP (0,083 eu/vkm=0,064 eu/pkm),

Cme^{VP} leur coût marginal externe (0,416 eu/vkm=0,320 eu/pkm) et β représente la part des nouveaux voyageurs qui utiliseraient la VP à la place des métros si ces derniers n'étaient pas subventionnés.

En faisant varier β entre 0,2 et 0,1, conformément aux preuves empiriques (van Goeverden et al., 2006), on trouve que s_o oscille entre 0,28 et 0,30 eu/pkm. Autrement dit, le montant actuel de la subvention (0,34 eu/pkm) prend convenablement en compte les enjeux financiers pour l'exploitant du réseau de TP ainsi que les méfaits collectifs générés par les VP dans Paris, la congestion routière et les nuisances environnementales notamment. A contrario, cette subvention néglige les coûts marginaux externes de congestion dans les métros et leurs usagers reçoivent un signal prix biaisé par rapport à celui qui prévaudrait si l'optimum intègre les coûts d'inconfort. Cette distorsion conduit donc les voyageurs à demander « trop » de déplacements en métros et à détériorer le confort de tous, ce qui génère le « coût économique de la congestion » (CEC).

4.3 Pertes de bien-être collectif

Par soucis de cohérence avec la section 2, nous détaillons tout d'abord les résultats obtenus dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) pour le cas des métros parisiens. Rappelons qu'à notre connaissance, nous sommes les premiers à transposer le modèle pigouvien au cas des TP. Nous présentons ensuite les pertes de bien-être collectif que nous estimons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) avec le modèle de congestion multi-classes, ce qui nous permet notamment d'étudier la contribution du TMV aux coûts sociaux du transport routier.

4.3.1 Sous-tarification de la congestion dans les métros

La fonction de coût marginal social dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) comporte, outre les effets de congestion, le coût marginal d'exploitation. Etant donné l'écart entre le coût additionnel de production du service (0,18 eu/pkm) et le prix du titre de transport (0,17 eu/pkm), une part du CEC provient donc d'économies liées à une moindre fréquentation des TP à l'optimum. Comme le montre le tableau 10, la sur-utilisation actuelle du réseau durant les heures de pointe varie entre 5% (ligne 11) et 12,5% (ligne 2), avec une moyenne de 9%. Concernant les pertes de bien-être collectif, elles sont plus importantes pour les lignes 1 et 7 (13,0 et 9,5 M eu/an respectivement) mais quasi-nulles pour les lignes 11, 10 et 14. En faisant la somme des estimations pour les différentes lignes, on trouve que le CEC se chiffre à 65 M eu/an pour l'ensemble du

réseau de métros parisiens. L'annexe 7.6 discute la sensibilité de ces résultats aux hypothèses faites sur la valeur des principaux paramètres.

Il est possible de décomposer ces pertes collectives entre les gains des voyageurs qui continueraient de se déplacer (à un coût généralisé inférieur) si l'optimum était atteint spontanément (i.e. sans péage additionnel), moins les pertes des individus qui doivent cesser de se mouvoir afin que l'optimum soit atteint (car leur bénéfice marginal est inférieur au coût marginal social de l'optimum), plus les économies faites par l'opérateur. Ce faisant, on constate tout d'abord que les économies d'exploitation sont réelles mais minoritaires (12% du CEC). Par ailleurs, les gains (théoriques) des voyageurs qui utiliseraient toujours les métros à l'optimum sont, en valeur absolue, deux fois supérieures aux pertes des individus qui ne se déplaceraient plus (109 M euros contre 53 M euros). Ce constat est inversé si on raisonne en valeur *per capita*, avec des pertes pour les voyageurs « en trop » près de 5 fois plus fortes que les gains de ceux qui continueraient d'utiliser les métros à l'optimum.

Tableau 10 – Coût économique de la congestion dans les métros

Line	Q_0 (pass/t)	Q^* (pass/t)	ECC (M eu/y)	Gains (M eu/y)	Losses (M eu/y)	Savings (M eu/y)	$MEC(Q_0)$ (eu/pkm)	f^* (eu/pkm)	Rev. (M eu/y)
L1	857	763	13.0	21.9	10.3	1.4	0.178	0.338	187.6
L2	541	481	6.2	10.5	4.9	0.6	0.214	0.370	88.5
L3	416	387	1.7	2.9	1.5	0.3	0.098	0.271	43.1
L4	766	696	5.4	9.2	4.5	0.7	0.154	0.320	98.5
L5	557	512	2.9	4.9	2.5	0.5	0.114	0.285	62.0
L6	507	468	2.5	4.3	2.2	0.4	0.107	0.279	52.4
L7	574	515	9.5	16.1	7.6	1.0	0.176	0.338	148.2
L8	550	495	7.0	11.9	5.7	0.8	0.160	0.324	116.7
L9	592	542	6.1	10.4	5.1	0.8	0.135	0.303	119.7
L10	328	310	0.4	0.7	0.4	0.1	0.069	0.245	14.1
L11	209	199	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.180	1.1
L12	452	420	1.8	3.0	1.6	0.3	0.102	0.274	43.7
L13	500	453	7.6	12.8	6.3	1.0	0.136	0.303	133.6
L14	339	318	0.6	0.9	0.5	0.2	0.055	0.232	15.8
Total	-	-	64.6	109.3	52.9	8.2	-	-	1129.2

Notes: *Gains* corresponds to the comfort gains of travelers if the level of subway usage is optimal; *Losses* represents the reduction in surplus of those travelers who no longer travel at the optimum; *Savings* gives the decrease in the PT operator's deficit; *Rev.* gives the additional revenues with a hypothetical increase in PT fares by $f^* - f_0$.

Les voyageurs n'intégrant pas seuls les coûts externes de congestion qu'ils infligent aux autres usagers, les économistes préconisent d'introduire un péage « internalisant ». Les réseaux de TP de Londres ou de Hong-Kong, pour ne donner que ces deux exemples, voient ainsi leur tarification majorée durant les heures de pointe, en liens avec une congestion supérieure à ces moments de la journée. Le péage optimal f^* oscille entre 0,18 et 0,37 eu/pkm²¹. Une tarification au coût marginal social des métros impliquerait donc des dépenses monétaires en hausse de 6% à 117% pour les usagers. Surtout, la dernière colonne du tableau 10 illustre que cette stratégie induirait de considérables transferts de surplus économique. En dépit du recul du nombre de voyageurs à l'optimum, l'opérateur verrait en effet ses revenus augmenter de 1130 M eu/an. Ce montant, 17 fois

²¹ Précisons aussi que, par rapport à la situation effective, le « sur-péage optimal » s'obtient en minorant f^* du montant du billet (de 0,17 eu/pkm).

supérieur au CEC que la stratégie de « régulation par les prix » vise à supprimer, nécessiterait donc un recyclage adéquate des recettes additionnelles, en premier lieu à destination des individus qui doivent cesser d'utiliser les métros. Un remboursement rétroactif des titres de transport, une réduction des impôts locaux, une hausse des salaires (rendue possible par une baisse du financement des TP par les employeurs) ou des investissements dans les modes alternatifs sont autant de solutions envisageables pour neutraliser l'effet d'une tarification optimale de la congestion sur le bien-être des voyageurs.

4.3.2 Sous-tarification de la congestion routière et des coûts environnementaux

Nous discutons à présent les pertes de bien-être collectif estimées pour les routes franciliennes dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020). Comme illustré dans le tableau 11, il y avait près de 159 M de vkm quotidiennement parcourus en 2012, dont 8,2% réalisés par les véhicules de fret. Si les conducteurs internalisaient l'ensemble des coûts externes qu'ils génèrent, la circulation serait réduite de 18% environ. Bien évidemment, le nombre de conducteurs « en trop » diffère selon les types de véhicules (-17% de VP, -13% de VUL et -27% de PL sur toute la journée) ou les créneaux horaires (-18% durant les heures creuses et -15% durant la pointe matinale). D'après ces calculs, le bien-être collectif pourrait être supérieur de 4,4 M eu/jour si l'optimum économique était atteint, passant de 90,5 M eu/jour à 94,9 M eu/jour (+4,9%). En considérant 260 jours ouvrés dans une année, les pertes liées à la sur-utilisation des routes se chiffrent donc à 1144 M eu (soit environ 0,2% du PIB régional). Une très grande partie de cette « facture » provient des coûts environnementaux qui seraient quotidiennement réduits de 4,6 M eu.

Pour forcer les conducteurs à prendre en compte les impacts négatifs de leurs décisions individuelles, il faudrait instaurer des péages kilométriques variables selon les moments de la journée et, surtout, suivant les types de véhicules. Rappelons que dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) la tarification optimale des routes est « moyenne » et concerne indifféremment l'ensemble du réseau francilien. En moyenne donc, le péage optimal est de 0,240 eu/vkm pour les VP, de 0,834 eu/vkm pour les VUL et de 1,913 eu/vkm pour les PL. Par rapport à la situation effective, les taxes et autres prélèvements publics devraient être multipliés environ par 3 pour les VP et par 10 (ou plus) pour les véhicules de fret.

Tableau 11 – Pertes de bien-être collectif sur les routes par rapport à l’optimum de premier rang

	Equilibre effectif (EF)				Equilibre optimal (EO)				EO vs EF
	HPM	HPS	HC	Jour	HPM	HPS	HC	Jour	Jour
Vkm VP (M/per.)	24,4	24,0	95,6	144,0	20,9	20,4	78,3	119,5	-17,0%
Vkm VUL (M/per.)	1,3	0,5	5,2	7,0	1,0	0,4	4,6	6,1	-13,1%
Vkm PL (M/per.)	1,1	0,4	4,4	5,9	0,8	0,3	3,2	4,3	-26,8%
Taxes VP (eu/vkm)	0,083				0,385	0,351	0,214	0,240	+189,2%
Taxes VUL (eu/vkm)	0,084				1,518	1,336	0,716	0,834	+892,9%
Taxes PL (eu/vkm)	0,176				2,750	2,527	1,768	1,913	+986,9%
CG VP (eu/vkm)	0,575	0,486	0,372	0,398	0,510	0,435	0,343	0,365	-8,3%
CG VUL (eu/vkm)	0,926	0,726	0,512	0,564	0,792	0,624	0,454	0,497	-19,5%
CG PL (eu/vkm)	1,324	1,071	0,780	0,849	1,149	0,936	0,704	0,760	-10,5%
SW tout (Meu/per.)	27,6	19,0	43,8	90,5	28,8	19,8	46,3	94,9	+4,9%
U-C VP (M eu/per.)	20,1	17,1	27,2	64,3	14,7	12,3	18,2	45,2	-29,7%
Env. VP (M eu/per.)	-2,6	-2,5	-9,7	-14,8	-2,2	-2,1	-7,9	-12,2	-17,8%
FP VP (M eu/per.)	1,8	1,8	7,1	10,7	7,9	7,0	16,1	30,9	+188,8%
U-C fret (M eu/per.)	9,7	3,2	24,4	37,2	5,9	1,8	15,7	23,4	-37,1%
Env. fret (M eu/per.)	-1,5	-0,6	-6,1	-8,2	-1,2	-0,4	-4,6	-6,2	-24,4%
FP fret (M eu/per.)	0,2	0,1	0,9	1,2	3,7	1,3	8,8	13,8	+633,3%

A l’instar de ce qui a été observé pour les métros, une telle politique engendrerait d’importants transferts de surplus économique. Ainsi, la décomposition du bien-être collectif change radicalement par rapport à l’équilibre effectif : l’utilité nette des conducteurs une fois l’optimum atteint baisserait de 33,0 M eu/jour tandis que les recettes publiques augmenteraient de 32,8 M eu/jour. Alors même que les coûts généralisés des VP, VUL et PL diminuent substantiellement en raison d’une congestion moindre (entre -10% et -20%), la mise en place des péages optimaux renchérit considérablement le prix généralisé des routes. On constate au final que le gain pour les finances publiques (net des dépenses d’entretien des routes, en baisse) est 7,5 fois supérieur aux pertes de bien-être collectif que la taxation optimale vise à faire disparaître. Il est raisonnable d’avancer que le recyclage des recettes additionnelles (8528 M eu/an) devrait en priorité cibler les voyageurs qui cessent de se déplacer mais aussi les

transporteurs de fret, leur contribution aux recettes fiscales passant de 1,2 M eu/jour à 13,8 M eu/jour. Comme précédemment, il serait possible de redistribuer une partie des taxes additionnelles directement aux acteurs lésés en abaissant des prélèvements existants ou en investissant dans les infrastructures routières (afin d'améliorer la qualité du service pour les utilisateurs captifs) ou ferrées (afin de faciliter le report modal et d'en limiter la congestion par exemple)²².

Un de nos principaux apports dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) provient des estimations proposées pour une variété d'optimums de second-rang. Une telle situation semble plus réaliste que l'optimum de premier-rang discuté ci-dessus car les décideurs publics pourraient être réticents à l'idée d'introduire une tarification au coût marginal social pour tous les véhicules en même temps. Le tableau 12 synthétise les résultats des 5 optimums de second-rang étudiés. Les conclusions ne sont pas conformes aux idées reçues. Alors même que les VUL et les PL ont actuellement les plus bas taux de couverture des coûts externes, il semblerait plus judicieux de ne pas trop modifier leur système de taxation. On observe en effet que les gains de bien-être collectif (totaux ou unitaires) sont plus proches de ceux obtenus à l'optimum de premier-rang lorsqu'on ne touche pas aux taxes des véhicules de fret et qu'on cible, au contraire, les seules VP. Ce résultat est en fait très logique puisque les VP représentent près de 90% du trafic routier en Ile-de-France et leurs taxes actuelles sont également loin de couvrir leurs coûts externes. En outre, on constate que le trafic VP augmente substantiellement (+2 M vkm/jour) si on se contente de cibler les VUL et les PL, cette demande induite réduisant au final peu la congestion routière et les nuisances environnementales.

Le tableau 12 offre trois autres conclusions. Tout d'abord, on comprend que le schéma de taxation qui sera retenu dépend foncièrement de l'objectif visé. S'il s'agit de maximiser les recettes publiques et/ou de limiter les nuisances environnementales, il faudrait en priorité cibler les VP et les PL, sans modifier les taxes des VUL. A l'inverse, s'il s'agit de limiter les pertes pour les usagers des routes, il est alors préférable de ne taxer que les PL. On constate ensuite que la contribution du TMV au bien-être collectif est très stable, quel que soit l'équilibre considéré. En additionnant l'utilité nette des conducteurs de VUL et de PL, leurs coûts environnementaux et leurs contributions nettes aux finances publiques, le TMV compte pour 39-40% du bien-être collectif.

²² L'annexe 7.6 propose des tests de sensibilité par rapport aux valeurs des élasticités de la demande. Le montant des péages optimaux est peu affecté par les hypothèses faites, contrairement à la baisse des trafics à l'optimum et aux pertes de bien-être collectif. De ces résultats, nous concluons également que de futures recherches doivent être entreprises pour donner de réelles idées sur la sensibilité de la demande de TMV au prix généralisé des déplacements routiers, notamment pour l'élasticité croisée VUL/PL.

Tableau 12 – Optimums de second-rang (pour toute une journée)

	Equilibre Effectif	Optimum 1 ^{er} rang	On ne touche pas aux taxes des :				
			VP	PL	VUL	VUL&PL	VP&VUL
Taxes VP (eu/vkm)	0,083	0,240	0,083	0,239	0,239	0,239	0,083
Taxes VUL (eu/vkm)	0,084	0,834	0,819	0,463	0,084	0,084	0,084
Taxes PL (eu/vkm)	0,176	1,913	1,901	0,176	1,690	0,176	1,682
Vkm VP (M/jour)	144,0	119,5	146,0	118,1	118,7	117,7	145,1
Vkm fret (M/jour)	12,9	10,4	10,3	12,4	11,8	13,0	11,7
Vkm tout (M/jour)	156,9 (n.a.)	129,9 (-17,2%)	156,3 (-0,4%)	130,4 (-16,9%)	130,5 (-16,8%)	130,7 (-16,7%)	156,8 (-0,1%)
U-C tout (M eu/jour)	101,5	68,6	89,0	79,5	74,2	81,8	94,2
Env. tout (M eu/jour)	-23,0	-18,4	-21,1	-20,4	-18,5	-20,3	-21,2
FP tout (M eu/jour)	11,9	44,7	24,4	34,3	38,4	31,6	18,5
SW tout (M eu/jour)	90,5 (n.a.)	94,9 (+4,9%)	92,2 (+2,0%)	93,5 (+3,3%)	94,1 (+4,0%)	93,1 (+2,9%)	91,4 (+1,1%)
Part du fret dans SW	40,3%	39,3%	39,8%	39,7%	39,6%	39,9%	40,1%
SW unitaire (eu/vkm)	0,576 (n.a.)	0,730 (+26,7%)	0,590 (+2,4%)	0,716 (+24,3%)	0,721 (+25,0%)	0,712 (+23,5%)	0,583 (+1,2%)
Coût col. max. (% nouvelle taxe)	(n.a.)	14,5%	15,1%	14,5%	14,5%	14,4%	15,4%

Finalement, nos estimations soulignent qu'utiliser les outils tarifaires ne constitue pas nécessairement un gageur. Si le support d'une tarification internalisante existe déjà pour les TP avec les cartes d'abonnement, il faudrait jouer sur la taxation des carburants afin de limiter au maximum les coûts de collecte du péage pour les véhicules routiers. Au cas où une modulation de la TICPE ne serait pas possible - en raisons des défis techniques et juridiques auxquels il faudra faire face afin de s'assurer que l'ensemble du carburant brûlé en Ile-de-France y ait bien été acheté -, il conviendrait alors de vérifier que les dépenses engagées pour collecter le péage ne dépassent pas, en moyenne, 15% des montants additionnels (et unitaires), sinon l'intervention présentera un ratio bénéfices/coûts inférieur à l'unité. Les quelques exemples recensés dans Gostner (2018) ou ADEME (2014) laissent penser que cette thématique des coûts de collecte des péages urbains pourrait foncièrement limiter l'intérêt d'une tarification optimale des routes.

4.3.4 Discussions

Les calculs que nous venons de présenter souffrent d'approximations et d'oublis. Il convient à présent de les discuter afin de savoir comment améliorer nos résultats et s'ils constituent des sur- ou des sous-estimations.

Les premières simplifications concernent le périmètre géographique des infrastructures étudiées. Dans le cas des TP ferrés, nous nous sommes contentés de quantifier les coûts de congestion pour le réseau de métros parisiens, alors qu'il serait vraisemblablement justifié d'analyser aussi les pertes de bien-être collectif dans les RER ou les Transiliens (voire les tramways et les bus), également sujets à une forte saturation sur certains tronçons (Rapoport et al., 2018)²³. Pour les routes, nous avons étudié l'ensemble du réseau francilien, sans distinguer la demande entre les différentes infrastructures utilisées ni les zones traversées. Ce dernier point mériterait d'être approfondi car les études qui proposent des grilles de tarification optimale se concentrent généralement sur les espaces centraux des agglomérations, que le schéma retenu soit un « péage de zone » ou un « péage cordon ». Il est donc vraisemblable que la baisse du trafic que nous estimons et les gains de bien-être collectif associés soient exagérés par rapport à ce qui pourrait être réellement obtenu, un hypothétique péage urbain ayant peu de chance de s'appliquer à l'ensemble des routes franciliennes²⁴. Afin de coller au plus près du réel, il serait par ailleurs pertinent de différencier les péages selon les types de motorisation, l'âge des véhicules, mais aussi leurs taux d'occupation (voir Rapoport et al., 2018 ; Crozet et Koning, 2019a).

Rappelons ensuite que notre approche théorique occulte les « scheduling costs » qui peuvent composer une part non négligeable des coûts privés et sociaux des déplacements sur les routes ou dans les TP ferrés. Aux gains de temps ou de confort résultant d'une utilisation optimale des infrastructures, il conviendrait donc d'ajouter des bénéfices liés au fait que les individus peuvent rapprocher leurs horaires de départ et/ou d'arrivée de leurs plannings « idéaux » (Arnott et al., 1990, de Palma et al., 2017). Ensuite, nous avons expliqué que le CEC équivaut au solde entre les gains des usagers qui continuent de se déplacer à l'optimum et les pertes des individus qui réduisent leurs déplacements. Or, la valeur du temps est corrélée aux revenus individuels (Wardman, 2004 ; Small, 2012) et nous

²³ Il pourrait aussi être pertinent d'étudier les coûts de congestion dans les métros durant les heures creuses, puisque nous nous limitons dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) aux seules heures de pointe.

