

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE RENNES 1
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 597
Sciences Economiques et sciences De Gestion
Spécialité : Sciences Economiques

Par

Romain GATÉ

Traffic congestion and pollution regulations in polycentric cities

Urban forms and road pricing

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 22 Novembre 2018
Unités de recherche : CNRS UMR6211 CREM et INRA UMR1302 SMART-LERECO

Rapporteurs avant soutenance :

Miren Lafourcade
Markus Herrmann

Professeure, Université Paris-Sud
Professeur, Université LAVAL, Québec

Composition du Jury :

Miren Lafourcade Professeure, Université Paris-Sud

Markus Herrmann Professeur, Université LAVAL, Québec

Fabien Moizeau Professeur, Université de Rennes1

André De Palma Professeur, ENS Cachan

Laurent Denant-Boemont Professeur, Université de Rennes1
Directeur de thèse

Carl Gaigné Directeur de recherche, INRA Centre de Rennes
Co-directeur de thèse

This Ph.D. thesis should not be reported as representing the views of University of Rennes 1. The views expressed are those of the author and do not necessarily reflect those of the University.

L'Université de Rennes 1 n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

Je vis dans un espace maximum alors qu'en ville on se bat pour un mètre carré qui définit l'espace.

Nicolas Hulot.

Remerciements

Ce travail de recherche ne peut se faire l'économie de remerciements envers les personnes qui ont contribué de près ou de loin à son aboutissement. Les rencontres enrichissantes furent nombreuses et j'espère n'avoir oublié personne.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance, mon respect et mon estime envers Messieurs Carl Gagné et Laurent Denant-Boëmont qui ont accepté d'encadrer cette thèse. Merci Laurent et Carl pour tous vos conseils, votre disponibilité, vos encouragements, votre temps que vous m'avez consacré et votre confiance placée en moi.

Merci à Miren Lafourcade, Markus Herrmann, Fabien Moizeau et André De Palma de m'avoir fait l'honneur d'être membre du jury de cette thèse.

J'aimerais remercier l'Ecole doctorale EDGE (ex-SHOS), ses directeurs passés Franck Moraux, Jean-René Binet et son directeur actuel Thierry Pénard pour leur soutien dans les projets individuels et collectifs des doctorants en économie, notamment de l'association PROJECT (PROmotion des Jeunes EConomistes en Thèse) au sein du CREM. Je souhaite également remercier ses gestionnaires Alexandrine Kirzin et Hélène Jean pour leur réactivité.

Le CREM et SMART-LERECO m'ont offert deux cadres de travail complémentaires et précieux dans la réalisation de cette thèse. Je tiens à remercier les directeurs passés du CREM, Yvon Rocaboy, Vincent Merlin et le directeur actuel Franck Moraux pour leur accessibilité, leur disponibilité, leur soutien dans les projets de l'association PROJECT et la qualité des échanges que nous avons pu avoir. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers David Masclet directeur adjoint du CREM pour son écoute et son soutien aux projets de la vie doctorale. Au sein de SMART-LERECO, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les directeurs Pierre Dupraz et Carl Gagné pour votre disponibilité, la transparence des informations en conseil de service, votre esprit d'ouverture et votre soutien précieux à la vie doctorale dans le cadre de l'unité mais aussi dans le cadre des

événements organisés conjointement par l'association PROJECT et l'association SIGMA des doctorants en gestion du CREM.

Je remercie les chercheurs du CREM ainsi que le personnel administratif Anne L'azou, Cécile Madoulet, Hélène Coda-Poirey, Caroline Lemoine, Julie le Diraison, Françoise Mazoleni, Gilles Conan, Annick Bougeant, Marylène Sauvée qui ont tout fait pour favoriser mes conditions de travail au sein de la Faculté de Sciences Economiques. Fabienne Ealet et Denis Noël ont toujours eu un mot gentil et le sourire en toutes circonstances. Merci à Fabienne de m'avoir appris à utiliser un percolateur afin de faire du café pour les "Café CREM" et séminaire doctoraux de l'association PROJECT. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Fabien Moizeau pour sa disponibilité, ses conseils autour de mes travaux de recherche et son dynamisme dans l'organisation des Summer School in Urban Economics. J'exprime ma gratitude envers Isabelle Cadoret et Marie-Hélène Hubert pour m'avoir intégré dans le groupe de travail "Ressources Naturelles et Territoire durable" grâce auquel j'ai pu présenter mes travaux et bénéficier de commentaires constructifs. Je souhaite adresser ma sympathie à Benoît Tarroux, Julie Ing, Maïté Stephan, Thierry Pénard, Michel Renault et Arthur Charpentier pour leurs questions et suggestions d'amélioration. Je souhaiterais remercier Marie-Hélène Hubert, Danièle Benezech, Jean-Louis Perrault, Thierry Karcher, Aurelie Bonein et Eric Malin pour leur professionnalisme et leur bonne coopération dans la préparation des Travaux Dirigés des différentes matières que j'ai pu enseigner. Merci aux étudiants de la Faculté des Sciences Economiques de mes groupes de TDs pour leur respect et leur capacité à me surprendre positivement.