²⁴ Nous pouvons déduire de Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) que Paris et les zones très denses d'Île-de-France représentent 35% des distances parcourues. Si, en première approximation, on fait l'hypothèse que les baisses de trafic à l'optimum, les gains de bien-être collectif et les recettes d'une tarification internalisante sont proportionnels aux distances parcourues, un péage urbain se limitant à la zone centrale réduira le trafic de 8,5 M vkm/jour, améliorera le bien-être collectif de 1,5 M eu/jour et le solde des finances publiques de 10 M eu/jour.

avons constaté dans Haywood, Koning et Monchambert (2017) que les personnes aisées se déclaraient plus gênées par la congestion dans les métros. Autrement dit, l'utilisation d'une valeur du temps moyenne - comme nous le faisons - pourrait sous-estimer les gains des gagnants et sur-estimer les pertes des perdants. Dans une optique de court-terme, il y a donc au moins deux raisons de penser que nos calculs représentent une borne inférieure des pertes causées par la congestion des infrastructures.

Pour les coûts environnementaux, notre choix de les ignorer dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) peut certes se justifier par le fait que les métros parisiens circulent avec de l'énergie électrique et ont des coûts externes négligeables (Rapoport et al., 2018). Dans le cadre d'une analyse « idéale », on devrait toutefois compter les émissions de GES ou de polluants locaux liées aux phases amont et aval du système nucléaire national. En outre, il a été démontré que la qualité de l'air dans les métros parisiens était très mauvaise, en raison de l'abrasion des pneus lors du freinage des véhicules et d'une mauvaise évacuation de l'air. Concernant nos études sur les routes, le fait que la flotte urbaine de véhicules modélisée dans COPCETE ne soit pas conforme à celle observée en Ile-de-France par Carteret et al. (2015) à l'aide d'enregistrements vidéos pourrait conduire à une mauvaise estimation des émissions de polluants. Comme discuté dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018), tandis que COPCETE suppose des véhicules plus récents que la « vraie » flotte francilienne, il prend en compte des véhicules plus gros, ces deux effets se compensant en termes d'émissions. Si les hypothèses faites concernant les coûts et bénéfices pour les finances publiques semblent au final avoir une influence modeste²⁵, la principale incertitude pourrait concerner la non-prise en compte des alternatives modales dans nos modèles théoriques.

Une question cruciale a en effet trait au devenir des voyageurs qui doivent cesser de se déplacer pour que soit atteint l'optimum, sur les routes ou dans les TP, et à leurs éventuelles incidences sur les performances des autres réseaux. Il est ainsi possible qu'une partie des usagers qui quitteraient les métros s'ils étaient utilisés d'une manière optimale opteraient pour la marche à pieds, les bus, les vélos ou les trottinettes électriques. Lorsque la fourniture de ces services est caractérisée par des coûts fixes et que les

²⁵ Le prix du billet de métro étant inférieur au coût marginal d'exploitation, environ 10% du CEC proposé dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) provient d'économies pour l'exploitant en raison d'un trafic moindre à l'optimum. Cette baisse du déficit d'exploitation est contestable car le coût marginal du service est probablement marqué par des paliers et ne baissera que si suffisamment de voyageurs quittent le réseau de TP. Pour les déplacements routiers, les taxes que nous avons considérées dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) et dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) sont peut-être sous-estimées, notamment pour les VP, car elles ne prennent pas en compte les frais de parking et d'autres taxes secondaires (voir Rapoport et al., 2018 ; Crozet et Koning, 2019b). Comme les taxes actuelles couvrent les coûts d'usure de la voirie, une baisse du trafic routier réduirait *ceteris paribus* le bien-être collectif. En regardant sa composition pour l'équilibre effectif ou l'optimum sans péage, on constate cependant que cet effet est secondaire par rapport à l'utilité nette des individus ou aux coûts environnementaux.

économies d'échelle y sont sous-exploitées, le report modal pourrait générer des gains pour l'exploitant et les utilisateurs historiques, suggérant donc que le CEC que nous proposons dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) est sur-estimé. Suivant une logique similaire, il est probable qu'une fraction non-négligeable de la baisse du trafic VP calculée dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) s'orientera vers les métros ou les RER. Ces réseaux étant proches de leurs contraintes de capacité, notamment durant les heures de pointe, une arrivée de nouveaux usagers en augmenterait la saturation, avec des pertes collectives qui seraient alors supérieures à celles estimées (et qui pourraient d'ailleurs ne pas se limiter à une dégradation du confort). Sachant que les VP constituent le mode majoritaire en Ile-de-France (en termes de pkm) mais aussi que la baisse des trafics à l'optimum est plus forte pour les routes que pour les métros, on peut au final imaginer que l'éventuelle sous-estimation des pertes de bien-être collectif dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) l'emporte sur l'éventuelle sur-estimation dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) en raison de ces « externalités croisées »²⁶.

4.4 Coût économique ou coût total de congestion

Tandis que les pertes sociales que nous venons de calculer constituent vraisemblablement une borne inférieure des « vrais » montants en jeu, le gap est encore plus prononcé si nous retenons une définition alternative des coûts imputables à la congestion des transports urbains.

Comme explicité dans la section 2, il est fréquent de lire dans les rapports officiels que les pertes liées à la sur-utilisation des infrastructures correspondent à la différence entre les ressources actuellement consommées par les voyageurs et celles qui prévaudraient au cas où les routes seraient vides (ou non congestionnées). Le tableau 13 propose des estimations du « coût total de la congestion » (CTC) pour les routes franciliennes et les métros parisiens, durant les heures de pointe. Afin de faciliter les comparaisons des résultats avec les CEC, nous occultons les taxes ou prélèvements publics, les coûts d'exploitation ou d'usure des infrastructures et les nuisances environnementales, nous limitant donc aux seuls coûts privés (caractérisés par l'externalité technologique de congestion). Pour le réseau de métros, nous considérons 14 lignes « moyennes », d'une longueur de 14,5 km chacune et proposant 307 services durant les 4 heures de pointe quotidiennes (260 jours/an). Le

²⁶ Ce raisonnement n'est plus valable au cas où l'offre de transports venait à changer considérablement (on pourrait ainsi au Grand Paris Express). On comprend donc qu'une question cruciale concerne l'utilisation des recettes d'un éventuel péage urbain, les fonds correspondants pouvant servir à financer de nouvelles infrastructures.

niveau de fréquentation de référence Q_m retenu pour estimer le CTC est de 236 voyageurs/train, i.e. tout le monde dispose d'une place assise et toutes les places assises sont occupées. Concernant les déplacements routiers, nous considérons le réseau MODUS de 21000 km (voir annexe 7.2) et le niveau de référence pour calculer le CTC est ici celui des routes vides ($Q_m=0$). Le tableau 13 présente également le péage optimal de congestion ($f(Q_o)$) et les recettes qui découleraient d'une tarification optimale (RTO).

Tableau 13 – Comparaison des coûts liés à la congestion des infrastructures (heures de pointe)

	Métros		Routes	
	Tout	Tout ou Moy.	VP	Fret
Q_e	531 voy/train	636,7 veh/h	580,8 veh/h	55,9 veh/h
Q_o	480 voy/train	542,4 veh/h	496,2 veh/h	46,2 veh/h
Q_m	236 voy/train	0,0 veh/h	0,0 veh/h	0,0 veh/h
$c(Q_e)$	0,623 eu/pkm	0,622 eu/vkm	0,575 eu/vkm	1,108 eu/vkm
$c(Q_m)$	0,557 eu/pkm	0,190 eu/vkm	0,188 eu/vkm	0,211 eu/vkm
$f(Q_o)$	0,111 eu/pkm	0,364 eu/vkm	0,269 eu/vkm	1,389 eu/vkm
CEC (M eu/an)	50,3	466,9	450,7	16,2
CTC (M eu/an)	590,8	6000,4	4905,6	1094,8
RTO (M eu/an)	863,9	4315,9	2913,9	1402,0

Dans la section 2, nous avons avancé sur la base d'une lecture graphique que le CTC était *a priori* supérieur au CEC. En outre, nous avons expliqué que cette mesure des pertes liées à la congestion des transports urbains ne pouvait pas être pertinente pour les économistes car négligeant les bénéfices des voyageurs. La lecture des résultats dans le tableau 13 est sans équivoque. Retenir une définition non-économique du phénomène revient à calculer des pertes imputables à la congestion qui atteindraient 591 M eu/an pour les métros parisiens et 6000 M eu/an pour les routes d'Ile-de-France. Ces montants du CTC représentent entre 11 et 12 fois les CEC que nous estimons ici à 50 M eu/an et à 467 M eu/an respectivement. Tout en reconnaissant que la congestion des infrastructures génère des coûts importants, cette comparaison illustre que leurs usagers en retirent également des gains qui sont bien réels. Les décideurs publics pourraient donc reconnaître qu'un des objectifs des politiques qu'ils mettent en œuvre n'est pas de minimiser les coûts totaux des transports, dans quel cas une solution évidente serait d'en interdire l'utilisation, mais bien de maximiser le bien-être collectif et de s'approcher de leur fréquentation optimale. Même si nous avons mis en avant les divers problèmes découlant d'une tarification au coût marginal social, les recettes associées (864 M eu/an pour les métros et 4316 M eu/an pour les routes) suggèrent ainsi qu'une partie des voyageurs franciliens seraient prête à payer des montants considérables pour utiliser des infrastructures moins congestionnées.

Pour ponctuer cette discussion, il est tentant de réinterpréter les agrégats avancés par Rapoport et al. (2018) dans leur étude sur la gratuité des TP

franciliens à l'aune de ces éléments. Ces auteurs supposent en effet que les coûts externes cumulés de la congestion routière, des émissions de polluants et des nuisances sonores imputables aux VP atteignent entre 10500 et 13500 M eu/an. Reprenant nos premières estimations du coût de l'inconfort dans les métros parisiens (Haywood et Koning, 2012), ils chiffrent également les coûts de congestion dans les TP franciliens à 1000-2000 M eu/an. On comprend en fait que ces montants sont quelque peu biaisés, pour deux raisons principales. Tout d'abord, ils ne font nullement référence aux coûts externes générés par le TMV en Ile-de-France, les VUL et les PL contribuant pourtant significativement aux encombrements routiers et, plus encore, aux émissions de polluants comme nous l'avons montré dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018). Surtout, avancer sur la place publique de tels chiffres pour parler des destructions de ressources collectives générées par les transports ne rend pas hommage aux bienfaits que procurent les infrastructures régionales.

Concernant les coûts de congestion, Rapoport et al. (2018) mobilisent en effet le CTC dans la mesure où ils basent leurs calculs sur le nombre d'heures annuellement perdues par les ménages dans les encombrements routiers. Pour les TP, ils extrapolent le « consentement à payer pour voyager plus confortablement » que nous avons estimé dans Haywood et Koning (2012) en prenant comme niveau de référence la densité des heures creuses, avec l'hypothèse implicite que les individus disposent d'une place assise à ces moments de la journée. Comme illustré dans le tableau 13, viser plutôt une utilisation optimale des routes et des TP reviendrait à considérer des coûts collectifs (au moins) 10 fois inférieurs, car étant nets des bénéfices que retirent les voyageurs. Suivant cette même logique, rappelons que nos estimations dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2010) chiffreraient à 4,4 M eu/jour (1144 M eu/an) les gains liés à une utilisation optimale des routes franciliennes. Comparativement aux montants proposés par Rapoport et al. (2018), on retrouve à nouveau un ratio de 1 à 10.

4.5 Effets externes et analyses coûts-bénéfices

Si nos résultats peuvent alimenter les réflexions sur les enjeux liés à une « bonne » régulation des déplacements urbains, les solutions mises en avant reposent essentiellement sur l'introduction d'un péage optimal, avec les multiples difficultés que suppose cette intervention. Nous souhaitons ponctuer cette section en illustrant, au travers d'exemples concrets, la pertinence de paramètres que nous avons estimés pour « outiller » les évaluations socioéconomiques des projets de transport, les analyses coûts-bénéfices notamment.

Nous mobilisons tout d'abord certains résultats issus de Koning et Kopp (2014) et de Koning et Conway (2016), ces articles s'intéressant tous deux à la hausse de l'utilisation des 2-roues non motorisés dans Paris depuis le début des années 2000. Dans Koning et Kopp (2014), nous évaluons la rentabilité socioéconomique des mesures municipales - inauguration des Vélib's en juillet 2007 et investissements antérieurs dans les pistes cyclables - en comparant l'usage des vélos entre 2006 et 2010 et en estimant les variations du bien-être collectif. A contrario, nous n'analysons pas une intervention publique dans Koning et Conway (2016) puisque nous étudions l'explosion des livraisons et des courses en vélos ou en vélos-cargos entre 2001 et 2014, suite à l'arrivée de nouvelles entreprises sur ce marché. La principale originalité de ces études provient de la récolte d'enquêtes dédiées.

Dans Koning et Kopp (2014), nous avons ainsi interrogé en 2010 près de 200 cyclistes, notamment pour savoir s'ils utilisaient déjà les vélos avant l'inauguration des Vélib's, quels modes ils utilisaient auparavant dans le cas contraire et quelles distances sont réalisées avec les vélos ? Nous trouvons que 51% des nouveaux cyclistes (qui correspondent quant à eux à 46% des personnes interrogées) utilisaient les métros, avec près de 23,6 M pkm/an auparavant parcourus durant les heures de pointe (tableau 14). Le report modal depuis les voitures est plus modeste (5%) et équivaut à une modification annuelle de 7,1 M pkm²⁷, pointes et heures creuses confondues. Dans Koning et Conway (2016), nous avons commencé par identifier les 15 entreprises qui proposaient des courses et des livraisons en vélos dans Paris en 2014 (en BtoB) et nous leurs avons proposé de participer à un questionnaire en ligne, 9 d'entre elles ayant accepté. Durant cette enquête, nous demandions de décrire le nombre quotidien de livraisons, les tonnages transportés, les distances parcourues ainsi que les modes utilisés par leurs clients auparavant. Si les PL réalisaient précédemment 14800 tkm/an désormais assurés avec des vélos ou des vélos-cargos, les VUL constituent logiquement la principale origine modale, avec un report 11 fois supérieur (169000 tkm/an)²⁸.

En croisant ces données sur les reports modaux avec les coûts marginaux externes que nous avons estimés pour les routes et les métros dans Paris (tableaux 32 et 9 respectivement), il est possible de cerner les gains collectifs - nets des pertes de recettes fiscales - qui pourraient être pris en compte dans le cadre d'analyses coûts-bénéfices.

²⁷ Comme détaillé dans Koning et Kopp (2014), le premier facteur cité par les anciens utilisateurs des métros pour justifier leur changement modal concerne la recherche d'un confort des déplacements supérieur.

²⁸ Bien que nous les écartions de l'analyse, une fraction non-négligeable du report modal provient des motos ou scooters (51000 tkm/an).

Tableau 14 – Gains externes liés au report modal vers les 2-roues non motorisés dans Paris

	VP	Métros	PL	VUL
Types de 2-roues	Vélib's et vélos		Vélos et vélos-cargos	
Cm_congestion (eu/pkm ou /tkm)	0,233	0,123	0,893	5,054
Cm_environment (eu/pkm ou /tkm)	0,082	-	0,589	0,823
Cm_usure ou exploit. (eu/pkm ou /tkm)	0,005	0,180	0,029	0,024
Taxes et billets (eu/pkm ou /tkm)	0,064	0,170	0,091	0,286
Reports modaux (1000 pkm ou tkm/an)	7100,0	23760,0	14,8	169,0
Gains décongestion (1000 eu/an) (1)	1654,8	2922,5	13,2	854,2
Gains environnement (1000 eu/an) (2)	584,4	-	8,7	139,1
Gains usure ou exploit. (1000 eu/an) (3)	32,8	4276,8	0,4	4,0
Pertes taxes et billets (1000 eu/an) (4)	453,3	4039,2	1,3	48,3
Solde désagrégé (1000 eu/an) (=1+2+3-4)	1818,7	3160,1	21,1	949,0
Solde agrégé (1000 eu/an)	4978,8		970,1	

On constate tout d'abord que considérer les taux moyens de chargement des véhicules de fret revient à modifier foncièrement nos conclusions, les VUL voyant par exemple leurs coûts marginaux externes de congestion exploser une fois exprimés en eu/tkm en raison d'un tonnage moyen de moins de 300 kg/veh (contre 1,9 tonnes/veh pour les PL, voir tableau 19 en annexe 7.2). On constate ensuite que les gains de décongestion liés aux changements modaux vers les 2-roues non motorisés l'emportent très largement sur les bénéfices environnementaux. En particulier, les gains de décongestion des métros durant les heures de pointe sont conséquents (3 M eu/an) et ne doivent en aucun cas être oubliés des études sur les vélos (Klingen, 2019). Finalement, les bénéfices liés à une moindre utilisation des modes motorisés sont près de 5 fois supérieurs pour le transport de passagers que pour le TMV. Bien que les courses et livraisons à vélos ou en vélos-cargos représentaient en 2014 une infime fraction du transport de fret dans la zone centrale de l'agglomération, il est probable que ce marché se développe rapidement, que ce soit dans le cadre des livraisons instantanées (BtoC) et en complément de l'utilisation des barges fluviales ou des Centres de Distribution Urbaine. Les reports modaux associés pourraient donc générer à terme des gains externes non-négligeables que nos résultats permettent d'appréhender.

Un second exemple de la pertinence pour les analyses coûts-bénéfices des fonctions et paramètres que nous proposons est issu de Haywood et Koning (2015). Nous ponctons en effet notre étude avec une évaluation socioéconomique de l'automatisation de la ligne 1 (inaugurée fin 2012). L'installation des portes palières sur les quais et le changement de matériels roulants (sans conducteur) ont permis d'augmenter la fréquence du service de 20% durant les heures de pointe mais aussi la vitesse commerciale de 10% toute la journée. En supposant que l'utilisation de la ligne 1 est constante, la hausse du nombre de trains durant les pointes permet en outre de réduire (de 20%) la densité de voyageurs dans les wagons. Nous estimons dans Haywood et Koning (2015) que la baisse totale des coûts pour les usagers se chiffre à 103,1 M eu/an. Ces gains se décomposent de la sorte : 3 M eu/an pour l'attente réduite sur les quais et 49,6 M eu/an pour les gains de temps et de confort dans les wagons pendant les heures de pointe, 50,5 M eu/an de gains de temps en véhicules durant les heures creuses. Sachant que le taux d'actualisation social est fixé en France à 4,5% et que l'investissement initial de 629 M eu doit être majoré de 25% pour considérer le coût d'opportunité des fonds publics, la Valeur Actualisée Nette (VAN) des effets socioéconomiques de l'automatisation de la ligne 1 atteint de 550 M eu sur 20 ans. Il est primordial de préciser que les bénéfices liés à la décongestion pendant les heures de pointe, généralement occultés des analyses coûts-bénéfices, représentent 12% des gains annuels. Autrement dit, nos résultats « équipent » les chercheurs et les décideurs publics avec des paramètres qui permettent de considérer des dimensions jusque-là non (ou difficilement) valorisables²⁹.

En guise de conclusion, il est possible de mobiliser nos coûts marginaux externes pour monétariser certains effets socioéconomiques liés à des changements qui affecteraient, à terme, la structure horaire des déplacements urbains. Si la réflexion tourne plutôt actuellement autour de modifications des horaires afin de désengorger les TP franciliens (Munch, 2017), nous faisons l'hypothèse que certaines entreprises acceptent de changer l'emploi du temps de leurs employés de telle sorte que 2% des vkm en VP durant les heures de pointe migrent vers les heures creuses. Bien que cette réorganisation n'impacte pas le volume total des vkm parcourus, vider à la marge le réseau lorsqu'il est saturé devrait générer des gains externes de décongestion (nets des coûts additionnels durant les heures creuses) et des bénéfices environnementaux (chaque vkm étant moins coûteux durant les heures creuses en raison d'une vitesse supérieure et donc d'émissions moindres). En mobilisant les paramètres estimés dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), on peut ainsi conclure que

²⁹ Suivant la même logique, nous mobilisons dans Bounie, Adoue, Koning et L'Hostis (2019) nos estimations de la valeur de la connectivité à Internet dans les TP parisiens pour proposer une évaluation socioéconomique des récents investissements liés au déploiement du réseau 4G. Cette mesure semble également justifiée d'après notre petite analyse coûts-bénéfices.

décaler au fil de la journée près de 1 M de vkm/jour génèrerait des bénéfices collectifs de 44 M eu/an, 98% des gains provenant d'une baisse de la congestion routière.

Tableau 15 – Effets externes liés à une modification des horaires des déplacements routiers

	Déshorage pour les VP	Déshorage pour les VUL et les PL
Evolution des trafics quotidiens	2% des vkm VP HP -> HC : 0,97 M vkm concernés	5% des vkm VUL & PL HP -> HC : 0,17 M vkm concernés
Cm_Congestion (eu/vkm)	$VP^{HP} = 0,298$ $VP^{HC} = 0,125$	$VUL^{HP} = 1,457$ $VUL^{HC} = 0,598$ $PL^{HP} = 1,707$ $PL^{HC} = 0,700$
Cm_Environnement (eu/vkm)	$VP^{HP} = 0,105$ $VP^{HC} = 0,102$	$VUL^{HP} = 0,234$ $VUL^{HC} = 0,218$ $PL^{HP} = 1,133$ $PL^{HC} = 1,116$
Effets externes (M eu/an)	Cong_VP = -43,6 Env_VP = -0,8	Cong_Fret = -39,7 Env_Fret = -0,7

Dans le cas du TMV, si on fait l'hypothèse que 5% des vkm quotidiennement réalisés avec des VUL et des PL peuvent migrer des heures de pointe vers les heures creuses, à l'instar des stratégies de livraisons nocturnes (Holguin-Véras et al., 2006), on trouve des gains externes d'une ampleur similaire (40 M eu/an environ), avec un volume de trafic impacté cette fois 5 fois plus faible (0,2 M vkm/jour). Si les mesures cherchant à promouvoir le déshorage mériteraient donc de faire l'objet de réelles évaluations socioéconomiques, afin de bien quantifier les autres bénéfices et coûts (notamment organisationnels) qu'elles induisent, ces calculs illustrent l'influence potentielle des effets de décongestion routière sur la désirabilité des projets de transport. Précisons à ce titre que, pour les TP également, les changements des niveaux de congestion sont de plus en plus fréquemment pris en compte dans les calculs de VAN, à l'instar des évaluations du Grand Paris Express ou de l'introduction de la gratuité totale sur le réseau régional.

5. Conclusions et perspectives

Pour ponctuer le premier volet de ce manuscrit, nous revenons sur les principales plus-values scientifiques de nos articles puis nous mentionnons

les travaux en cours ou prévus, directement liés à la congestion des transports urbains.

5.1 Synthèses des apports scientifiques

Dans la section introductive, nous avançons que nos travaux avaient pour vocation principale de combler ce qui nous semblait constituer deux « angles morts » caractérisant l'analyse économique de la congestion : la contribution du TMV aux pertes collectives causées par une surfréquentation des routes ; la saturation des TP et les pertes de confort perçues par leurs usagers. Nous sommes convaincus que les articles ici synthétisés enrichissent l'état de l'art et des connaissances. Si nos résultats portent en premier lieu sur les transports franciliens, les méthodes proposées pourraient aisément être transposées à d'autres territoires.

Tout d'abord, nous avons présenté différentes approches permettant de faire émerger des fonctions de congestion agrégées, à même d'être utilisées en économie des transports. Dans le cas des déplacements routiers, notre originalité est double. Nous avons ainsi quantifié le phénomène de congestion réciproque et illustré son hétérogénéité, les pertes de temps causées par un type donné de véhicules différant selon que les « récepteurs » soient des VP, des VUL ou des PL (et vice-versa). En couplant modèle d'affectation du trafic et calculateur d'émissions, nous avons également endogénéisé les coûts environnementaux du transport routier dans un cadre multi-classes, faisant par exemple dépendre le coût externe d'une VP du flux de véhicules de fret simultanément présents sur l'infrastructure, via la baisse des vitesses que ces derniers engendrent. Pour ce qui est de la congestion des TP, notre enquête de terrain a permis de préciser les coûts d'inconfort perçus par les voyageurs, pour différentes catégories de densité de passagers dans les rames des métros. A l'aide de ces résultats, il a ensuite été possible d'estimer une fonction simple mais originale qui relie les coûts privés et sociaux des voyages en TP à leur niveau de congestion. D'un point de vue plus qualitatif, nous avons démontré que la congestion des métros génèrait de l'inconfort, du point de vue des voyageurs, en raison du stress causé par la promiscuité physique et une « intrusion dans l'espace personnel », de la fatigue liée à la station debout mais également de l'incapacité à « bien » utiliser son temps de transport en réalisant d'autres activités.

Ces fonctions de congestion ont ensuite permis d'estimer une grande variété de coûts marginaux externes des transports urbains. A ce niveau, notre originalité est triple. Tout d'abord, les coûts externes de congestion que nous avons proposés pour les différentes lignes du métro parisien sont, en moyenne, loin d'être négligeables et ils illustrent bien l'hétérogénéité des pertes liées à l'ajout dans les wagons d'un voyageur supplémentaire. Concernant les transports routiers, notre principale plus-value provient de

la décomposition des pertes marginales qu'autorise une approche multi-classes. Qu'elles reposent sur un modèle de trafic ou sur l'analyse économétrique de données individuelles, nos méthodes permettent en effet de quantifier l'impact d'un véhicule additionnel sur les pertes de temps subies par les différents types d'usagers des routes. Ce faisant, nous avons notamment montré que les véhicules de fret supportaient une part des coûts externes de congestion plus que proportionnelle à leur importance respective dans le trafic. La fonction de coûts environnementaux que nous avons estimée constitue une autre originalité de nos travaux puisqu'elle met en avant des coûts environnementaux indirects. Outre le coût externe (direct) imputable à ses propres émissions, un véhicule utilisant une infrastructure réduit la vitesse de circulation des autres véhicules et participe donc (indirectement) à accroître leurs coûts externes. Même si ce phénomène est relativement modeste d'un point de vue quantitatif, il mérite d'être pris en compte dans le cadre des calculs socioéconomiques puisqu'il est d'une ampleur supérieure aux coûts d'usure et d'entretien des voiries. D'une manière plus générale, nous sommes convaincus que les coûts marginaux externes proposés dans nos articles « outillent » les personnes qui ont pour charge de réaliser et/ou de contre-expertiser les analyses coûts-bénéfices des projets de transport.

Nos dernières contributions proviennent des estimations des pertes collectives causées par la sous-tarification des transports urbains par rapport à leur coût marginal social. Ainsi, les métros parisiens connaissent une fréquentation moyenne durant les heures de pointe de 9% supérieure à celle qui prévaudrait à l'optimum. Alors même que les pertes de bien-être correspondantes sont actuellement modérées, elles pourraient rapidement croître si la demande de TP continue d'augmenter plus rapidement que l'offre de places. Les transports routiers étant plus sollicités par les Franciliens et générant des pertes environnementales, en sus des coûts externes de congestion, la sur-utilisation des routes est supérieure (20% environ), tout comme les pertes de bien-être collective liées à cette configuration sous-optimale. Dans le cadre de nos exercices empiriques, nous avons par ailleurs quantifié la contribution du TMV aux pertes environnementales et au bien-être collectif. Nos résultats soulignent que les études en économie des transports ne doivent en aucun cas ignorer les VUL et les PL. S'ils comptent pour 8% des distances parcourues sur les routes franciliennes, ces véhicules représentent environ 30% des émissions de polluants et ils comptent pour 40% du bien-être collectif, quel que soit l'équilibre considéré. Dans le prolongement logique de ces estimations, nous avons finalement proposé plusieurs grilles potentiellement utiles pour les décideurs publics soucieux d'introduire une tarification optimale des transports dans les grandes agglomérations, que ce soit dans les métros ou sur les routes. Ce faisant, nous avons toutefois mis en avant différents problèmes auxquels ils devront faire face s'ils souhaitent rendre acceptable une telle intervention, à commencer par l'ampleur considérable des transferts de surplus qu'implique une réforme tarifaire visant à assurer la

couverture des coûts externes des transports urbains par les contributions des usagers.

5.2 Travaux en cours et à venir

Nos travaux appellent naturellement divers prolongements afin d'étudier des phénomènes d'une nature différente et/ou de mobiliser des approches méthodologiques alternatives. Dans cette optique, plusieurs projets de recherche sont déjà en cours, à des stades plus ou moins avancés, et d'autres sont envisagés.

Une première direction actuellement suivie concerne l'étude des pertes de temps imputables, non pas à la circulation des véhicules, mais à leur occupation de la voirie une fois à l'arrêt, lors des stationnements illégaux notamment. En croisant des données de trafic et des observations de terrain, nous avons obtenu de premiers résultats prometteurs dans Beziat, Charanssoney et Koning (2017) en nous intéressant spécifiquement à l'impact du double-file des VUL et des PL sur la relation entre densité et flux de véhicules dans certaines rues de Paris. Outre leur originalité, nos calculs préliminaires ont permis d'estimer le coût marginal externe de congestion causé par le stationnement illégal des véhicules de fret.

A un niveau méthodologique, nous souhaitons dépasser certaines limites des modèles de trafic statiques en reproduisant les analyses sur la contribution du TMV aux émissions de polluants en Ile-de-France avec l'outil de simulation multi-agents OLYMPUS (Elessa-Etuman et Coll, 2018). Le recours à cette plateforme de modélisation est d'autant plus pertinent que nous l'alimentons avec des informations désagrégées sur les tournées des chauffeurs-livreurs - que ce soit aux niveaux spatio-temporels (zones et horaires des livraisons de marchandises) ou organisationnels (véhicules utilisés, taux de remplissage, mode d'organisation) - simulées à l'aide du logiciel SIMTURB (en cours de développement au LAET). Observer le TMV sur une base individuelle et directement au niveau des tournées semble nécessaire pour réfléchir à l'efficacité réelle d'interventions publiques tarifaires (péages urbains) ou organisationnelles (livraisons nocturnes, massification des flux).

La dernière thématique liée à la congestion routière que nous avons commencé à explorer concerne les effets des coûts de transport sur les choix de localisation des entreprises. Plus précisément, nous menons une étude économétrique avec l'enquête du MTES sur les entrepôts logistiques en France afin d'identifier l'importance relative des coûts du foncier, du travail ou de transport dans les choix d'implantation des entreprises au sein des aires urbaines. En exprimant le coût des facteurs de production en fonction de la distance au centre des agglomérations, la localisation optimale des entrepôts dépend de leur taille, du nombre de salariés qu'ils

accueillent et des flux de PL et de VUL qui y transitent. Afin d'introduire de l'hétérogénéité spatiale au niveau de la congestion routière, nous sommes en train de collecter des informations sur la vitesse moyenne des déplacements pendulaires (via le Recensement Général de la Population) et sur l'offre de routes (via Open Street Map) au sein des aires urbaines.

Nous portons, en parallèle de ces études, d'autres projets de recherche qui traitent quant à eux de la congestion des TP. Au niveau théorique tout d'abord, nous avons initié un travail visant à déterminer et à comparer les effets de différentes règles de tarification des péages ferroviaires sur le bien-être collectif lorsqu'une autorité publique doit partager l'accès d'une infrastructure entre un opérateur commercial (type TGV) et un service conventionné (type RER). Ce modèle théorique prend donc en compte deux types de congestion, entre les différents services ferroviaires (via leurs fréquences respectives) mais aussi entre les voyageurs (la fréquence d'un service déterminant l'offre de places et donc la densité de voyageurs dans les véhicules).

Au niveau empirique ensuite, nous avons commencé à analyser les matériaux récoltés par Munch (2017) dans le cadre de son travail doctoral sur les choix des horaires de déplacement des employés de la Plaine Saint-Denis. Son enquête quantitative fournit en effet des informations détaillées sur les horaires effectifs vs « idéaux » des voyages, mais aussi sur l'importance relative des différents facteurs ayant présidé aux choix des pratiques de mobilité. En particulier, nous souhaitons étudier les arbitrages individuels entre évitement de la congestion dans les TC et coûts de déshorage, en considérant les contraintes familiales ou professionnelles qui pourraient également expliquer les horaires des déplacements. Cette manière d'appréhender les coûts de congestion dans les TC est originale car elle repose sur l'étude des préférences des individus révélées par leurs choix de transport.

Si ces différents projets doivent être menés à leurs termes, il semble pertinent d'en envisager d'autres pour un futur plus ou moins proche. Tandis que la mise en relation explicite entre vitesses de circulation routière, nuisances sonores (Andersson et Ogren, 2013) et risques d'accidents semble constituer une direction naturelle, nous avons proposé dans la section 4 une discussion sur les sources de sur- ou de sous-estimations des pertes de bien-être collectif dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) et dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020). Ce faisant, nous avons mis en avant la nécessité d'autoriser, d'un point de vue théorique comme empirique, les changements modaux pour les voyageurs et l'analyse des effets croisés de congestion. Nous sommes persuadés que le cadre théorique de la section 2 pourrait facilement être adapté pour prendre en compte ce phénomène mais également pour intégrer les choix des ménages entre se déplacer pour motif d'achats ou se faire livrer par un transporteur professionnel. A un niveau empirique, l'ensemble des données nécessaires au calibrage de ce modèle devrait être

prochaonement accessible, que ce soit avec la nouvelle version de MODUS (dont nous pourrions également exploiter le module TP pour appréhender le choix modal), la nouvelle EGT ou encore les données sur le TMV simulées pour l'Ile-de-France avec SIMTURB. Ce chantier pourrait aisément s'inscrire dans le cadre d'un encadrement doctoral qu'autorisera, nous l'espérons, l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches.

Pour ponctuer ce rapport académique, il est certes facile mais néanmoins pertinent de mentionner des sujets de recherche qui sont aujourd'hui d'une grande acuité, en raison de la crise sanitaire liée au coronavirus. Tout d'abord, on comprend aisément que la valeur subjective de la congestion dans les TP a probablement augmenté ces derniers mois avec les craintes de transmission du COVID-19, facilitée par la promiscuité physique dans les rames. Il serait dans cette optique envisageable de conduire une nouvelle enquête de préférences déclarées ou de mesurer les pertes de temps que décident de supporter certains individus n'utilisant plus les TP afin de ne pas être trop exposés. Finalement, nous pensons que la crise sanitaire constitue aussi une expérience naturelle pour appréhender les pertes de temps et/ou environnementales engendrées par la congestion routière. Si une difficulté majeure concerne ici l'obtention de données permettant de contrôler les effets du confinement sur le niveau de l'activité économique, autre déterminant des émissions de polluants, la mise à disposition prochaine des données de trafic de la Ville de Paris et des mesures de la qualité de l'air réalisées par Airparif offrent de réelles perspectives pour la réalisation de travaux prometteurs et originaux.

6. Bibliographie

ADEME (2014). *Etat de l'art sur les péages urbains : Objectifs recherchés, dispositifs mis en œuvre et impact sur la qualité de l'air*, Rapport, 54p.

ADEME, Pouponneau M., RINCENT AIR, Forestier B. et Cape F. (2018). *Les zones à faibles émissions (Low emission zones) à travers l'Europe : déploiement, retours d'expériences, évaluation d'impacts et efficacité du système*, Rapport, 112p.

Ahlfedlt G.M. et Pietrostefani E. (2019). The economic effects of density : A synthesis, *Journal of Urban Economics*, 111 : 93-107.

Akbar P. A., Couture V., Duranton G., Ghani E. et Storeygard A. (2018). *Mobility and congestion in urban India. NBER working paper No. 25218.*

Akbar A. P. et Duranton G. (2017). *Measuring the cost of congestion in highly congested city: Bogotá. CAF - Working Paper, 2017-4, 1-46.*

Allen J., Ambrosini C., Browne M., Patier D. et Routhier J.L. (2013). *Data collection for understanding urban goods movements: Comparison of collection methods and approaches in European countries. In: Sustainable*

Urban Logistics Concepts, Methods and Information Systems, Springer: 71–90.

Amir R., Jin J.Y., Pech, G. et Troge M. (2016). Prices and deadweight loss in multiproduct monopoly, *Journal of Public Economic Theory*, 18(3) : 346-362.

Amirgholy M. et Gao H. O. (2017). Modeling the dynamics of congestion in large urban networks using the macroscopic fundamental diagram: User equilibrium, system optimum, and pricing strategies, *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 215-237.

Andersson H. (2013). Consistency in preferences for road safety : An analysis of precautionary and stated behavior, *Research in Transportation Economics*, 43(1) : 41-49.

Andersson H. et Ogren M. (2013). Charging the polluter : A pricing model for road and railway noise, *Journal of Transport Economics and Policy*, 47(3) : 313-333.

André M. et Hammarstrom U. (2000). Driving speeds in Europe for pollutant emissions estimations, *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 5 (5) : 321–335.

Arnott R., De Palma A. et Lindsey R. (1990). The economics of bottleneck, *Journal of Urban Economics*, 27 : 111–130.

Basso L. J. et Jara-Díaz S.R. (2010). The Case for Subsidisation of Urban Public Transport and the Mohring Effect, *Journal of Transport Economics and Policy*, 44(3), 365-372.

Basso L. J. et Silva H.E. (2014). Efficiency and Substitutability of Transit Subsidies and Other Urban Transport Policies, *American Economic Journal: Economic Policy*, 6(4), 1- 33.

Batarce M., Munoz J.C. et de Dios Ortuzar J. (2016). Valuing crowding in public transport: Implications for cost-benefit analysis, *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 91 : 358–378.

Batarce M., Muñoz J.C., de Dios Ortúzar J., Raveau S., Mojica C. et Ríos R.A. (2015). Use of mixed stated and revealed preference data for crowding valuation on public transport in santiago, chile, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2535 : 73–78.

Beziat A., Koning M. et Toilier F. (2017). Marginal congestion costs in the case of multi-class traffic: A macroscopic assessment for the Paris region, *Transport Policy*, 60: 87-98.

Beziat A. (2017). *Approche des liens entre transport de marchandises en ville, formes urbaines et congestion : le cas de l'Ile-de-France*, Thèse de Doctorat en Aménagement de l'espace, Urbanisme, Université Paris Est Marne-la-Vallée.

Beziat A., Charansonney L. et Koning M. (2017). The marginal congestion cost of illegal parking : Empirical evidence from Paris Streets, *Presented at the ITEA annual congress*, Barcelona.

Bignon E. et Pojani D. (2018). River-based public transport: Why won't Paris jump on board?, *Case Studies on Transport Policy*, 6(2), 200-205.

Bonnafeous A., Gonzalez-Feliu J. et Routhier J.L. (2013). An alternative UGM paradigm to OD matrices: the FRETURB model. In: *WCTR 2013* (pp. 21-p).

Bonafous A., Patier D., Routhier J.L., Toilier F. et Serouge M. (2016). French surveys of the delivery approach : From cross-section to diachronic analyses, *Transportation Research Procedia, 10th International Conference on City Logistics, Tenerife*, June 2015.

Börjesson M. et Kristoffersson I. (2018). The Swedish congestion charges: Ten years on, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 107, 35-51.

Börjesson M. et Rubensson I. (2019). Satisfaction with crowding and other attributes in public transport, *Transport Policy*, 79 : 213-222.

Börjesson M., Fung C. M. et Proost, S. (2017). Optimal prices and frequencies for buses in Stockholm, *Economics of Transportation*, 9, 20-36.

Bounie N., Adoue F., Koning M. et L'Hostis A. (2019). What value do travelers put on connectivity to mobile phone and Internet networks in public transport? Empirical evidence from the Paris region, *Transportation Research Part A – Policy & Practice*, 130: 158-177.

Bouscasse H. et de Lapparent M. (2019). Perceived comfort and values of travel time savings in the Rhône-Alpes region, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 124 : 370-397.

Bowley A.L. (1924). *Mathematical groundwork of economics*, California Press, Oxford.