À l'unité SMART-LERECO, je voudrais remercier chaudement Françoise Auffray, Anne Chauvel, Cécilia Elleouet, Nathalie Saux-Nogues, Christine Mesquida, Lise Frappier et Céline Martel pour leur réactivité et leur disponibilité sans failles face à toutes mes demandes. Je voudrais remercier ma coautrice Laure Latruffe qui m'a incité et permis de publier mon premier article scientifique en économie agricole. Je tiens à remercier Michel Pech pour les nombreuses discussions autour de mes travaux passés et futurs et son soutien moral dans la valorisation de mes travaux. Je ne peux pas oublier les quatre enseignants-chercheurs qui m'ont fait aimer l'Economie lorsque j'étais étudiant ingénieur. Jean Cordier, Marilyne Huchet-Bourdon, Cathie Laroche-Dupraz et Philippe Le Goffe m'ont passionné et convaincu de choisir cette voie, la spécialité en agroéconomie et Carl m'a fait aimer l'économie géographique, ce qui m'a amené à réaliser cette thèse. Je voudrais également saluer Stéphane Gouin qui est un professeur de marketing enthousiasmant et passionnant et qui a toujours pris de mes nouvelles. J'aimerais également remercier Anne Musson pour ses conseils et ses avis éclairés qui m'ont permis de conforter ma volonté de faire une thèse

en économie. Pour tous les bons moments passés au sein de SMART-LERECO, les discussions formelles et informelles avec les uns et les autres, je tiens à adresser ma sympathie à Stéphane Turolla, Sabine Duvaleix-Treguer, Laurent Piet, Aude Ridier, Alexandre Gohin, Christoph Heinzl, Carole Ropars-Collet, Elodie Letort, Fabienne Femenia, Chantal Le Mouël, Fabrice Levert, Claire Etrillard, Vincent Chatellier, Caroline Lemenant, Claire Coudrin, Claire Tarot, Yann Desjeux, Sylvain Cariou, Pascale Bazoche, Angela Cheptea, Thomas Coisson, Damien Rousselière, Catherine Vassy, Murielle Kalk, Karine Latouche, Leo Le Mener, Sterenn Lucas, Cécile Le Roy, Nicolas Legrand, Emmanuel Paroissien, Alice, Thibault, Loïc, François, Elodie, Marie, Beya, Josselin et Etienne. j'ai une pensée particulière pour Christine Samson qui me suit depuis bientôt 10 ans à Agrocampus Ouest et qui est toujours bienveillante et chaleureuse.

Lors de cette thèse, j'ai pu effectuer un séjour de recherche au Canada à l'Université LAVAL à Québec grâce notamment à Carl et Markus Herrmann directeur du laboratoire CREATE. Pour leur accueil et discussions fructueuses, je voudrais remercier Philippe Barla, Carlos Ordas Criado, Bruno Larue et Markus Herrmann. Je voudrais remercier tous les doctorants du CREATE pour leur chaleureux accueil avec une mention spéciale pour Mélissa, Safa, Nicholas, Sarah, Simon, Koffi, Carole, Mankan, Audon. Un avion raté peut créer de belles rencontres et je remercie Délicia, Sarah, Loïc, Anaïs et Léa pour tous les bons moments passés ensemble au Canada.

I would like to thank all participants, professors, Ph. D. Students in urban and transportation economics of numerous conferences, workshops and seminars I attended. I have a friendly thought for Kenneth Small, Richard Arnott, Mogens Fosgerau, Leonardo Basso about our fruitful discussions and their openness. I am truly grateful to Caroline Orset, Diego Puga, Matthew Turner, Rainald Borck, Fabien Moizeau, Fabien Candau, Camille Hémet, Thierry Blayac, Chantal Le Mouël, Alain Carpentier, Alexandre Gohin, Laurent Piet, Cathie Laroche-Dupraz, Philippe Barla, Jean Dubé, Markus Herrmann, Vincent Merlin, Franck Moraux and Elisabeth Viladecans-Marsal for their helpful comments and suggestions. I have a kind thought to Nicolas, Pierre, Eva, Ilias from the Barcelona Institute of Economics (IEB), Jordi, Francis from the Free University of Amsterdam, Ying Chen from London School of Economics and Mariona Segu from University of Paris-Sud for our numerous discussions about our different topics and our numerous informal moments shared during our conferences in urban economics.