Buisson C. et Lessort M. (2010). *Comprendre le trafic routier – Méthodes et calculs*, CERTU, 114p.

Bureau B. (2011). Opportunité socio-économique d'une hausse de prix des transports collectifs franciliens, *Documents de travail de la DG-Trésors*, 2011-2, 1-32.

Bureau B. et Glachant, M. (2008). Distributional effects of road pricing: Assessment of nine scenarios for Paris, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(7): 994-1007.

Bureau B. et Glachant, M. (2011). Distributional effects of public transport policies in the Paris Region, *Transport Policy*, vol. 18(5): 745-754.

Button K. (2020). The transition from Pigou's ideas on road pricing to their application, *Journal of the History of Economic Thought*, 1-22.

Calthrop E., de Borger B. et Proost S. (2007). Externalities and partial tax reform : does it make sense to tax road freight (but not passenger) transport ?, *Journal of Regional Science*, 47(4) : 721-752.

Cantwell M., Caulfield B., O'Mahony M. (2009). Examining the factors that impact public transport commuting satisfaction, *Journal of Public Transportation*, 12 (2) : 1-21.

Cao K. H., Cheng Y. S. et Woo C. K. (2017). Price-management of traffic congestion: Hong Kong's Lion Rock Tunnel, *Case Studies on Transport Policy*, 5(4) : 699-706.

Carteret M., André M. et Pasquier A. (2015). *Méthode d'estimation des parcs automobiles et de l'impact de mesures de restriction d'accès sur les émissions de polluants*, Rapport de recherche IFSTTAR, 166 p.

CE Delft (2019). *Handbook on the external costs of transport*, commissioned by the DG Move, 332p.

CGSP (2013). *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*, Rapport de la mission présidée par E. Quinet, 352p.

Combes P.P., Duranton G. et Gobillon L. (2015). Salaires et salariés en Ile-de-France, *Revue Economique*, 66 : 317-350.

Combes P.P. et Lafourcade M. (2001). Transport cost decline and regional inequalities: Evidence from France, *CPER Discussion paper n°2894*.

Combes F. (2018). *Transport de marchandises et logistique : performance, impacts, structure des coûts*, Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris-Est, 176p.

Correa J.R. et Stier-Moses N.E. (2011). *Wardrop Equilibria*, Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science.

Cornut B. et Madre J.-L. (2017). A longitudinal perspective on car ownership and use in relation with income inequalities in the Paris metropolitan area, *Transport Reviews*, 37(2), 227-244.

Coulombel N., Dablanc L., Gardrat M. et Koning M. (2018). The environmental social cost of urban road freight: Evidence from the Paris region, *Transportation Research Part D – Transport & Environment*, 63: 514-532.

Coulombel N., Boutueil V., Liu L., Viguié V. et Yin B. (2019). Substantial rebound effects un urban ridesharing : Simulating travel decisions in Paris, France, *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 71 : 110-126.

Coulombel N. et Monchambert G. (2019). Congestion, diseconomies of scale and subsidies un urban public transport, *Working Paper*.

Couture V., Duranton G. et Turner M.A. (2018). Speed, *Review of Economics and Statistics*, 100(4) : 725-739.

Cox T., Houdmont J. et Griffiths A. (2006). Rail passenger crowding, stress, health and safety in Britain, *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 40 (3) : 244-258.

Croci, E. (2016). Urban Road Pricing: A Comparative Study on the Experiences of London, Stockholm and Milan, *Transportation Research Procedia*, 14 : 253-262.

Crozet Y. et Koning M. (2019a). Coûts externes des transports : des taux de couverture aux limites de la TICPE, *Transports, Infrastructures et Mobilité*, 516 : 40-46.

Crozet Y. et Koning M. (2019b). *Les effets externes des transports : définition, évaluation et implications pour les politiques publiques*, Rapport pour le Conseil Scientifique de TDIE, 52p.

Dafermos S.C. (1972). The traffic assignment problem for multiclass-user transportation networks, *Transportation Sciences*, 6 (1): 73-87.

David Q., Del Fabbro M. et Vertier P. (2018). *Etude sur la « gratuité » des transports en commun à Paris*, Rapport du LIEPP en réponse à l'appel à évaluation de la Mairie de Paris, 130p.

De Bok M., Bal I., Tavasszy L. et Tillema T. (2020). Exploring the impacts of an emission based truck charge in the Netherland, *Case Studies on Transport Policy*, available on line 21st May 2020.

De Borger B. et Proost S. (2012). A political economy model of road pricing, *Journal of Urban Economics*, 71(1) : 79-92.

De Borger B., Mayeres I., Proost S. et Wouters S. (1996). Optimal Pricing of Urban Passenger Transport: A Simulation Exercise for Belgium, *Journal of Transport Economics and Policy*, 30(1): 31-54.

Debrincat L., Goldberg J., Duchateau H., Kroes E. et Kouwenhoven M. (2006). Valorisation de la régularité des radiales ferrées en Ile-de-France, *Proceedings of the ATEC Congress*, CD Rom edition.

De Jong G. (2003). Elasticities and policy impacts in freight transport in Europe, *Presented at the Association for European Transport*.

De Lapparent M. et Koning M. (2016). Analyzing time sensitivity to discomfort in the Paris subway: An interval data model approach, *Transportation*, 43 : 913-933.

Dell'Olio L., Ibeas A. et Cecin P. (2011). The quality of service desired by public transport users, *Transport Policy*, 18 (1) : 217-227.

Denant-Boëmont L. et Hammiche S. (2012). Downs-Thomson paradox and public transit capacity choice in the laboratory, *ITLS Working Paper*.

Demeules V. et Larose S. (2012). *COPCETE V4 – Outil de calcul des émissions polluantes d'origine routière*, Rapport CETE Normandie Centre, 58 p.

De Ona J. et de Ona R. (2015). Quality of service in public transport based on customer satisfaction surveys: a review and assessment of methodological approaches, *Transportation Science*, 49 (3) : 605-622.

De Palma A., Kilani M. et Lindsey R. (2008). The merits of separating cars and trucks, *Journal of Urban Economics*, 64(2) : 340-361.

De Palma A. et Lindsey R. (2006). Modelling and evaluation of road pricing in Paris, *Transport Policy*, 13(2): 115-126.

De Palma A. et Lindsey R. (2011). Traffic congestion pricing methodologies and technologies, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1377-1399.

De Palma A., Kilani M. et Proost S. (2015). Discomfort in mass transit and its implication for scheduling and pricing, *Transportation Research Part B : Methodological*, 71 : 1-18.

De Palma A., Lindsey R. et Proost S. (2006). Investment and the use of tax and toll revenues in the transport sector : The research agenda, *Research in Transportation Economics*, 19 : 1-26.

De Palma A., Lindsey R. et Monchambert G. (2017). The economics of crowding in rail transit, *Journal Urban Economics*, 101: 106-122.

Di Ciommo F. et Shiftan, Y. (2017). Transport equity analysis, *Transport Reviews*, 37(2) : 139-151.

Dieplinger M. et Fürst, E. (2014). The acceptability of road pricing: Evidence from two studies in Vienna and four other European cities, *Transport Policy*, 36: 10-18.

Dixit V.V. et Denant-Boëmont L. (2014). Is equilibrium in transport pure Nash, mixed or stochastic ?, *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 48 : 301-310.

Ducos G. (2014). *Valorisation de la pollution atmosphérique dans le calcul socioéconomique*, Tome 2 – Rapports & documents, CGSP, 70p.

Duranton G. et Turner M. A. (2011). The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities, *American Economic Review*, 101(6): 2616-2652.

Duranton G. et Puga D. (2003). Micro-foundations of urban agglomeration economies, *NBER Working Paper n°9931*.

Durrmeyer I. et Franco N.M. (2020). Welfare effects of transportation policies: Lessons from a structural model of transportation for Paris metropolitan area, *Presented at the (on-line) ITEA annual Conference*.

Eboli L. et Mazzulla, G. (2007). Service quality attributes affecting customer satisfaction for bus transit, *Journal of Public Transportation*, 10, 3-21.

Elessa-Etuman A. et Coll I. (2018). Olympus V1.0 : Development of an integrated air pollutant and GHG urban emissions model – methodology and calibration over greater Paris, *Geoscientific Model Development*, 11(12).

Eliasson J. et Fosgerau M. (2019). Cost-benefit analysis of transport improvements in the presence of spillovers, matching and an income tax, *Economics of Transportation*, 18 : 1-9.

Eliasson J. (2008). Lessons from the Stockholm congestion charging trial, *Transport Policy*, 15(6) : 395-404.

Eliasson J. (2016). Is congestion pricing fair? Consumer and citizen perspectives on equity effects, *Transport Policy*, 52, 1-15.

Ellison R.B., Greaves S.P. et Hensher D.A. (2013). Five years of London's low emission zone: effects on vehicle fleet composition and air quality, *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 23 : 25-33.

Evans G.W. et Wener R.E. (2007). Crowding and personal space invasion on the train: please don't make me sit in the middle, *Journal of Environmental Psychology*, 27 (1) : 90-94.

Friedrich R. et Bickel P. (Eds.) (2001). *Environmental External Costs of Transport*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Geroliminis N. et Daganzo C.F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings, *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9): 759-770.

Glaister S. (1974). Generalised consumer surplus and public transport pricing, *The Economic Journal*, 84(336): 849-867.

Godillon S. (2016). Conflits autour de la « pacification » du trafic automobile – Analyse des politiques de modération de la vitesse à Paris, *L'espace Politique*, 30, 2016-3.

Goodwin P. B. (1992). A Review of New Demand Elasticities with Special Reference to Short and Long Run Effects of Price Changes, *Journal of Transport Economics and Policy*, 26(2) : 155-169.

Gostner C. (2018). *Péages urbains : Quels enseignements tirer des expériences étrangères ?* Documents de Travail de la DG Trésor n° 2018/1.

Graham D.J. (2007). Agglomeration, Productivity and Transport Investments, *Journal of Transport Economics and Policy*, 41(3) : 317-343.

Graham D.J. et Gibbons S. (2019). Quantifying wider economic impacts of agglomeration for transport appraisal : existing evidence and future directions, *Economics of Transportation*, 19 : 100-121.

Graham D.J., Carbo J.M., Anderson R.J. et Bansal P. (2020). Understanding the costs of urban rail operations, *Transportation Research Part B : Methodological*, 138 : 292-316.

Grote M., Williams I., Preston J. et Kemp S. (2016). Including congestion effects in urban traffic CO2 emissions modeling : Do local government authorities have the right options ?, *Transportation Research Part D : Transport & Environment*, 43 : 95-106.

Haab T. et McConnel K. (2003). *Valuing Environmental and Natural Resources: the Econometrics of Non-Market Valuation*, Edward Elgar.

Halvorsen A., Koutsopoulos H.N., Lau S., Au T. et Zhao J. (2016). Reducing subway crowding : analysis of Off-peak discount experiment in Hong-Kong, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2544(1).

Hanna R., Kreindler G. et Olken B. A. (2017). Citywide effects of high-occupancy vehicle restrictions: Evidence from "three-in-one" in Jakarta, *Science*, 357(6346): 89-93.

Haywood L. et Koning M. (2012). Avoir les coudes serrés dans le métro parisien: évaluation contingente du confort des déplacements, *Revue d'Economie Industrielle*, 140 : 111-144.

Haywood L. et Koning M. (2015). The distribution of crowding costs in public transport: New evidence from Paris, *Transportation Research Part A – Policy & Practice*, 77: 182-201.

Haywood, L. Koning M. et Monchambert G. (2017). Crowding in public transport: Who cares and why?, *Transportation Research Part A – Policy & Practice*, 100: 215-227.

Haywood L., Koning M. et Prud'homme R. (2018). The economic cost of subway congestion: Estimates from Paris, *Economics of Transportation*, 14: 1-8.

Hensher D. A. et Li Z. (2013). Referendum voting in road pricing reform: A review of the evidence, *Transport Policy*, 25 : 186-197.

Holguin-Veras J., Pérez N., Cruz B. et Polimeni, J. (2006). Effectiveness of financial incentives to off-peak deliveries to restaurants in Manhattan, New York, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1966) : 51-59.

Holguin-Veras J. et Cetin M. (2009). Optimal tolls for multi-class traffic: analytical formulations and policy implications, *Transportation Research Part A : Policy & Practice*, 43 (4) : 445-467.

Hörcher D., Graham D.J. et Anderson R.J. (2017). Crowding cost estimation with large scale smart card vehicle location data, *Transportation Research Part B : Methodological*, 95 : 105-125.

Hörcher D., Graham D.J. et Anderson R.J. (2018). The economics of seat provision, *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 109 : 277-292.

Hörcher D., de Borger B., Seifu W. et Graham D.J. (2020). Public transport provision under agglomeration economies, *Regional Science and Urban Economics*, 81 : 103503.

ITF-OECD (2014). *Valuing Convenience in Public Transport*, Technical report, chaired by M. Wardman.

Jansson J. O. (1979). Marginal Cost Pricing of Scheduled Transport Services: A Development and Generalisation of Turvey and Mohring's Theory of Optimal Bus Fares, *Journal of Transport Economics and Policy*, 13(3) : 268-294.

Kampa M. et Castanas E. (2008). Human health effects of air pollution, *Environmental Pollution*, 151 (2) : 362-367.

Kilani M., Proost S. et van der Loo S. (2014). Road pricing and public transport pricing reform in Paris: Complements or substitutes?, *Economics of Transportation*, 3(2) : 175-187.

Kim J., Revell K. et Preston J. (2019). Application of cognitive work analysis to explore passenger behavior change through provision of information to help relieve train overcrowding, *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 261-271.

Kleist L. et Doll C. (2005). Economic and environmental impacts of road tolls for HGVs in Europe, *Research in Transportation Economics*, 11, 153-192.

Klingen J. (2019). Do metro interruptions increase the demand for public rental bicycles ? Evidence from Paris, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 123 : 216-228.

Koning M. (2011). *Essais sur la congestion dans les transports à Paris*, Thèse de Doctorat en sciences économiques, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

Koning M. (2013). La variété des coûts de congestion routière : illustrations à partir du boulevard Périphérique parisien, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 2013/4 : 741-757.

Koning M. et Kopp P. (2014). Are bicycles good for Paris ?, *International Journal of Transport Economics*, 41(3) : 399-424.

Koning M. et Conway A. (2016). The good impacts of biking for goods: Lessons from Paris city, *Case Studies on Transport Policy*, 4: 259-268.

Koning M., Combes F., Coulombel N. et Gardrat M. (2020). Welfare losses caused by heterogeneous and under-priced road transport: The Paris region case study, *Working Paper*.

Kopp P. (2011). The unpredicted rise of motorcycles: a cost benefit analysis, *Transport Policy*, 18 : 613-622.

Kraus M. (1991). Discomfort externalities and marginal cost transit fares, *Journal of Urban Economics*, 29 : 249-259.

Kreindler G. E. (2018) The Welfare Effect of Road Congestion Pricing: Experimental Evidence and Equilibrium Implications, *Job Market Paper*, 73p.

Kroes E., Kouwenhoven M., Debrincat L. et Pauget N. (2013). On the value of crowding in public transport for Ile-de-France, *Discussion Paper 2013-18, OECD-ITF*.

Lam W.H.K, Cheung C.Y. et Lam C.F. (1999). A study of crowding effects at the Hong-Kong light rail transit stations, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 31(5) : 401-415.

Lesteven G. (2012). *Les stratégies d'adaptation à la congestion automobile dans les grandes métropoles. Analyse à partir des cas de Paris, Sao Paulo et Mumbai*, Thèse de Doctorat en Géographie, Université- Paris 1 - Panthéon Sorbonne.

Leurent F., Chadakas E. et Poulhes A. (2014). A traffic assignment model for passenger transit on a capacited network: Bi-layer framework, line sub-models and large scale application, *Transportation Research Part C : Emerging technologies*, 47 : 3–27.

Leurent F., Breteau V. et Wagner N. (2009). *Coût marginal social de la congestion routière : Actualisation et critique de l'approche Hautreux*, LVMT, Rapport pour le compte MEDDAT, 123 p.

Li Z. et Hensher D.A. (2011). Crowding and public transport : A review of willingness to pay and its relevance in project appraisal, *Transport Policy*, 18(6) : 880-887.

Lindsey R. (2006). Do economists reach a conclusion on road pricing?, *Economic Journal Watch*, 3 : 292–379.

Litman T. (2004). Transit price elasticities and cross-elasticities, *Journal of Public Transportation*, 7(2): 3.

Louf R. et Barthélémy M. (2014). How congestion shape cities : from mobility patterns to scaling, *Scientific Reports*, 4 : 55-61.

Luechinger S. et Roth F. (2016). Effects of a mileage tax for trucks, *Journal of Urban Economics*, 92 : 1–15.

Mahudin, N.M., Cox T. et Griffiths A. (2011). Modelling the spillover effects of rail passenger crowding on individual well-being and organisational behavior, In : *Urban Transport XVII : Urban Transport and the Environment in the 21st Century* : 227-238.

Mohring H. (1972). Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation *The American Economic Review*, 62(4) : 591-604.

Muller N.Z. et Mendelsohn R. (2007). Measuring the damages of air pollution in the United States, *Journal of Environmental Economics and Management*, 54 (1) : 1–14.

Müller S. et Schiller C. (2015). Improvement of the volume-delay function by incorporating the impact of trucks on traffic-flow, *Transportation Planning Technology*, 38 (8) : 878–888.

Munch E. (2017). *Pourquoi arrivent-ils tous à la même heure ? Le paradoxe de l'heure de pointe et des horaires de travail flexibles : enquête sociologique auprès des cadres franciliens*, Thèse de Doctorant en sociologie, Université Paris Est.

Newbery D. et Santos G. (1999). *Quantifying the Cost of Congestion*, Department of Applied Economics, Cambridge, UK.

Niérat P. (1997). Market area of rail-truck terminals : Pertinence of the spatial theory, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 31(2) : 109-127.

Ntziachristos L. et Samaras Z. (2000). Speed dependent representative emission factors of catalyst passenger cars and influencing parameters, *Atmospheric Environment*, 34 : 4611–4619.

Ntziachristos L., Gkatzoflias D., Kouridis C. et Samaras Z. (2009). COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model, *Information Technologies in Environmental Engineering*. Springer : 491–504.

O'Sullivan A. (2012). *Urban Economics*, 8th Edition, McGraw-Hill/Irwin, 528p.

Ortuzar J.D. et Willumsen L.G. (2011). *Modelling Transport*, 4th ed. Wiley 607 p.

Parry I.W.H., Walls M. et Harrington W. (2007). Automobile Externalities and Policies, *Journal of Economic Literature*, 45: 373-399.

Parry I.W.H. et Small K.A. (2009). Should urban transit subsidies be reduced?, *American Economic Review*, 99(3): 700-724.

Pauley N., Balcombe R., Mackett R., Titheridge H., Preston J., Wardman M. et White P. (2006). The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership, *Transport Policy*, 13(4): 295-306.

Pel A.J., Bel N.H. et Pieters M. (2014). Including passengers' response to crowding in the dutch national train passenger assignment model, *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 66: 111-126.

Pigou A.C. (1920). *The economics of welfare*, Routledge.

Proost S. et Dender K.V. (2008). Optimal urban transport pricing in the presence of congestion, economies of density and costly public funds, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(9): 1220-123.

Proost S. et Thisse J.F. (2019). What can be learned from spatial economics ?, *Journal of Economic Literature*, 57(3) : 575-643.

Prud'homme R., Koning M., Lenormand L. et Fehr A. (2012). Public transport congestion costs: the case of Paris subway, *Transport Policy*, 21 : 101-109.

Prud'homme R., Koning M. et Kopp P. (2011). Substituting a tramway to a bus line in Paris : Costs and Benefits, *Transport Policy*, 18 : 563-572.

Prud'homme R. et Bocajero J.P. (2005). The London congestion charge: a tentative economic appraisal, *Transport Policy*, 3 : 279-287.

Prud'homme R. (1999). Les coûts de la congestion dans la région parisienne, *Revue d'Economie Politique*, 109 (4) : 426-449.

Prud'homme R. et Kopp P. (2008). Worst than a congestion charge : Paris traffic restraint policy, In : Richardson R. et Chang Hee C. (Eds.), *Road Congestion Pricing Book*, Edward Elgar, 252-272.

RAND Europe (2014) *Road traffic demand elasticities - a rapid evidence assessment*. Technical report, published by the RAND Corporation, Santa Monica, Calif. and Cambridge, UK.

Rapoport J., Carrez G., Savary G., Quinet A., Pélissier M., Crozet Y., Laurent F. et Mirabel F. (2018). *Rapport du comité sur la faisabilité de la gratuité des transports en commun en Ile-de-France leur financement et la politique de tarification*, Rapport présidé par Rapoport J., rapporteurs Marlot G. et Gostner C., 263p.

Raux C., Souche S. et Pons D. (2009). *Trois expériences de péages urbains en Europe : évaluation et bilan socio-économique*, Rapport final pour le PREDIT, LAET, Lyon.

Raux C. et Souche S. (2004). The Acceptability of Urban Road Pricing. A Theoretical Analysis Applied to Experience in Lyon, *Journal of Transport Economics and Policy*, 38 : 191-216.

Redman L., Friman M., Gärling T. et Hartig, T. (2013). Quality attributes of public transport that attract car users: A research review, *Transport Policy*, 25: 119-127.

RICARDO-AEA (2014). *Update of the Handbook on External Costs of Transport*, Rapport pour la DG Move, 139 p.

Routhier J.L. et Toilier F. (2007). FRETURB V3, a policy oriented software of modelling urban goods movement. In: *WCTR 11th WCTR*, June 2007. Berkeley, United States.

Santos, G. (2005). Urban Congestion Charging: A Comparison between London and Singapore, *Transport Reviews*, 25(5) : 511-534.

Shorshani M.F., André M., Bonhomme C. et Seigneur C. (2015). Modelling chain for the effect of road traffic on air and water quality: techniques, current status and future prospects, *Environmental Modelling & Software*, 64 : 102-123.

Skabardonis A., Varaiya P.P. et Petty K.F. (2003). Measuring recurrent and non-recurrent traffic congestion, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1856 : 03-42.

Small K.A. et Verhoef E.T. (2007). *The Economics of Urban Transportation*, Routledge.

Small K. A. (2012). Valuation of travel time, *Economics of Transportation*, 1(1-2): 2-14.

Tang Y., Jiang Y., Yang H. et Nielsen O.A. (2020). Modeling and optimizing a fare incentive strategy to manage queuing and crowding in mass transit systems, *Transportation Research Part B : Methodological*, 138 : 247-267.

Tirachini A., Hensher D.A. et Rose J.M. (2013). Crowding in public transport systems : Effects on users, operation and implications for the estimation of demand, *Transportation Research Part A – Policy & Practice*, 53 : 36-52.

Tirachini, A., Sun L., Erath A. et Chakirov A. (2016). Valuation of sitting and standing in metro trains using revealed preferences, *Transport Policy*, 47 : 94-104.

Tirachini A., Hensher D. A. et Rose, J. M. (2014). Multimodal pricing and optimal design of urban public transport: The interplay between traffic congestion and bus crowding. *Transportation Research Part B: Methodological*, 61 : 33-54.

Toilier F., Gardrat M., Routhier J.L. et Bonnafous A. (2018). Freight transport modelling in urban areas : The French case of the FRETURB model, *Case Studies on Transport Policy*, 6 : 753-764.

Toilier F., Serouge M., Routhier J.L., Patier D. et Gardrat M. (2016). How can urban goods movements be surveyed in mega-city ? The case of the Paris region, *Transportation Research Procedia*, 12 : 570-583.

Transportation Research Board (2010). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Research Council.

Uzzel, D. et Brown J. (2007). Conceptual progress in understanding fear of crime in railway stations, *Psicologia*, 21(2) : 119-137.

van Goeverden C., Rietveld P., Koelemeijer J. et Peeters P. (2006). Subsidies in public transport, *European Transport*, 32 : 5-25.

Walters A.A. (1961). The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, 29 : 676-697.

Wang B. et Zacharias J. (2020). Noise, Odor, and passenger density in perceived crowding in public transport, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 135 : 215-223.

Wardman M. (2004). Public transport values of time, *Transport Policy*, 11(4) : 363-377

Wardman M. et Murphy P. (2015). Passengers' valuations of train seating layout, position and occupancy, *Transportation Research Part A – Policy & Practice*, 74 : 222-238.

Wardman M. et Whelan G. (2011). Twenty years of rail crowding valuation studies : Evidence and lessons from British experience, *Transport Reviews*, 31(3) : 379-398.

Webster N. et Elefteriadou L. (1999). A simulation study of passenger car equivalents (PCE) on basic freeway sections, *Transportation Research Part B - Methodological*, 33-35 : 323-336.

Wener R., Evans G. et Boatley P. (2005). Commuting stress: psychological effects of a trip and spillover into the workplace, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1924 : 112-117.

Whelan G. et Crockett J. (2009). An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding, In: *Proceeding of the First International Conference on Choice Modelling*, Harrogate, England.

Wolff H (2014). Keep your Klunker in the Suburb: Low-Emission Zones and Adoption of Green Vehicles, *The Economic Journal*, 124(578): F481-F512.

Xiao Y., Coulombel N. et de Palma A. (2017). The valuation of travel time reliability: does congestion matter?, *Transportation Research Part B: Methodological*, 97: 113-141.

Yang H. et Wang X. (2011). Managing network mobility with tradable credits, *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(3): 580-594.

Yun S., White W., Lamb D.R. et Wu Y. (2010). Accounting for the impact of heavy truck traffic in volume-delay function in transportation planning models, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1931: 8-17.

7. Annexes

7.1 Enquêtes sur les automobilistes et sur les chauffeurs-livreurs

La fonction de congestion routière multi-classes que nous estimons dans Beziat, Koning et Toilier (2017) nécessite des observations sur les temps de parcours individuels. Nous avons croisé deux bases de données proposant de telles informations à une échelle relativement large, à savoir l'« Enquête Globale Transport » (2010, EGT) et le volet « Chauffeurs » de l'« Enquête Transport de Marchandises en Ville, Ile-de-France » (2010, ETMV-IDF, voir aussi Toilier et al., 2016).

L'EGT est la version francilienne des enquêtes ménages déplacements. Elle est récoltée tous les 10 ans environ et elle permet de décrire les pratiques de mobilité des résidents de la région capitale. Dans le cadre de sa version 2010, un panel représentatif de 18000 ménages a été constitué et les individus ont dû renseigner l'ensemble des voyages réalisés durant une semaine, soit un total de 143000 déplacements. Pour notre travail économétrique, nous avons retenu l'ensemble des déplacements routiers et nous avons éliminé ceux réalisés en TP (métro, RER, bus), à pieds ou avec des 2-roues (motorisés ou non). Pour cet échantillon de 48000 observations environ, nous mobilisons les informations sur la durée et les horaires des déplacements, les communes de départ et d'arrivée, le motif du voyage ou encore la disponibilité d'une place de parking à destination. Si l'EGT contient beaucoup d'autres variables, nous nous sommes limités à celles-ci pour des raisons de comparabilité avec la seconde base de données mobilisée.

A l'instar des enquêtes développées et récoltées par le LAET dans les années 1990 pour les agglomérations de Bordeaux, Dijon et Marseille, l'ETMV-IDF se compose de deux principaux volets, un sur les caractéristiques des établissements économiques (le nombre hebdomadaire de mouvements de marchandises notamment), un autre s'intéressant aux pratiques des chauffeurs-livreurs. Dans Beziat, Koning et Toilier (2017), nous avons utilisé cette seconde partie de l'ETMV-IDF qui a été récoltée *in situ*, avec des enquêteurs directement embarqués dans les véhicules et suivant les tournées quotidiennes de 345 chauffeurs-livreurs, soit un total de 3000 trajets environ réalisés en VUL ou en PL en Ile-de-France. Pour chaque observation, nous disposons d'informations sur la durée du déplacement, les distances, les horaires, etc. Grâce à ces données, nous sommes aussi en mesure de calculer un taux de chargement moyen des tournées, cette information étant par exemple utilisé dans Koning, Combes, Coulombel et Gradrat (2010) pour calculer les coûts généralisés des trajets réalisés par les véhicules de fret en Ile-de-France.

Nos estimations nécessitent également d’avoir des informations sur l’offre de routes et sur la demande de mobilité à un niveau plus agrégé. Afin de construire ces variables explicatives du temps de parcours individuel, nous avons considéré trois périodes temporelles (pointes du matin ou du soir et heures creuses) et nous avons décomposé l’Ile-de-France en 3 zones concentriques (Paris, la Petite Couronne et la Grande Couronne). Concernant l’offre de routes, nous avons retenu uniquement les voies principales proposées par la BD TOPO de l’IGN, soit un linéaire de 6200 km environ. Ce corpus nous a permis d’approximer le temps de parcours minimal (en croisant la distance parcourue et la vitesse maximale) ainsi que les capacités d’accueil théoriques pour un voyage donné. Concernant les flux totaux de VP, nous avons extrapolé les observations de l’EGT en utilisant les poids statistiques proposés pour chaque déplacement individuel. Pour les matrices OD des véhicules de fret, nous avons utilisé l’outil de simulation Freturb, dont certains résultats sont présentés en annexe 7.2. Avec ces différentes informations, nous avons mis en œuvre une méthode relativement simple (reposant sur l’utilisation de SIG) pour estimer le « flow-to-capacity ratio » rencontré par un individu lors de son déplacement ainsi que la part de « grands véhicules » au sein du flux total.

Tableau 16 – Données individuelles de l’EGT et de l’ETMV-IDF

	All vehicles		Small vehicles		Large vehicles	
	Average	St. Dev.	Average	St. Dev.	Average	St. Dev.
Travel time (min)	22.2	20.3	22.0	20.1	28.1	27.8
Distance (km)	9.2	13.1	9.0	12.9	15.5	18.6
Maximum speed (km/h)	85.2	8.6	85.3	8.4	80.8	13.4
Minimum travel time (min)	6.6	9.3	6.4	9.1	11.2	13.1
FCR of small vehicles (%)	27.5	23.9	27.2	23.5	39.0	32.8
FCR of large vehicles (%)	1.0	1.2	1.0	1.2	1.8	1.8
Share of large vehicles within total traffic (%)	3.7	1.7	3.7	1.7	4.3	1.5
Small vehicles (%)	97.4	16.0	100.0	0.0	0.0	0.0
Freight (%)	6.0	23.7	3.4	18.2	100.0	0.0
Work (%)	42.6	49.5	41.1	49.2	100.0	0.0
Parking (%)	85.0	35.7	86.3	34.3	47.6	50.0
Peak-hours (%)	48.3	50.0	48.3	50.0	47.1	50.0
Paris-Suburbs (%)	8.0	27.1	7.7	26.7	19.2	39.4
Suburbs-Suburbs (%)	87.8	32.8	88.4	32.1	65.6	47.5
Observations ^a	50,848/39,478		48495/37125		2353/2353	

Note.

^a The "Parking" variable is available only for 39,478 observations.

Sources: Authors' calculation from EGT and UGMS.

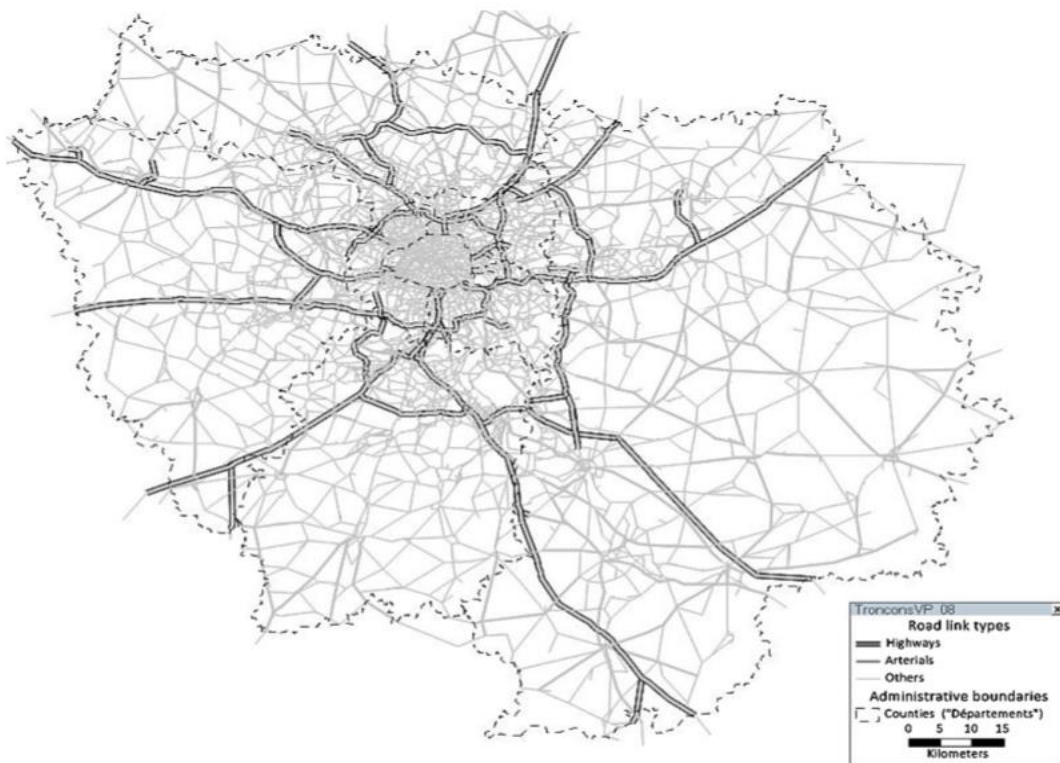
Le tableau 16 décrit les variables utilisées pour estimer la fonction de congestion multi-classes dans Beziat, Koning et Toilier (2017). Les trajets individuels que nous observons durent en moyenne 22 minutes, ceux des « grands » véhicules (les PL) étant un peu plus longs (28 minutes), notamment parce qu’ils parcourent plus de kilomètres (15,5 contre 9 km). Si les routes étaient vides, les conducteurs prendraient beaucoup moins de temps pour ce trajet moyen (7 minutes environ). On constate aussi que les

conducteurs font face à un « flow-to-capacity ratio » de petits véhicules (VP et VUL) de 28% en moyenne mais aussi que les PL représentent 4% des flux totaux que les individus rencontrent sur les routes.

7.2 Données utilisées pour le couplage des modèles Freturb, MODUS et COPCETE

Nous avons utilisé dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018) et dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) un socle commun de modélisation. La figure 9 détaille tout d'abord l'offre de routes renseignée dans MODUS pour 2008. Il est important de préciser que chacun des 39000 tronçons inclus dans le SIG - pour un réseau total de 21000 km environ - est caractérisé par une fonction BPR spécifique (voir équation (36)), avec des paramètres α et β , une vitesse à vide ou encore des capacités théoriques d'accueil qui lui sont propres.

Figure 9 – Réseau routier modélisé dans MODUS



MODUS peut également être mobilisé pour générer et distribuer les déplacements individuels au sein de la région capitale, modules que nous avons utilisés afin d'obtenir une matrice OD pour les trajets en VP en 2012. Pour les flux de fret (PL et VUL), nous avons utilisé Freturb et un fichier SIRENE décrivant les établissements économiques en Ile-de-France en 2012, au niveau communal. Comme détaillé dans le tableau 17, ceux-ci

gènèrent en moyenne 6,3 mouvements de marchandises par semaine, avec de fortes disparités entre les espaces franciliens, reflétant leurs différences de tailles, de spécialisations économiques et d'organisations logistiques.

Tableau 17 – Résultats de Freturb (2012)

	IdF	Paris	VDUA	DUA	UA	DIUA	IA
Operations per establishment (/week)	6.3	4.9	6.6	7.5	8.8	7.1	5.1
Direct trips movements	29.8%	26.9%	28.4%	29.4%	30.1%	34.2%	50.7%
Third party operators movements	41.2%	40.2%	41.4%	41.7%	44.1%	39.7%	31.1%

Note: "VDUA" stands for very dense urban area, "DUA" for dense urban area, "UA" for urban area, "DIUA" for diffuse urban area and "IA" for interurban area.

En combinant les flux de VP issus de MODUS et ceux estimés par Freturb pour les véhicules de fret, nous obtenons la matrice OD synthétisée dans le tableau 18. En 2012, il y avait quotidiennement près de 14 M de trajets réalisés sur les routes franciliennes. Les VUL et les PL correspondent environ à 6% du flux total et ces véhicules sont relativement plus représentés sur les liaisons intéressant la Ville de Paris et le cœur de l'agglomération. Bien que cette information ne soit pas explicite dans le tableau 18, il convient également de préciser que les VUL sont légèrement plus utilisés que les PL en Ile-de-France, notamment dans les zones centrales de la région.

Tableau 18 – Matrice OD pour les trajets routiers (2012)

Daily trips to:		Paris	VDUA	DUA	UA	DIUA	IA	Total
Daily trips from:	Paris	1,129,372 <u>144,280</u> (11.7%)	495,943 <u>74,516</u> (13.1%)	107,198 <u>31,665</u> (22.8%)	28,178 <u>15,990</u> (36.2%)	25,771 <u>11,649</u> (31.1%)	1272 <u>630</u> (33.1%)	1,787,737 <u>278,732</u> (13.5%)
	VDUA	559,999 <u>74,516</u> (11.7%)	3,270,264 <u>139,509</u> (4.1%)	747,846 <u>47,617</u> (6.0%)	213,058 <u>18,984</u> (8.2%)	109,242 <u>8481</u> (7.2%)	5038 <u>412</u> (7.6%)	4,905,450 <u>289,521</u> (5.6%)
	DUA	93,349 <u>31,665</u> (25.3%)	770,811 <u>47,617</u> (5.8%)	1,877,459 <u>48,785</u> (2.5%)	463,366 <u>24,457</u> (5.0%)	262,432 <u>13,860</u> (5.0%)	14,975 <u>620</u> (4.0%)	3,482,394 <u>167,007</u> (4.6%)
	UA	27,449 <u>15,990</u> (36.8%)	208,650 <u>18,984</u> (8.3%)	460,160 <u>24,457</u> (5.0%)	682,293 <u>17,397</u> (2.5%)	267,952 <u>11,884</u> (4.2%)	23,106 <u>860</u> (3.6%)	1,669,611 <u>89,575</u> (5.1%)
	DIUA	21,253 <u>11,649</u> (35.4%)	114,038 <u>8481</u> (6.9%)	286,320 <u>13,860</u> (4.6%)	276,152 <u>11,884</u> (4.1%)	759,846 <u>15,884</u> (2.0%)	45,135 <u>1669</u> (3.6%)	1,502,746 <u>63,429</u> (4.1%)
	IA	1288 <u>630</u> (32.8%)	5799 <u>412</u> (6.6%)	18,329 <u>620</u> (3.3%)	26,290 <u>860</u> (3.2%)	47,055 <u>1669</u> (3.4%)	66,091 <u>411</u> (0.6%)	164,855 <u>4604</u> (2.7%)
	Total	1,832,712 <u>278,732</u> (13.2%)	4,865,507 <u>289,521</u> (5.6%)	3,497,314 <u>167,007</u> (4.6%)	1,689,340 <u>89,575</u> (5.0%)	1,472,301 <u>63,429</u> (4.1%)	155,619 <u>4604</u> (2.9%)	13,512,795 <u>892,872</u> (6.2%)

Notes: "VDUA" stands for very dense urban area, "DUA" for dense urban area, "UA" for urban area, "DIUA" for diffuse urban area and "IA" for interurban area. The underlined figures refer to trips made by LGVs and HGVs; the percentages in brackets describe the share of URF on a given OD.