Il y a eu une aventure associative avec PROJECT en tant que trésorier et président. Je souhaite remercier les doctorants du CREM et de SMART-LERECO pour leur confi-

ance et leur bonne volonté dans la réalisation des nombreux événements de notre riche vie doctorale. Je voudrais saluer les actions de Guillaume, Gabin, Nicolas, Clément, Gauthier, Xuan, May, Samuel, Ewen, Charles, Thao, Pascaline, Thibault, Ons, Malia, Kevin, Firdaws et Etienne. Mes derniers compagnons de route furent précieux et je voudrais féliciter Jimmy, Vincent, Enora pour leur implication, leur honnêteté, leur intégrité et leur dévouement. Je tiens également à adresser mes amitiés aux doctorants de l'association SIGMA de l'Institut de Gestion de Rennes, Youcef, Oumaïma, Baptiste, Olga, Nissreen, Arnaud, Zainab, Sirine et Eszter avec qui nous avons pu organiser un séminaire et deux tables rondes professionnelles de grande qualité. Je voudrais remercier plus particulièrement Oumaïma pour son professionnalisme, son sérieux et sa patience.

Dans cette aventure scientifique, je ne peux pas oublier ce fameux bureau 108 au CREM avec mes amis May Attallah et Guillaume Beaurain sans qui la thèse n'aura pas été ce qu'elle est aujourd'hui. Les soutiens mutuels dans les moments studieux, les succès scientifiques et les moments difficiles furent précieux. Pour cette solidarité de bureau, je les en remercie grandement. Entre le bureau 108 et le bureau 104, il s'est créé "4 walls". May Atef Aly Sayd Ahmed Attallah, Thi Thanh Xuan Tran et Ewen Gallic sont devenus des amis fidèles, sincères, bienveillants. Vivre cette aventure à vos côtés est inoubliable. Je souhaite également que notre amitié soit éternelle. J'aimerais vous remercier chacun pour tout ce que m'avez apporté sur tous les plans, vos soutiens, nos encouragements mutuels, notre folie mutuelle et votre générosité sans failles. J'ai une pensée pour mon amie Yu Zheng avec qui je partageais mon bureau à SMART-LERECO. Je te remercie pour ton calme, ta bienveillance, nos discussions en français et en anglais et nos talents de dessinateurs en cette fin de thèse. Une conférence est l'occasion de rencontrer de nombreux chercheurs mais aussi parfois de se faire une amie. J'ai une pensée particulière pour Ambre Nicolle, nos nombreuses discussions, notre désamour des tomates crues et ton énergie communicative.

Enfin et de tout mon coeur, je veux remercier ma famille: mes parents, Isabelle et Michel, mon frère, Olivier qui m'ont toujours fait confiance, soutenu et relu certaines parties de ma thèse. Je ne pourrais bien sûr pas oublier de remercier Zineb pour m'avoir soutenu, conseillé et encouragé pendant mes quatre années de thèse. Je tiens à remercier mes amis : Paul Le Padellec, Jimmy Merlet, Vincent Malardé, Enora Belz, Oumaïma Krita, Maëva Joubin-Robart, Thao Nguyen, Youcef Mechouar, Olga Pakulyak, Gauthier Vermandel, Julia Jouan, Lucile Henri, Francesco Guerra, Esther Devilliers et Yu Zheng sur lesquels j'ai toujours pu compter.

Contents

Remerciements	1
Contents	7
Résumé en français	9
General introduction	35
1 Motivation.	35
1.1 High congestion and pollution costs in urban areas across the globe.	36
1.2 Policies aiming to lower GHG emissions and congestion in urban areas.	40
1.3 Economic and environmental implications of different urban spatial structures.	42
2 Literature review.	44
2.1 Modeling the polycentric city.	44
2.2 Impact of anti-congestion policies on urban forms and environment.	47
3 Outline.	52
3.1 Chapter 1: Urban spatial structure, transport-related emissions and welfare.	52
3.2 Chapter 2: Efficiency of road pricing schemes with endogenous workplaces in polycentric city.	54
3.3 Chapter 3: Commuting and urban forms: case study of French municipality areas.	56
4 References	59
1 Urban spatial structure, transport-related emissions and welfare.	67
1 Introduction	68
2 A simple model	71
3 The monocentric city	74
4 The polycentric city	76
5 Discussion	83