Les autres paramètres dont nous avons besoin pour simuler l'affectation du trafic sont ceux nécessaires au calcul des coûts généralisés des trajets, pour les différents types de véhicules. La plupart des valeurs du temps que nous avons utilisées proviennent des directives officielles en France, telles qu'énoncées dans le rapport Quinet (CGSP, 2013) et dans les « fiches-

outils » de la DGITM qui accompagnent l’Instruction-Cadre de juin 2014. Comme détaillé dans l’équation (45), nous avons considéré trois valeurs du temps différentes pour le transport de fret (celles des chauffeurs, de l’immobilisation des marchandises et des véhicules) ainsi que les taux de chargement moyens calculés à l’aide de l’ETMV-IDF dans Beziat, Koning et Toilier (2017). Précisons que les paramètres du tableau 19 sont ceux utilisés dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), légèrement différents de ceux que nous avons retenus dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018). Par ailleurs, les dépenses monétaires kilométriques incluent la principale taxe spécifique aux transports, la TICPE (et la TVA sur celle-ci). Finalement, le tableau 19 décrit les coefficients (exogènes) que nous avons considérés pour exprimer l’occupation de l’espace viaire par les véhicules de fret en un « équivalent voiture » (le paramètre δ dans l’équation (36)).

Tableau 19 – Paramètres utilisés pour déterminer les coûts généralisés (2012)

	VP	VUL	PL
Consommation carburant moyenne (l/vkm)	0,069	0,094	0,347
Prix TTC carburant moyen (eu/l)	1,392	1,338	1,080
Dépenses monétaires totales (eu/vkm)	0,262	0,238	0,530
<i>Dont TICPE et TVA</i> (eu/vkm)	<i>0,083</i>	<i>0,084</i>	<i>0,176</i>
Taux occupation (individus/veh)	1,3	1,0	1,0
Valeur du temps individus/chauffeurs (eu/h)	11,0	18,5	18,5
Taux chargement moyen (tonnes/veh)	0,0	0,294	1,941
Valeur du temps marchandises (eu/tonne)	0,0	0,6	0,6
Valeur du temps transporteur (eu/veh)	0,0	3,1	12,4
Coefficient équivalence VP	1,0	1,5	2-2,5

Pour analyser les effets indirects et environnementaux de la congestion routière, nous avons tout d’abord mobilisé des données provenant du calculateur d’émissions COPCETE. Celui-ci est particulièrement précieux puisqu’il comporte des informations très précises (issues notamment de l’enquête IFSTTAR-TNS Sofrès « Parc Auto ») sur le « parc roulant » au sein de différents types d’espaces géographiques. Le tableau 20 décrit d’une manière simplifiée la flotte « urbaine » renseignée dans COPCETE pour l’année 2012. Les véhicules de fret sont quasi-exclusivement alimentés en diesel mais aussi qu’ils sont plus récents que les VP, avec une plus forte représentation de normes Euro IV ou plus (au moins 60% pour les VUL et les PL contre 50% pour les VP).

Si, dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018), il est relativement simple d’alimenter COPCETE avec les résultats du modèle d’affectation, au niveau de chaque tronçon routier, un tel travail appliqué à la méthode que nous proposons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) serait bien plus chronophage puisque le couplage de modèles devrait être dupliqué pour les 375 simulations. Afin de gagner en temps de calculs, nous avons

donc décidé de coder directement dans MODUS les fonctions « émissions-vitesses » présentées dans le tableau 21. Elles ont été estimées (via les MCO) en supposant des fonctions quadratiques et en récupérant dans COPCETE les émissions de polluants pour des paliers de 5 km/h.

Tableau 20 – Parc roulant urbain (2012)

	PC			LGV		HGV
	Petrol	Diesel	Others	Petrol	Diesel	Diesel
Euro-0	1.9%	1.3%	-	0.2%	2.1%	0.2%
Euro-I	2.6%	3.1%	-	0.1%	3.6%	0.6%
Euro-II	5.4%	6.3%	-	0.2%	7.0%	7.9%
Euro-III	4.4%	19.9%	-	0.2%	23.5%	23.6%
Euro-IV	7.7%	28.1%	-	0.2%	38.7%	33.6%
Euro-V	3.7%	15.1%	-	0.1%	24.1%	34.1%
Total	25.7%	73.8%	0.5%	1.0%	99.0%	100%

Tableau 21 – Relations émissions-vitesses pour la flotte de 2012 (estimées via les MCO)

Fonction : Emissions = k + b x Vitesse + c x Vitesse ²						
Véhicules	Polluants	K	B	C	R ²	Validité
VP	CO ₂	319,116	-4,291	0,026	90,5	10-130km/h
VUL	CO ₂	468,042	-8,510	0,067	100,0	10-130km/h
PL	CO ₂	1621,580	-30,384	0,217	95,8	12-86km/h
VP	NO _x	0,989	-0,017	0,0001	99,2	10-130km/h
VUL	NO _x	1,583	-0,026	0,0002	100,0	10-130km/h
PL	NO _x	13,903	-0,287	0,0020	96,7	12-86km/h
VP	PM ₁₀	0,088	-0,00067	0,000005	99,9	10-130km/h
VUL	PM ₁₀	0,149	-0,00233	0,000021	100,0	10-130km/h
PL	PM ₁₀	0,801	-0,00525	0,000039	95,2	12-86km/h
VP	SO ₂	0,002	-0,000287	0,000000182	91,4	10-130km/h
VUL	SO ₂	0,003	-0,000545	0,00000043	100,0	10-130km/h
PL	SO ₂	0,010	-0,000195	0,00000139	95,8	12-86km/h

Afin de transformer les émissions de polluants en coûts marginaux externes, directement au niveau des tronçons routiers, nous mobilisons les valeurs tutélaires françaises proposées dans le rapport Quinet. Tandis que nous nous contentons de valoriser les émissions de CO₂, de NO_x et de PM_{2.5} dans Coulombel, Dablanc, Gardrat et Koning (2018), nous considérons aussi celles de SO₂, les nuisances sonores ou les GES liés aux « phases amont » (mise à disposition des véhicules et des infrastructures) dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), le rapport Quinet proposant les paramètres correspondants. Comme illustré dans le tableau 22, les coûts marginaux externes des PM_{2.5} et du bruit dépendent considérablement des espaces où circulent les véhicules et du nombre de personnes impactées,

avec de très forts écarts selon les niveaux de densité³⁰. On constate aussi que les PL sont plus coûteux que les véhicules légers, car utilisant plus de diesel ou de matériaux (pour les effets amonts) et étant caractérisés par une motorisation plus puissante (donc plus bruyante)³¹.

Tableau 22 – Valeurs tutélaires pour les coûts marginaux externes environnementaux (2012)

	VP	VUL	PL
CO₂ (€/t)			35,8
NO_x (€/kg)			9,3
SO₂ (€/kg)			8,5
PM_{2.5} (€/kg)			17,1-4595,4
Bruit (€/100 vkm)	0,003-0,268		0,010-2,684
Effets amont (€/vkm)	0,009	0,012	0,031

7.3 L'enquête sur les quais des métros parisiens

Afin de valoriser la congestion dans les métros parisiens et d'identifier les canaux de l'inconfort, nous avons élaboré et récolté par nos soins une enquête originale. Précisons que l'autorité organisatrice des TP de la région Ile-de-France (le STIF à l'époque, IDFM aujourd'hui) avait commandé au bureau d'études néerlandais Significance une analyse sur la valorisation du confort dans les transports publics (Kroes et al., 2013), à peu près à la même période. Bien que nous partagions un grand nombre de similitudes, notamment au niveau des résultats, notre principale spécificité provient des modalités de récolte. Contrairement à Significance (qui a eu recours à un panel en ligne), nous avons ainsi interrogé près de 1000 voyageurs entre novembre et décembre 2010, directement sur les quais de 11 stations des lignes 1 et 4, durant les pointes du matin et du soir (les lieux et les horaires de récolte ayant été déterminés suivant une méthode de quotas).

³⁰ Les coûts externes des polluants locaux du rapport Quinet ont été obtenus via l'« Impact Pathway Approach » (Ducos, 2014). Elle consiste à estimer les émissions du trafic routier à l'aide de l'approche COPERT puis à appliquer un modèle météorologique pour déterminer la concentration de polluants dans un espace donné. Connaissant le nombre de personnes qui y résident, on considère ensuite des fonctions « dose-réponse » pour calculer la réduction de l'espérance de vie générée par une exposition prolongée à une certaine concentration de polluants. La dernière étape nécessite de recourir aux valeurs statistiques de la vie pour monétariser les pertes sanitaires puis de les normaliser par le volume de trafic routier et sa composition afin d'obtenir des valeurs tutélaires kilométriques.

³¹ S'il est possible de coupler modèles de trafic et modèles acoustiques (Andersson et Ogren, 2013), nous avons laissé cette thématique pour de futurs travaux et nous utilisons les valeurs tutélaires kilométriques proposées par les directives officielles.

Le tableau 23 décrit les principales caractéristiques des individus dans notre échantillon ainsi que celles de leurs voyages. Bien qu'elle diffère selon certaines dimensions, la population que nous étudions partage de nombreuses similitudes avec les usagers des TP interrogés en 2010 dans le cadre de l'EGT.

Tableau 23 - Caractéristiques des répondants et de leurs voyages

	Sample	Sub-sample	Diff. sign.	EGT Sample
<i>N</i>	999	278		2414
Female (%)	51.5	52.6	n.s.	55.1
Age (Years)	35.8 (sd: 12.4)	35.5 (sd: 13.4)	n.s.	38.1 (sd: 14.4)
Car available (%)	37.4	36.4	n.s.	33.5
Income (Euros)	2,422 (sd: 2,293)	2,282 (sd: 2,126)	n.s.	2,321 (sd: 1,861)
Live in Paris (%)	52.7	44.5	n.s.	61.6
Interviewed during morning peak (%)	50	36	***	-
Interviewed during evening peak (%)	50	64	***	-
Motive (%)				
Work	70.2	66	*	56
Other	29.8	34	*	44
Line (%)				
Line 1	50.1	55.1	**	-
Line 4	49.9	44.9	**	-
Total travel time (minutes)	48.1 (sd: 36.7)	46.9 (sd: 35.4)	n.s.	41.5 -
Surveyed travel time (minutes)	9.7 (sd: 6.5)	9.6 (sd: 6.25)	n.s.	- -
Daily use of the line (%)	63.3	66.9	n.s.	-
In-vehicle density (users/m ²)	3.153 (sd: 1.203)	3.232 (sd: 1.191)	n.s.	- -
Comfort satisfaction (0-10)	4.464 (sd: 2.186)	4.230 (sd: 2.218)	**	-

Notes. This table summarizes a specialized survey collected in the Parisian subway and the EGT sample of users using the Paris subway during peak periods. Percentages denote frequencies. Age and income means and standard deviations are computed with the center of the categories.

* Significance level 10% using a two sided t-test comparing variable means of sample and subsample.

** Significance level 5% using a two sided t-test comparing variable means of sample and subsample.

*** Significance level 1% using a two sided t-test comparing variable means of sample and subsample.

Notre questionnaire comprenait deux principales parties. Tous les individus devaient tout d'abord répondre aux scénarios contingents sur les échanges entre durée des voyages et confort dans les wagons, l'objectif étant ici d'estimer l'utilité marginale du temps pour différents niveaux de congestion. Afin de limiter l'incidence d'un éventuel biais de sélection, où seuls les individus ayant une faible valeur du temps accepteraient de participer au questionnaire, les enquêteurs avaient pour consigne de compléter cette première partie du questionnaire entre le passage de deux métros. En pratique, les personnes devaient sélectionner sur un support visuel la carte correspondant le mieux aux conditions qu'ils pensaient rencontrer une fois le questionnaire terminé.

La figure 10 décrit des niveaux de congestion dans les wagons compris entre 0 et 6 voy/m². Le tableau 24 représente quant à lui la distribution des situations de congestion décrites par les voyageurs. Ces perceptions du confort sont très corrélées avec les comptages que nous avons réalisés à la même période depuis les wagons des lignes 1 et 4. Moins de 3% des individus ont rapporté des conditions de déplacement permettant de s'asseoir (1 voy/m² ou moins) durant les pointes.

Figure 10 – Représentation du confort dans le métro parisien

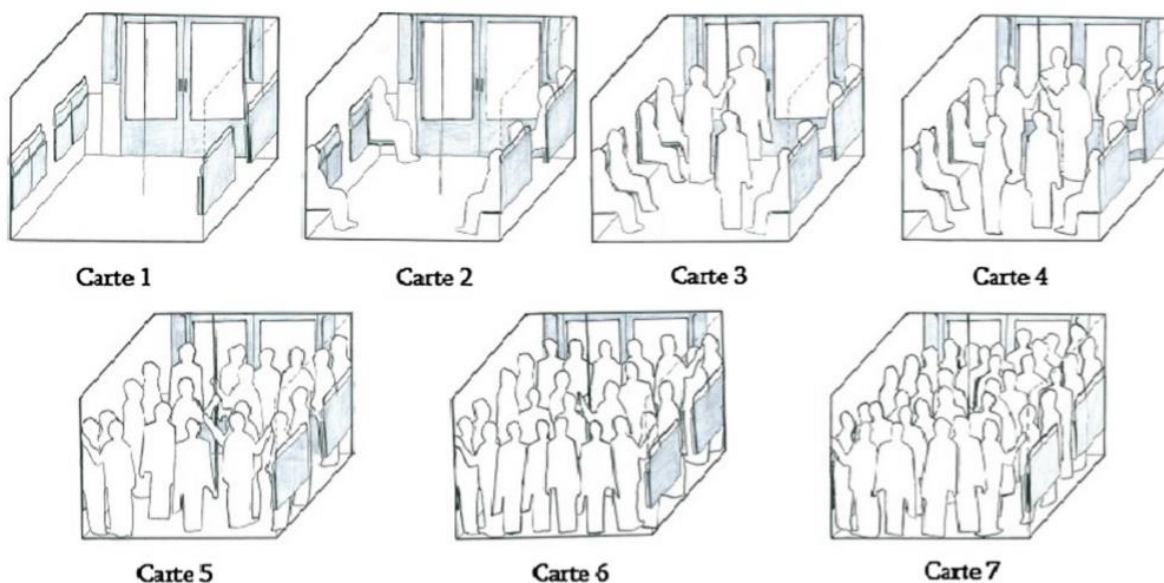


Tableau 24 – Distribution des niveaux de densité dans les wagons

In vehicle density (pass/m ²)	Frequencies (%)
0	0.1
1	2.8
2	16.2
2.5	26.4
3	24.2
4	20.0
6	10.2

Il était également demandé aux répondants de donner une note (comprise entre 0 et 10) pour qualifier leur satisfaction vis-à-vis de ces niveaux de confort (0 correspondant à une très forte insatisfaction), cette note constituant la variable dépendante de l'équation (58). Le tableau 25 décrit la distribution des réponses individuelles à cette question. On constate une corrélation négative très claire entre la note (CS, pour « confort satisfaction ») et la densité de voyageurs (IVD, pour « in-vehicle density »). A contrario, la satisfaction à l'égard du confort ne semble pas dépendre de la durée des déplacements (IVTT, « in-vehicle travel time »).

Tableau 25 – Distribution des notes décrivant la satisfaction vis-à-vis du confort (CS)

CS	Frequency (%)	Ave. IVD	Ave. IVTT
0	6.3	5.1	9.8
1	4.3	4.3	9.7
2	9.5	4.0	10.2
3	11.4	3.4	10.1
4	12.6	3.0	10.1
5	21.9	2.8	9.8
6	17.5	2.7	9.3
7	10.4	2.6	8.8
8	4.3	2.5	9.3
9	1.2	2.0	11.1
10	0.6	2.6	7.9

Notes. This table reports descriptive statistics for sub-samples clustered by CS. Column (2) reports the part of each sub-sample into the whole sample. Columns (3) and (4) respectively report the average IVD, in users per square meter, and the average in-vehicle travel time, in minutes, in each sub-sample.

Si, dans Haywood et Koning (2015), nous ne nous intéressons qu'aux « préférences déclarées » des individus qui se voyaient proposer des parcours plus longs contre un confort supérieur (une sorte de « consentement à payer »), 20% de l'échantillon (finalement écarté) devait choisir entre des voyages plus rapides mais dans des rames plus bondées (« consentement à recevoir »). Le tableau 26 décrit les améliorations de confort hypothétiques présentées aux 776 personnes qui constituent l'échantillon retenu dans Haywood et Koning (2015), pour différents niveaux de confort de référence. On constate que notre protocole expérimental a permis d'atteindre des offres hypothétiques quasi-aléatoires, leur distribution étant relativement homogène.

Tableau 26 – Distribution des améliorations de confort proposées aux voyageurs

Expected density (pass/m ²)	1	2	2.5	3	4	6
<i>Hypothetical density</i>						
0 pass/m ² (pct interviewees)	100.0	51.3	30.0	26.4	19.4	16.7
1 pass/m ²		48.7	31.4	21.6	20.9	8.3
2 pass/m ²			38.6	31.0	21.6	16.7
2.5 pass/m ²				21.0	20.1	18.3
3 pass/m ²					18.0	13.3
4 pass/m ²						26.7

Le tableau 27 décrit quant à lui la hausse aléatoire des temps de parcours (comprise entre 3 et 18 minutes) que devaient consentir les voyageurs afin de bénéficier d'une congestion moindre dans les wagons. La distribution visée (et atteinte) par notre protocole expérimental provient de celle obtenue lors de nos précédentes études sur le métro parisien (Haywood et Koning, 2012 ; Prud'homme, Koning, Lenormand et Fehr, 2012).

Tableau 27 – Distribution des enchères temporelles

	3 min	6 min	9 min	12 min	15 min	18 min
Pct of interviewees	21.5	27.8	16.0	14.7	14.0	6.0

A l'instar de nombreuses analyses en économie de l'environnement, nous avons mobilisé dans Haywood et Koning (2015) un système de « doubles enchères fermées » (Haab et McConnel, 2003), cette procédure visant à réduire l'intervalle au sein duquel se trouve la valeur moyenne pour le confort. Ainsi, les individus qui acceptaient de voyager plus longtemps contre plus de confort se voyaient ensuite proposer, lors d'un second tour d'enchères, un rallongement du temps de déplacement plus conséquent, contre le même niveau hypothétique de densité. A l'inverse, les personnes qui refusaient la première enchère étaient ensuite confrontées à un temps de parcours plus faible. Puisque seuls 42% des individus ont accepté la première offre (de 8,7 minutes en moyenne), la seconde enchère est légèrement plus faible (8,0 minutes), pour le même taux de réponses positives (voir tableau 28). On constate par ailleurs que les usagers de la

ligne 1 et ceux interrogés le soir étaient plus enclins à accepter les scénarios contingents.

Tableau 28 – Offres et réponses aux deux tours d’enchères

	Total	Line 1	Line 4	Morning	Evening
Expected density (pass/m ²)	3.1	3.5	2.7	2.9	3.3
Hypothetical density (pass/m ²)	1.3	1.5	1.1	1.1	1.4
Bid 1 (min)	8.7	8.5	8.9	8.8	8.6
Answer 1 positive (%)	42	49	34	38	45
Bid 2 (min)	8.0	8.1	7.9	7.9	8.2
Answer 2 positive (%)	42	43	40	40	43

Après avoir pris part à cette première partie de l’enquête, les voyageurs avaient la possibilité de laisser passer un métro et de prolonger le questionnaire. Il est notable que 27% des individus ont accepté cette proposition, ce qui dénote un réel intérêt pour la thématique du confort dans les TP. Comme indiqué ci-dessus, les 278 personnes qui ont prolongé l’enquête utilisent plus la ligne 1, voyagent moins fréquemment pour un motif « domicile-travail » et plus souvent le soir. En sus de questions sur leur possibilité d’ajuster leurs horaires de voyage ou sur l’utilisation d’autres lignes (ces réponses n’ayant au final pas été analysées), c’est lors de ce second volet de l’enquête que furent récoltées les notes décrivant la pénibilité associée aux 8 canaux de l’inconfort, lorsqu’il y a 6 voy/m² dans les wagons (soit la « pire » des situations sur la figure 10). Le tableau 29 synthétise les réponses à ces questions qui ont été mobilisées pour estimer l’équation (59) dans Haywood, Koning et Monchambert (2017). On constate que la promiscuité physique, les mauvaises odeurs ou la station debout sont les facettes de l’inconfort qui ont été perçues par les individus comme étant les plus gênantes, que l’on s’intéresse aux moyennes des notes attribuées ou aux classements auxquels elles aboutissent. A l’inverse, les risques de vols ou de chutes lorsqu’il y a beaucoup de mondes dans les wagons ne sont pas préoccupants pour les voyageurs.