5.1	Extending the city vertically	83
5.2	Endogenous wage	85
5.3	Role of modal choice and congestion	88
6	Conclusion	89
7	Appendix	95
2	Efficiency of road pricing schemes with endogenous workplaces in polycentric city.	101
1	Introduction	102
2	The model	106
2.1	The city	106
2.2	Households	107
2.3	Congestion costs and transport infrastructure	108
2.4	Urban toll	110
2.5	Wages	111
2.6	Welfare	112
3	The monocentric city	114
4	Decentralization of jobs and welfare	118
4.1	The polycentric city	118
4.2	Equilibrium allocation and optimal location of jobs	121
5	Polycentric city and road pricing schemes	126
6	Comparisons between road pricing schemes	131
6.1	Efficiency of the three road pricing schemes in the polycentric city	132
7	Discussion	135
7.1	Incidence of modal choice on congestion and urban structure	135
8	Conclusion	138
3	Mobilités pendulaires et formes urbaines: cas des aires urbaines françaises métropolitaines.	157
1	Introduction	159
2	Données sur les déplacements domicile-travail et les aires urbaines	162
2.1	Déplacements domicile-travail	162
2.2	La mesure des formes urbaines	166
2.3	Les variables de contrôle	169
3	Évolution des distances moyennes domicile-travail parcourues et formes urbaines	173
4	Temps de trajet à l'heure de pointe et formes urbaines en 2014	183
4.1	Influence de l'aire urbaine	183

4.2	Niveau communal	193
5	Conclusion	204
6	Annexe	211
General conclusion		217
List of tables		220
List of figures		224

Résumé en français

Depuis 2007, la population urbaine mondiale est supérieure à la population rurale. Elle s'élevait à 4 milliards de personnes en 2014 (ONU, 2014). Les villes sont actuellement confrontées à une croissance fulgurante, en particulier dans les économies en développement comme la Chine, l'Inde et le Nigeria. Le nombre de villes "millionnaires" a été multipliée par six entre 1950 et 2010. En effet, 75 villes comptaient plus d'un million d'habitants en 1950 contre 449 en 2010 (Seto *et al.*, 2014). Parmi ces villes, 71 sont devenues des mégapoles¹, telles que Tokyo, Sao Paulo, Shanghai, Los Angeles et Manille ; 45 d'entre elles sont situées sur le continent asiatique, notamment en Inde et en Chine (ONU, 2014). La croissance urbaine est le résultat de l'exode rural dans ces pays. Les gens se rassemblent dans les zones urbaines, mais un tiers d'entre eux vivent dans des bidonvilles pour deux raisons principales. Les villes en développement ne construisent pas autant de logements que nécessaire, et les droits de propriété foncière ne sont pas clairement définis, ce qui se traduit par l'expansion des bidonvilles. Dans les pays développés, les économies d'agglomération ont favorisé l'urbanisation des villes occidentales depuis le début de la révolution industrielle au XIXe siècle. Les entreprises et les travailleurs bénéficient de meilleures conditions salariales et d'une meilleure diffusion des idées et des innovations au sein des villes (Glaeser, 2012).

Cependant, l'urbanisation croissante présente des inconvénients majeurs tels que la pollution atmosphérique, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et les externalités de la congestion dues au transport dans les villes adaptées aux automobiles ; ces inconvénients surviennent malgré les avantages des économies d'agglomération (Fujita et Thisse, 2013 ; Kahn, 2010). En France, les villes ont été conçues pour être adaptées aux voitures particulières depuis la mise en œuvre des politiques de transport urbain sous le mandat de Georges Pompidou à la fin des années 1960 (Mirabel et Raymond, 2013). Les effets néfastes sur l'environnement, les problèmes de congestion urbaine et l'utilisation accrue des terres agricoles (depuis les années 1980) remettent en question le paradigme de la ville conçue pour l'automobile (Cavailhès, 2015). De plus, certaines études prévoient

¹Les mégapoles sont les coeurs urbains généralement peuplés de plus de 5 millions d'habitants.

une augmentation significative du coût de ces externalités négatives de l'urbanisation au cours des 10 prochaines années. Par exemple, les coûts directs de la congestion (valeur du carburant et du temps perdu) pour l'ensemble des ménages parisiens devraient passer de 6,2 milliards à 10 milliards de dollars entre 2013 et 2030 (CEBR, 2014). Les villes expérimentent et mettent en œuvre des politiques pour réduire ces effets négatifs et les rendre plus attrayantes. De nouvelles voies routières sont construites, la disponibilité et la fiabilité des transports en commun sont améliorés et la mise en place de péages urbains est évoqué. L'opposition politique à l'introduction de taxes empêche les villes de réduire leurs émissions provenant de la circulation et l'utilisation de la voiture comme principal moyen de transport pour se rendre au travail. Les formes urbaines peuvent jouer un rôle clé concernant ces conséquences négatives. Le développement des villes polycentriques est récent et peut être une stratégie pour réduire la pollution et les embouteillages (Storper, 2013 ; Gagné *et al.*, 2012).