Tableau 29 – Les canaux de l’inconfort dans le métro

Category	Cause of dis.	Mean rank	Mean CCD	sd CCD
Psychological	Over-closeness	2.0	7.7	2.525
Physical	Standing	3.3	6.3	3.208
Sensory	Noise	4.2	5.2	2.924
	Smell	3.1	6.6	2.827
Temporal	Time Loss	4.3	5.1	2.874
	Waste of Time	3.9	5.5	3.116
Risky	Fall	5.2	3.9	6.286
	Robbery	3.8	5.5	3.198

Notes. This table reports descriptive statistics for each of the self-reported dissatisfactions with the cause of crowding discomfort, CCD. Column (1) (category) reports the category of the cause of crowding discomfort. Column (3) reports the mean value of the rank. The rank was obtained by ordering all the dissatisfaction measures for one user. If the two highest dissatisfaction measures are equal, their rank is 1 and the rank of the third highest dissatisfaction mark is 3. Columns (4) and (5) respectively report the mean CCD and the standard deviation of CCD.

7.4 Autres données mobilisées

Outre ces différentes bases de données, nous avons mobilisé d'autres paramètres techniques que nous présentons brièvement. La fonction de coût marginal social que nous considérons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) comporte les dépenses liées à l'usure et à l'entretien des infrastructures routières. Nous mobilisons les données recommandées par la DGITM dans ses « fiches-outils »³². Ces paramètres varient selon les types de voiries (autoroutes, routes communales, ...) et selon les types de véhicules. Pour 2012, les coûts marginaux d'usure pour le réseau MODUS sont en moyenne de 0,008 eu/vkm pour les VP, de 0,012 eu/vkm pour les VUL et de 0,031 eu/vkm pour les PL.

Afin d'estimer les pertes de bien-être collectif liées à la congestion des métros, nous utilisons également dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) des paramètres décrivant les dépenses liées à l'exploitation du réseau parisien par la RATP. Reprenant les valeurs de Kilani et al. (2014), nous considérons un coût marginal de production et un coût moyen d'exploitation de 0,18 eu/pkm et de 0,51 eu/pkm respectivement. Pour les dépenses monétaires supportées par les voyageurs, Kilani et al. (2014) supposent un prix du billet de 0,17 eu/pkm, impliquant un taux de subvention de 67%. Finalement, nous avons récupéré dans plusieurs rapports publiés par l'autorité organisatrice des transports collectifs en Ile-de-France et par la RATP des informations sur l'offre et la demande de métros durant les heures de pointe, notamment la fréquence des lignes, la vitesse commerciale, le nombre de places assises dans les wagons ou encore le nombre total de places offertes.

Les derniers paramètres dont nous avons besoin pour mener nos analyses empiriques sont les élasticités de la demande par rapport au coût généralisé des transports, nécessaires pour calibrer les fonctions de demande inverse décrites par les équations (1) et (15). Etant donné le manque d'observations sur ces paramètres comportementaux pour le cas de l'Ile-de-France, nous avons utilisé des valeurs proposées dans la littérature grise ou académique. Concernant la demande de métros, nous mobilisons dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) une valeur centrale de -0,6 en repartant du (large) spectre proposé par Pauley et al. (2006) pour les TP londoniens, en accord avec la valeur proposée par Litman (2004). Concernant l'élasticité de la demande de VP utilisée dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020), nous la différencions selon que les déplacements aient lieu durant les heures creuses (-0,8) ou les heures de pointe (-0,4), la demande étant supposée plus contrainte à ces derniers moments de la journée (Goodwin, 1992). Pour la demande de fret, force est de constater qu'il existe encore moins de preuves empiriques, surtout au niveau urbain (de Jong, 2003 ; Rand, 2014). Au regard des faibles

³² <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/evaluation-des-projets-transport#e4>

alternatives modales en Ile-de-France, nous avons supposé une même valeur de -0,2 pour les VUL et les PL, sans distinguer les périodes de la journée. Notre modèle théorique autorisant des substitutions entre VUL et PL, via la matrice B (équation (14)), nous avons finalement retenu une valeur (symétrique) de 0,05 impliquant, par exemple, que la demande de PL augmentera de 0,05% si le coût généralisé des VUL connaît une hausse de 1%. Conscients des incertitudes entourant ces paramètres comportementaux, nous proposons divers tests de sensibilité visant à cerner leurs influences sur les pertes de bien-être collectif et sur les péages optimaux que nous estimons.

7.5 Autres résultats pertinents

En utilisant les fonctions temps-débit agrégées estimées dans Beziat, Koning et Toilier (2017), nous calculons les pertes de temps collectives liées à l'arrivée sur les routes franciliennes d'un petit ou d'un grand véhicule additionnel (voir équation (43)). Comme le montre le tableau 30, ajouter au flux total une VP ou un VUL (faisant chacun 1 km) génère des pertes collectives de 4,7 minutes en moyenne. C'est notamment pour les liaisons entre Paris et ses banlieues que les effets marginaux de congestion sont les plus importants, les flux de véhicules impactés étant supérieurs. Il est notable que ces estimations sont très proches de la valeur proposée par Leurent et al. (2009) qui avançaient pour les VP des pertes marginales de congestion de 5 min/vkm en Ile-de-France. En outre, on constate que l'ajout d'un PL sur 1 km de routes fera perdre 30 minutes en moyenne, ce résultat suggérant donc que les grands véhicules capturent une très grande part de la voirie et gênent considérablement les autres conducteurs. Une originalité des résultats du tableau 30 provient finalement de la décomposition des pertes collectives entre les différents usagers des routes. Ainsi, seuls 3% des ralentissements causés par le VUL et la VP marginal sont supportés par les PL. A contrario, ceux-ci supportent 10% des pertes de temps liées à l'arrivée sur les routes d'un grand véhicule en plus.

Tableau 30 – Pertes temporelles marginales (S=VP+VUL, L=PL)

Causées par / à	S / S	S / L	S / Tous	L / S	L / L	L / Tous
Ile-de-France (min/vkm)	4,52 (97,2%)	0,13 (2,8%)	4,65 (100%)	28,30 (90,1%)	2,82 (9,9%)	31,12 (100%)
Paris – Paris (min/vkm)	3,84 (98,5%)	0,06 (1,5%)	3,90 (100%)	23,59 (94,9%)	1,28 (5,1%)	24,87 (100%)
Paris – Banlieue (min/vkm)	9,05 (97,7%)	0,21 (2,3%)	9,26 (100%)	56,97 (92,8%)	4,43 (7,2%)	61,40 (100%)
Banlieue – Banlieue (min/vkm)	4,22 (97,0%)	0,13 (3,0%)	4,35 (100%)	26,44 (90,5%)	2,76 (9,5%)	29,20 (100%)

Dans la section 3, nous avons mis en avant une autre originalité des résultats de Beziat, Koning et Toilier (2017). En effet, nous pouvons utiliser nos paramètres pour estimer, sur la base de l'équation (44), un coefficient d'équivalence qui exprime l'évolution des temps de parcours individuels lorsqu'on remplace un petit véhicule par un PL. Pour rappel, ce taux marginal de substitution dépend du type de conducteur étudié et de la composition du trafic. Les résultats du tableau 31 diffèrent grandement des coefficients d'équivalence exogènes utilisés dans les modèles d'affectation. Dans le cadre des simulations multi-classes réalisées avec MODUS par exemple, nous avons classiquement supposé qu'un PL occupe entre 2 et 2,5 fois plus d'espace viaire qu'une VP, et donc que les effets sur le temps de parcours d'un PL marginal sont donc entre 2 et 2,5 fois équivalents à ceux d'une VP marginale. En mobilisant nos estimations dans Beziat, Koning et Toilier (2017), nous trouvons au contraire que substituer un petit véhicule par un PL générera, pour les automobilistes ou les conducteurs de VUL, des pertes de temps 5,5 fois supérieures lorsque les grands véhicules représentent 10% du trafic. Les valeurs proposées dans la littérature pour les coefficients d'équivalence VP exogènes sont atteintes lorsque les PL comptent pour près de la majorité du flux. Ce taux de marginal de substitution est par ailleurs supérieur pour les grands véhicules, compris entre 18 et 6 selon la part des PL dans le flux total. Ces résultats sont certes exploratoires et appellent des prolongements ultérieurs. Nous sommes toutefois convaincus qu'ils participent à introduire de l'hétérogénéité dans l'analyse de la congestion routière, en prenant en compte les différences entre les véhicules ou les états du trafic.

Tableau 31 – Coefficients d'équivalence endogènes

Part des PL dans le trafic	0%	10%	20%	30%	40%	50%
TMS^{PL→VP} pour une VP	6,7	5,5	4,5	3,6	2,9	2,2
TMS^{PL→VP} pour un PL	18,0	14,7	12,0	9,7	7,7	6,0

Même si nous nous contentons de regarder dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) les conditions moyennes de circulation en Ile-de-France et que nous ne proposons pas d'analyse spatialisée, il est finalement possible d'utiliser nos fonctions pour différencier les coûts marginaux externes selon que le kilomètre additionnel soit parcouru, par exemple, dans la Ville de Paris ou en banlieue. Les résultats du tableau 32 pourraient ainsi être particulièrement pertinents pour calculer les bénéfices collectifs liés à des changements récents de la mobilité dans Paris (voir tableau 14). Alors même que les nuisances environnementales sont vraisemblablement sous-estimées pour les kilomètres circulés dans la capitale, les coûts marginaux externes totaux des trajets y sont près de deux fois supérieurs à ceux des déplacements en banlieue. Fort logiquement, les taux de couverture des externalités sont plus faibles dans le cœur de la région.

Tableau 32 – Coûts marginaux externes dans Paris et en banlieue

	Paris			Banlieue		
	VP	VUL	PL	VP	VUL	PL
Congestion (eu/vkm)	0,303	1,486	1,733	0,125	0,597	0,698
Environnement (eu/vkm)	0,107	0,242	1,144	0,102	0,217	1,114
Usure routes (eu/vkm)	0,006	0,007	0,056	0,008	0,010	0,051
Coût externe total (eu/vkm)	0,416	1,735	2,932	0,235	0,824	1,863
Taxes (eu/vkm)	0,083	0,084	0,176	0,083	0,084	0,176
Taux de couverture	19,9%	4,8%	6,0%	35,4%	10,2%	9,4%

7.6 Tests de sensibilité

Afin de questionner la robustesse de nos résultats, nous avons conduit dans Haywood, Koning et Prud'homme (2018) divers tests de sensibilité en considérant une ligne « moyenne » du réseau de métros parisiens. Nous renvoyons les lecteurs intéressés à l'article original pour une discussion plus poussée sur chacune des dimensions testées et nous nous contentons d'en mentionner ici trois. Avant cela, rappelons que le CEC équivaut également au triangle d'Harberger sur la figure 1 et que son ampleur dépend donc aussi bien de la base que de la hauteur dudit triangle (respectivement ΔQ et $MEC(Q_0) + (MOC - f_0)$ dans le tableau 33).

Tableau 33 – Tests de sensibilité pour les métros

Test	Q_0 (pass/t)	Q^* (pass/t)	ΔQ (%)	$MEC(Q_0) + (MOC - f_0)$ (eu/pkm)	ECC (M eu/y)
Benchmark	531	486	9.2	0.133	3.4
$\epsilon = -0.3$	531 (0.0%)	506 (4.2%)	4.8 (-48.0%)	0.133 (0.0%)	1.9 (-45.8%)
w^w and $w^w = +20\%$	531 (0.0%)	485 (-0.2%)	9.4 (2.0%)	0.157 (18.5%)	4.2 (20.7%)
$Q_0 = +20\%$	637 (20.0%)	577 (18.7%)	10.5 (13.3%)	0.157 (18.5%)	5.5 (59.4%)
Public funds opportunity cost = 1.2	531 (0.0%)	485 (-0.1%)	9.4 (1.6%)	0.135 (1.5%)	3.5 (3.0%)
$f_0 = MOC = 0$	531 (0.0%)	480 (-1.2%)	10.5 (14.2%)	0.123 (-7.5%)	3.6 (4.3%)
$f_0 = 0.20$ and $MOC = 0.15$	531 (0.0%)	507 (4.3%)	4.7 (-49.1%)	0.073 (-45.2%)	1.0 (-70.9%)
Scheduling costs: $g(Q) + 33\%$	531 (0.0%)	476 (-2.0%)	11.4 (23.8%)	0.173 (30.5%)	5.5 (58.4%)
Scheduling costs: $g(Q) + 66\%$	531 (0.0%)	468 (-3.7%)	13.4 (45.3%)	0.214 (61.0%)	7.8 (125.3%)
Scheduling costs: $g(Q) + 100\%$	531 (0.0%)	460 (-5.2%)	15.2 (65.3%)	0.255 (92.5%)	10.4 (201.5%)

Notes: Percentages in brackets refer to the changes with respect to corresponding benchmark values.

On constate qu'une demande de TP plus inélastique ($\varepsilon = -0,3$ au lieu de $-0,6$) conduit à une réduction du CEC de 46% environ. Dans cette configuration, l'écart entre la fréquentation effective et celle optimale s'estompe en effet considérablement (-48%). Autrement dit, les coûts collectifs liés à la congestion des métros sont moindres pour les réseaux dont les usagers sont plus captifs. Le second test que nous voulons mettre en avant concerne le niveau de la demande initiale, supposée ici supérieure de 20%. On remarque dans ce cas que le CEC augmente plus que proportionnellement (+60%), ce changement jouant aussi bien sur l'écart entre trafic effectif et optimal que sur le coût marginal externe actuel. Par conséquent, si notre estimation du CEC de 65 M eu/an peut sembler modérée, ce second test souligne la nécessité de bien accompagner la probable hausse future de la fréquentation des TP parisiens. Nous avons expliqué dans la section 2 que l'approche statique de la congestion occulte les coûts psychologiques liés aux écarts entre les horaires des déplacements et ceux qui correspondraient au planning « idéal » des individus. Ainsi, certains voyageurs partent tôt de chez eux pour éviter les métros bondés alors qu'ils préféreraient rester un peu plus longtemps auprès de leurs proches. Il est raisonnable d'avancer que ces « scheduling costs » sont bornés par les coûts de congestion, la saturation des réseaux ne pouvant s'observer dans le cas contraire. Suivant cette logique, un des tests de sensibilité augmente le coefficient multiplicatif de notre fonction de congestion. Cette manière simpliste d'appréhender les effets dynamiques de la congestion revient à augmenter substantiellement le CEC, les pertes collectives pouvant même tripler. Cette facette de la congestion des TP mérite donc d'être étudiée attentivement.

Concernant les pertes de bien-être collectif sur les routes, les résultats que nous proposons dans Koning, Combes, Coulombel et Gardrat (2020) pourraient être également affectés par les hypothèses faites sur les valeurs des élasticités de la demande par rapport aux coûts généralisés. Le tableau 34 teste donc la sensibilité de nos conclusions aux valeurs choisies. Rappelons que les estimations centrales reposent, pour les heures de pointe, sur une élasticité de la demande de VP au coût généralisé égale à $-0,4$, une élasticité de la demande de VUL et de PL égale à $-0,2$ et une élasticité croisée pour les véhicules de fret de $0,05$. La méconnaissance des « vraies » valeurs des élasticités affecte très peu le montant des péages optimaux. Ce constat semble particulièrement pertinent pour les véhicules de fret, la sensibilité du trafic VUL et PL par rapport aux ressources économiques engagées pour assurer le TMV étant une réelle inconnue. La seconde conclusion concerne les niveaux des trafics optimaux et du bien-être collectif qui sont, au contraire, fortement dépendants des hypothèses faites sur les élasticités. On constate notamment que le bien-être des usagers des VP ou des transporteurs baisse considérablement dès que la demande est supposée plus élastique, le nombre de véhicules « en trop » par rapport à l'optimum augmentant fortement. Finalement, ces tests soulignent que de futures études doivent être menées pour mieux connaître

l'élasticité croisée entre VUL et PL. Le bien-être économique des opérateurs de fret varie du simple au double lorsqu'on fait l'hypothèse que les gros et les petits véhicules sont (ou non) substituables pour garantir le TMV en Ile-de-France.

Tableau 34 – Tests de sensibilité aux élasticités (HPM)

	FB Optimum	$\varepsilon^{VP} = - 0,6$	$\varepsilon^{VUL} = - 0,3$	$\varepsilon_{PL}^{VUL} = 0$	$\varepsilon_{PL}^{VUL} = 0,1$
Flux VP (veh/h/km)	497,0	468,0	499,8	500,2	493,5
Flux VUL (veh/h/km)	24,9	25,3	21,2	22,7	27,2
Flux PL (veh/h/km)	19,1	19,3	19,1	17,5	20,7
Taxes VP (eu/vkm)	0,385	0,373	0,384	0,383	0,388
Taxes VUL (eu/vkm)	1,518	1,460	1,505	1,503	1,533
Taxes PL (eu/vkm)	2,750	2,679	2,736	2,733	2,769
SW VP (M eu/per.)	20,4	13,8	20,5	20,6	20,2
SW Fret (M eu/per.)	8,5	8,5	6,5	6,0	13,3

Page délibérément laissée vierge

Rapport d'activités

Les articles synthétisés dans la première partie de ce document ne constituent qu'une fraction de mes activités académiques depuis que j'ai rejoint l'IFSTTAR-Université Gustave Eiffel et le laboratoire SPLOTT en décembre 2012. Ce second volet du mémoire décrit brièvement les autres travaux de recherche que j'ai réalisés ainsi que mes activités d'enseignements, d'encadrements ou encore certaines de mes expertises.

8. Autres travaux de recherche

Outre la congestion des transports urbains, j'ai exploré (et j'explore actuellement) une grande variété de thématiques, que ce soit dans le cadre de projets spontanés ou de contrats de recherche institutionnels³³. Je me contenterai ici d'en mentionner 4.

8.1 Caractéristiques des envois de marchandises

J'ai tout d'abord entrepris une série de travaux qui mobilisent une enquête sur les envois de marchandises en France récoltée en 2004 sous la supervision du laboratoire SPLOTT, l'enquête ECHO. Cette base de données, bien que datant quelque peu, fournit une multitude de variables pour plus de 10400 observations.

Un premier article (Combes et al., 2016)³⁴ a utilisé les données ECHO pour étudier les déterminants des prix des prestations de transport routier. Il s'agissait d'identifier tout d'abord au niveau théorique les caractéristiques propres aux marchandises transportées, à l'offre de services de transport ou encore aux relations entre chargeurs et transporteurs qui pourraient influencer le prix facturé. En proposant différents modèles économétriques, nous avons ensuite estimé les élasticités des prix du transport par rapport à différents facteurs. Outre une extrême hétérogénéité (concernant l'effet des distances, des poids ou encore de la valeur des marchandises), nous trouvons que les petits envois sont plus à même d'être mutualisés avec d'autres marchandises, et donc de coûter moins cher aux chargeurs. Par ailleurs, nous avons mis en évidence que l'intensité et la continuité de la

³³ L'ensemble de mes productions académiques (publications, conférences, contrats de recherche) est disponible ici : https://www.ifsttar.fr/uploads/media/cv_mk_01.pdf

³⁴ Combes F., Harache J., Koning M. et Moreau E. (2016). Empirical Analysis of Freight Transport Prices Using the French Shipper Survey ECHO, In: Clausen U. et al. (eds.), *Commercial Transport: Lecture Notes in Logistics*, Springer International Publishing: 321-335.

relation entre les entreprises permettaient de baisser les prix du transport routier de marchandises, suggérant donc l'existence d'effets relationnels.

Dans le cadre d'une collaboration suivie avec des chercheurs du DLR, nous avons également utilisé les données ECHO pour questionner la transférabilité des résultats d'un modèle de choix logistique entre la France et l'Allemagne. Issu de la recherche opérationnelle, le modèle « Economic Order Quantity » (EOQ) stipule que la taille des envois de marchandises résulte d'un arbitrage entre coûts fixes supportés à chaque envoi et coûts de stockage et d'immobilisation des marchandises. Un premier article (Koning et al., 2018³⁵) a démontré que les paramètres du modèle structurel estimés avec les données allemandes et françaises étaient très proches au niveau statistique. En utilisant la méthode des classes latentes pour réduire l'hétérogénéité entre les envois, un second article (Piendl et al., 2020³⁶) a confirmé que les groupes de marchandises obtenus sur la base de caractéristiques logistiques (modes de conditionnement par exemple) étaient similaires dans les 2 pays mais aussi qu'ils permettaient d'augmenter le pouvoir prédictif du modèle EOQ, comparativement aux classifications usuelles des marchandises (groupes NST). Une version préliminaire de ce travail a reçu en 2017 le prix du meilleur article de la 3^{ème} « Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic » (Darmstadt).

8.2 Décarbonation du transport de fret

Une autre thématique qui structure actuellement certains de mes travaux porte sur les stratégies potentielles permettant de réduire à moyen ou long termes les émissions de CO2 du transport de fret en France.

Dans le cadre d'un contrat de recherche financé par la DGITM (ECHO-CO2), nous avons tout d'abord proposé une analyse socioéconomique ayant pour but d'estimer le coût d'abattement d'une tonne de CO2 en 2030 pour 3 politiques publiques différentes. Les mesures étudiées dans l'article qui synthétise ce travail (Koning et al., 2018³⁷) sont l'électrification des autoroutes (au travers d'un système de subventions versées aux sociétés concessionnaires) afin que des PL hybrides puissent s'alimenter en énergie

³⁵ Koning M., Combes F. Piendl R. et Liedtke G. (2018). Transferability of models for logistics behaviors: A cross-country comparison between France and Germany for shipment size choice, *RTS – Recherche Transports Sécurité, Special issue "Logistics practices and freight transport challenges: a French-German comparison"*, 14p.

³⁶ Piendl R., Koning M., Combes F. et Liedtke G. (2020). Building latent segments of goods to improve shipment size modelling : New evidence from France, en révision pour *Research in Transportation Economics*.

³⁷ Koning M., Rizet C. et Cruz C. (2018). Comment réduire les émissions de CO2 du transport de fret en France ? Evaluation socioéconomique de trois politiques publiques, *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 73: 45-76.

via des pantographes, le déploiement d'un réseau de stations d'avitaillement sur le territoire national afin de faciliter l'utilisation de PL circulant au gaz naturel et la hausse réglementaire du PTAC (poids total autorisé en charge) de 44 à 60 tonnes. Si ce dernier scénario générerait de forts gains pour les chargeurs et présenterait dans la situation de référence un coût d'abattement du CO2 négatif, suggérant donc une forme de « doubles dividendes », il est également le plus incertain au regard des tests de sensibilité proposés. A contrario, l'option PL hybride et autoroutes électriques aboutit à un coût d'abattement peu variable et raisonnable (près de 70 eu/tonne). Même s'il s'agit de la politique la plus coûteuse pour les finances publiques (subventions et pertes de TICPE), cette stratégie permettrait aussi d'économiser le plus de CO2.

Suite à ces travaux, j'ai été sollicité par des chercheurs de l'IDDRI souhaitant étendre le projet « Deep Decarbonization Pathways » au transport de fret en France. Le but de cette étude (Briand et al., 2019³⁸) était de décrire, d'un point de vue qualitatif comme quantitatif, deux trajectoires délibérément différenciées qui permettraient d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. L'originalité de ce travail est double. Elle provient tout d'abord de l'articulation entre des « storylines » qui décrivent les transformations des composantes du « système de transport de fret » (structures de production, de consommation et d'échanges, infrastructures de transport et offre de services logistiques, technologies des véhicules, système énergétique) et les évolutions quantifiées de plusieurs indicateurs nécessaires à la mise en oeuvre d'une « identité de Kaya ». Par ailleurs, nous avons proposé un scénario volontariste dans la mesure où, contrairement à la plupart des études qui se concentrent sur les changements technologiques, nous mettons l'accent sur les effets potentiels des mutations de la demande de transport de fret, via l'économie circulaire, le développement des circuits-courts, des approches filières ou encore un relâchement des attentes temporelles de la part des entreprises ou des consommateurs.

8.3 Infrastructures ferroviaires et développement local

Bien qu'appartenant à un laboratoire (SPLOTT) spécialisé sur le transport de fret et les activités logistiques, je m'intéresse également aux mobilités des ménages, comme l'attestent mes travaux sur la congestion dans les métros parisiens par exemple.

³⁸ Briand Y., Svensson J., Koning M., Combes F., Lamy G., Pourouchottamin P., Cayla J.M. et Lefevre J. (2019). Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France, *Rapport Descriptif - IDDRI*, 48p.

Peu de temps après mon arrivée à l'IFSTTAR, j'ai été responsable d'un contrat de recherche financé par le PREDIT (BASECOGV) qui explorait les effets potentiels des infrastructures ferroviaires à grande vitesse en France sur l'économie locale via des modifications des géographies de la production et, surtout, de la consommation. Pour réaliser l'analyse économétrique envisagée, il a fallu reconstruire les temps de parcours inter-urbains entre 1975 et 1982, pour les trajets routiers ou ferroviaires. Dans cette optique, nous avons noué des contacts avec des chercheurs du laboratoire ThéMA et nous avons pu élaborer un riche Système d'Informations Géo-Historiques (SIGH ; voir Bahoken et al., 2016a³⁹, 2016b⁴⁰). En parallèle du travail empirique exploratoire proposé dans BASECOGV, j'ai également entrepris une revue de la littérature sur les effets économiques locaux des TGV qui décompose ces derniers selon leurs canaux d'apparition ainsi que leurs temporalités (Blanquart et Koning, 2017⁴¹).

Bien que les potentialités offertes par ce SIGH doivent encore être pleinement exploitées, nous avons initié une étude économétrique qui questionne les effets du réseau ferroviaire en France sur la croissance démographique au 19^{ème} siècle (Bosquet et al., 2020⁴²). L'originalité de ce travail (en cours) est triple. Tout d'abord, nous ne disposons pas uniquement des informations sur la présence (ou non) d'une gare dans les communes observées - comme dans la plupart des études - puisque nous bénéficions aussi d'éléments sur l'évolution des temps de parcours. Afin de limiter les problèmes d'endogénéité entre conditions de transport et dynamisme local, nous pouvons par ailleurs mobiliser le réseau de voies postales des 17^{ème} et 18^{ème} siècles comme variable instrumentale du réseau ferroviaire au 19^{ème} siècle. Surtout, nous sommes en train d'exploiter les recensements historiques de la population pour identifier les canaux au travers desquels les trains auraient pu influencer la croissance démographique locale (via le taux de mortalité, le taux de natalité ou le taux de migration ?).

8.4 Valorisation de l'insécurité routière

La dernière thématique de recherche que je souhaiterais mentionner concerne la valorisation des morts et des blessés graves dans les accidents de la route. Dans le cadre d'une collaboration entre l'IFSTTAR-Université

³⁹ Bahoken F., Koning M., Mimeur C., Olarte-Bacares C. et Thevenin T. (2016). Les temps de parcours interurbains en France : une analyse géo-historique, *Transports*, 495: 17-25.

⁴⁰ Bahoken F., Mimeur C., Koning M. et Thévenin T. (2016). Les réseaux de transport à grande vitesse en France : construction et apports d'un système d'information géo-historique, *Proceedings of SAGEO 2016 - Spatial Analysis and Geomatics*, Nice, 19p

⁴¹ Blanquart C. et Koning M. (2017). The local economic impacts of high-speed railways : Theories and facts, *European Transport Research Review*, 9: 12.

⁴² Bosquet C., Mimeur C. et Koning (2020). Railways and local demographic growth in France : An historical analysis, *Work in Progress*.

Gustave Eiffel et des instituts en charge de la sécurité routière en Belgique, en Allemagne et aux Pays-Bas, je participe en effet à l'élaboration et à l'exploitation économétrique d'une étude de préférences déclarées ayant pour but de faire émerger des valeurs tutélaires sur l'insécurité routière dans les 4 pays.

A l'instar de nombreux articles sur le sujet, nous proposons aux participants (sélectionnés sur la base de quotas représentatifs et interrogés en ligne) de choisir entre différents itinéraires routiers qui diffèrent selon le montant des ressources monétaires à supporter, les temps de parcours et l'occurrence d'accidents graves ou mortels. Les différents niveaux de ces attributs ont été déterminés à l'aide d'un « D-efficient design » et chaque répondant est confronté à 7 arbitrages successifs. En analysant les réponses à ces choix hypothétiques avec l'économétrie des variables qualitatives, nous serons bientôt en mesure d'estimer les utilités marginales du temps, de l'argent et des risques d'accidentalité, ce qui nous permettra de proposer des « consentements marginaux à payer » pour éviter un mort ou un blessé grave sur les routes. En outre, cette étude doit indirectement permettre de proposer une valeur du temps pour les trajets routiers.

Ce travail s'annonce très prometteur pour deux principales raisons. Il est tout d'abord rare de pouvoir mener simultanément un même protocole expérimental dans 4 pays différents, qui plus est à une telle échelle puisqu'il est prévu d'interroger 2000 personnes par pays. Par ailleurs, nous avons pu intégrer des questions visant à capter les attitudes et croyances des individus concernant leurs (plus ou moins fortes) contraintes budgétaire et temporelle ainsi que leurs (plus ou moins fortes) prises de risques dans la vie quotidienne. L'idée est ici de mobiliser les modèles de choix discrets « hybrides » (car combinant variables observées et latentes) et d'introduire de l'hétérogénéité dans les désutilités marginales. Ce faisant, nous pourrions donc questionner l'existence éventuelle de croyances et d'attitudes différenciées selon les pays des répondants qui conduiraient à des valeurs tutélaires de l'insécurité routière contrastées.

9. Enseignements et encadrements

Si j'ai assuré des travaux dirigés à l'Université Paris 1 – Panthéon Sorbonne durant ma thèse de Doctorat, mon statut de chargé de recherche n'implique aucune obligation d'enseignements. Etant donnée la relative rareté d'intervenants spécialisés dans l'analyse économique des systèmes de transport, j'ai toutefois été contacté pour dispenser des cours dans différentes formations.

Entre 2013 et 2020, j'ai ainsi été responsable d'un cours d'Economie des transports à l'Université Paris 4 - Sorbonne pour la première année du Master GAELE-TLTE (Géographie-Amenégement). Durant les 21 heures que durait le séminaire, j'initiais tout d'abord les étudiants aux fondements de l'analyse microéconomique des transports (fonctions de demande, de coûts privés et sociaux, notion de surplus économique) puis j'abordais plusieurs cours thématiques : transport de marchandises, transport de voyageurs à longue distance, transports urbains de passagers, coûts externes des transports, politiques publiques. Surtout, j'envoyais aux étudiants plusieurs exercices empiriques afin de les préparer au mieux au partiel qui prenait, pour partie, la forme d'un calcul de VAN d'une politique publique imaginaire.

Durant la même période (2013-2020), j'ai également été responsable d'un module (de 12 heures/an) sur le calcul socioéconomique des projets et des politiques de transport dans le cadre du Mastère spécialisé de l'ENPC « Systèmes de transports ferroviaires et urbains ». Ce séminaire poursuivait un double objectif : présenter les fondements théoriques du calcul des VAN des interventions publiques et, en parallèle, mettre en pratique ces éléments de connaissances au travers d'exemples chiffrés. D'un point de vue personnel, j'ai réellement apprécié diriger ce module en raison des multiples interactions avec les participants, des ingénieurs travaillant dans des entreprises (publiques et privées) du secteur en France ou à l'étranger et disposant donc d'une connaissance réelle des projets de transport.

Outre une intervention en 2017 à l'ISSTO (Université de Rennes 2) dans le cadre d'une formation pour la CGT, ma dernière expérience d'enseignant en tant que chargé de recherche s'est déroulée entre 2017 et 2020. Durant ces trois années, j'ai en effet coordonné le cours d'Economie des transports du Master TRADD à l'ENPC. En plus de prodiguer des cours magistraux sur les effets territoriaux et sur la structure des coûts et des bénéfices des transports, j'avais pour charge de superviser le bon déroulé des autres cours et d'organiser l'examen final. Par ailleurs, j'ai encadré les mémoires d'étudiants durant un cours d'approfondissement. A titre d'exemples, certains sujets portaient sur la concurrence air-fer pour les voyages à longues distances ou sur la comparaison des bilans LOTI ex ante/ex post.

A côté de ces enseignements, j'ai eu l'opportunité de suivre et de conseiller activement le travail doctoral de plusieurs étudiants. Ainsi, j'ai été (ou je suis actuellement) le co-encadrant des thèses suivantes, toutes réalisées au sein du laboratoire SPLOTT et rattachées à l'Ecole Doctorale Villes, Environnement, Transports :

- Adrien Béziat (2013-2017) : Approche des liens entre transport de marchandises en ville, formes urbaines et congestion.
- Nathan Bounie (2013-2017) : La zone d'activité logistique comme levier de développement économique des territoires.

- Camille Horvath (depuis 2019) : Développement des circuits-courts alimentaires dans les espaces périurbains français : Quelle adéquation entre offre et demande ?

Si les échanges intellectuels sont d'une moindre intensité que lors de ces 3 co-encadrements, je suis par ailleurs (ou j'ai été) membre de 2 comités de pilotage de thèses et je participe au comité de suivi de 2 autres étudiants.

Finalement, mes expériences d'encadrements ne se sont pas limitées aux seuls travaux doctoraux. Depuis mon arrivée au sein du laboratoire SPLOTT, j'y ai ainsi dirigé ou co-dirigé 5 mémoires de stages (niveaux Licence et Master) ainsi que 2 projets d'ingénieurs en laboratoire (pour les élèves-ingénieurs de l'ENPC), sur des thèmes très variés (choix du stationnement illégal, déterminants de la connexion des villes françaises au réseau TGV, spécialisation des territoires dans les circuits-courts alimentaires).

10. Animation de la vie scientifique

En parallèle de ces différentes activités, je participe au dynamisme et au rayonnement de mon institut, en interne comme en externe.

J'ai ainsi la charge, depuis 2013, d'organiser et d'animer le séminaire du laboratoire SPLOTT. Avec environ 8 séances organisées chaque année, ce lieu de rencontre permet aux membres de mon équipe de présenter les résultats de leurs derniers travaux et ainsi de les faire progresser, avec un regard pluri-disciplinaire, constructif, bienveillant et amical.

Les membres de l'IFSTTAR-Université Gustave Eiffel étant naturellement intéressés par l'évaluation des politiques publiques, je me suis associé en 2017 avec des économistes d'autres laboratoires⁴³ pour animer le séminaire EVAPP. Se réunissant 2 fois par an, nous avons organisé des séances autour de thématiques diverses comme « les méthodes de l'évaluation », « la mesure des compensations environnementales » ou encore « la place des experts dans le processus de l'évaluation ». Ce séminaire, dont nous communiquons largement l'existence « hors » de l'IFSTTAR, constitue également pour nous l'occasion d'inviter des chercheurs extérieurs et de nouer avec eux des liens scientifiques et/ou amicaux.

L'IFSTTAR-Université Gustave Eiffel étant membre de l'Association des Sciences Régionales de Langue Française, j'ai participé à l'organisation des événements affiliés à cette communauté lorsqu'ils se sont déroulés sur le

⁴³ Laurent Carnis (DEST), Odile Heddebaut (DEST) et Pascal Gastineau (EASE).

campus Descartes. J'ai ainsi fait partie du comité d'organisation du 51^{ème} congrès de l'ASRDLF (2014) et j'ai participé au pilotage des Doctorales en 2014 et en 2015. Plus récemment, j'ai eu l'opportunité d'intégrer le comité local d'organisation du congrès de l'International Transport Economics Association, communauté scientifique qui m'est chère et dont la rencontre annuelle s'était déroulée en 2019 à l'École d'Économie de Paris. Finalement, j'ai porté des sessions thématiques lors des Rencontres Francophones Transports Mobilité de 2018 (à l'ENTPE) et 2020 (à l'IFSTTAR-Université Gustave Eiffel, événement reporté à 2021 en raison de la crise sanitaire).

Le dernier élément d'animation de la vie scientifique que je souhaiterais mettre en avant concerne mon statut de correspondant pour l'IFSTTAR au sein du DIM QI2. Financé par le conseil régional et piloté par le LISA, ce réseau⁴⁴ représente une incroyable plateforme d'échanges et de rencontres pour la communauté scientifique intéressée par la mesure, la compréhension et la régulation de la qualité de l'air en Ile-de-France. Outre les possibilités de financements (de projets, de stages, d'équipements) offertes par le DIM QI2, que je diffuse à tous les membres de l'IFSTTAR-Université Gustave Eiffel, nous⁴⁵ essayons actuellement d'initier un projet autour de la qualité de l'air durant les Jeux Olympiques et Paraolympiques de Paris 2024, ma participation étant naturellement axée sur la contribution des transports aux émissions de polluants.

11. Expertises

Pour ponctuer ce rapport d'activités, il me reste à détailler les expertises pour lesquelles j'ai été sollicité dans le cadre de mes fonctions de chargé de recherche.

Tout d'abord, je suis très fréquemment contacté par les comités de rédaction de revues scientifiques afin d'évaluer des articles soumis pour publication. Depuis fin 2012, j'ai ainsi réalisé (avec un réel intérêt) près de 30 rapports pour les titres suivants : *Revue Economique*, *Développement Durable et Territoires*, *Transportation Research - Part A*, *Transportation Research - Part B*, *Transportation Research - Part C*, *Transportation Research - Part D*, *Transport Policy*, *International Journal of Transport Economics*, *Economie et Sociétés*, *Revue d'Économie Régionale et Urbaine*, *L'Actualité économique*, *Transportation*, *Journal of Advanced Transportation*, *Research in Transportation Economics*, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, *Geographical Review*, *European Transport Research Review*, *Journal of Transport Geography*, *International Journal of Sustainable Transportation*, *Cities*.

⁴⁴ <https://www.dim-qi2.fr/>

⁴⁵ Avec Nicolas Coulombel (LVMT).

Mes connaissances de sujets spécifiques m'ont également conduit à évaluer des réponses à des appels à projets, en 2016 dans le cadre de financements de l'IRT Railenium et en 2018 pour le compte de l'ANR.

J'ai par ailleurs été membre entre 2013 et 2018 du Conseil scientifique de l'Observatoire socioéconomique et environnemental de la LGV Bretagne-Pays de la Loire⁴⁶, piloté par SETEC pour le compte de Eiffage Rail Express. Se réunissant 2 à 3 fois par an à Rennes, le conseil scientifique devait relire, évaluer et conseiller les travaux scientifiques réalisés dans le cadre de l'Observatoire par des équipes de SETEC et des laboratoires de géographie des Universités de Rennes ou d'Angers.

Une autre expérience, très enrichissante en raison de son caractère international, provient des invitations qui m'ont été formulées par le Forum International des Transports pour siéger à 4 tables rondes autour de sujets directement liés à mes domaines de recherche :

- Valuing convenience in mass transit system (2013) ;
- Ex-post Assessment of Transport Investments (2014) ;
- Zero value of travel time savings ? (2018) ;
- Accessibility and Transport Appraisal (2019).

Dernièrement (2017-2019), j'ai aussi eu l'occasion de rédiger (avec Yves Crozet) un rapport⁴⁷ sur le taux de couverture des externalités des transports en France pour le compte du Conseil scientifique du think-tank TDIE, dans le cadre des réflexions en cours sur la réforme de l'Eurovignette.

Finalement, mes travaux sur la décarbonation du transport de fret m'ont conduit à être invité en 2017 à un table ronde organisée par Bruegel et l'ICSTD (« Developing the long-term EU Climate strategy ») ou encore à être sollicité (en 2019) par le think-tank Transport & Environnement pour évaluer une étude qu'ils ont rédigée sur les « camions zéro-émission ». Surtout, je participe activement depuis 2019 à un groupe de travail (piloté par le CGEDD et France Stratégie) ayant pour objectif de proposer en 2021 un vaste travail prospectif sur les transports en France (et leurs émissions) aux horizons 2040 et 2060, passagers et marchandises.

⁴⁶ <https://www.ere-lgv-bpl.com/observatoire>

⁴⁷ Crozet Y. et Koning M. (2019). *Les effets externes des transports : définition, évaluation et implications pour les politiques publiques*, Rapport pour TDIE, 52p.