Tout d'abord, nous soulignons les problèmes économiques et environnementaux causés par l'utilisation croissante des véhicules particuliers dans les zones urbaines, la congestion et la pollution qui en résultent en raison d'une utilisation plus intensive des infrastructures routières. Deuxièmement, nous nous concentrons sur le rôle joué par les différentes structures urbaines et le choix modal afin de déterminer leurs impacts sur l'évolution des émissions de GES et la congestion routière. Ensuite, nous évaluons les politiques urbaines visant à freiner ces externalités négatives. Enfin, nous décrivons notre méthodologie de modélisation des villes et nos trois chapitres sont résumés.

Les coûts élevés de la congestion et de la pollution en zones urbaines.

Aujourd'hui, 10 millions de déplacements ont lieu chaque jour dans les zones urbaines. La congestion de la circulation est un problème pour les grandes agglomérations dans le monde entier. La congestion des routes urbaines survient principalement pendant les heures de pointe des trajets domicile-travail. Comme les activités économiques sont concentrées dans l'espace en raison des économies d'agglomération, les travailleurs résident dans les villes près de leur lieu de travail. Ces économies dépendent de l'arbitrage traditionnel entre les économies d'échelle et les coûts de transport (Brueckner, 2011). Les coûts de congestion sont importants car les ménages et les entreprises perdent du temps et du carburant. Ces dernières perdent à la fois de la productivité et de l'efficacité en raison de leur emplacement et de leur secteur d'activité, si leurs travailleurs arrivent en retard au travail. En outre, les

entreprises de logistique souffrent des retards de livraison dus à des temps de déplacements supplémentaires au sein des villes.

Les coûts de congestion. Les coûts économiques de la congestion sont relativement élevés. Les propriétaires de véhicules ont des coûts directs liés à l'achat, à l'entretien, à la dépréciation de la valeur, à la consommation de carburant et au stationnement. En outre, il y a des coûts indirects, tels que les coûts de congestion, qui se mesurent en temps et en carburant gaspillés dans les embouteillages. En 2001, les Américains passaient en moyenne 161 minutes par jour dans un véhicule privé (Duranton et Turner, 2011). Il y a eu une diminution du temps de déplacement en raison de la crise économique de 2011 à 2013 (CEBR, 2014). Toutefois, l'activité économique s'est redressée et les villes américaines restent parmi les plus congestionnées du monde. Par exemple, un navetteur vivant à Los Angeles passe 102 minutes par jour dans le trafic aux heures de pointe (Cookson, 2018). En France, 37,2 millions de véhicules étaient en circulation selon l'enquête "Transport et déplacements 2008" (CGDD, 2010). Le temps de trajet quotidien a atteint 56,4 minutes en France en 2008 (CGDD, 2010). La distance parcourue par chaque Français (actif et mobile) a augmenté de 8 kilomètres entre 1982 et 2008, soit une augmentation de 45% en 26 ans. Dans une région densément peuplée comme Paris, les temps de trajet domicile-travail ont duré 75 minutes en moyenne en 2008, malgré le fait que les distances parcourues soient plus courtes qu'en 1982. Les navetteurs de Paris ont perdu 55 heures en moyenne dans la circulation pour leurs déplacements domicile-travail en 2013 (CEBR, 2014). On observe l'écart entre les temps de trajet pour les déplacements professionnels en heures de pointe et creuse pour la ville de Lyon en 2014. Les temps de trajet augmentent avec la distance par rapport au centre des affaires principal. Les temps de trajet en heures de pointe sont plus longs qu'en heures creuses. Un conducteur passe 26 minutes pour un aller-retour moyen aux heures creuses, alors qu'il lui faut 32,4 minutes aux heures de pointe. Cela représente une augmentation de 25% en moyenne. De plus, les embouteillages induisent des émissions de dioxyde de carbone provenant de la circulation au ralenti des véhicules.

Les coûts de la pollution. La croissance des émissions de GES dans le secteur des transports est due à l'utilisation croissante de véhicules privés et à la baisse des densités dans les zones urbaines depuis le milieu des années 1950 (OCDE 2014a). Plus d'un milliard de véhicules à moteur (voitures particulières, bus et camions) circulent depuis 2010 dans le monde, et la demande de véhicules particuliers, induits par les pays émergents, va

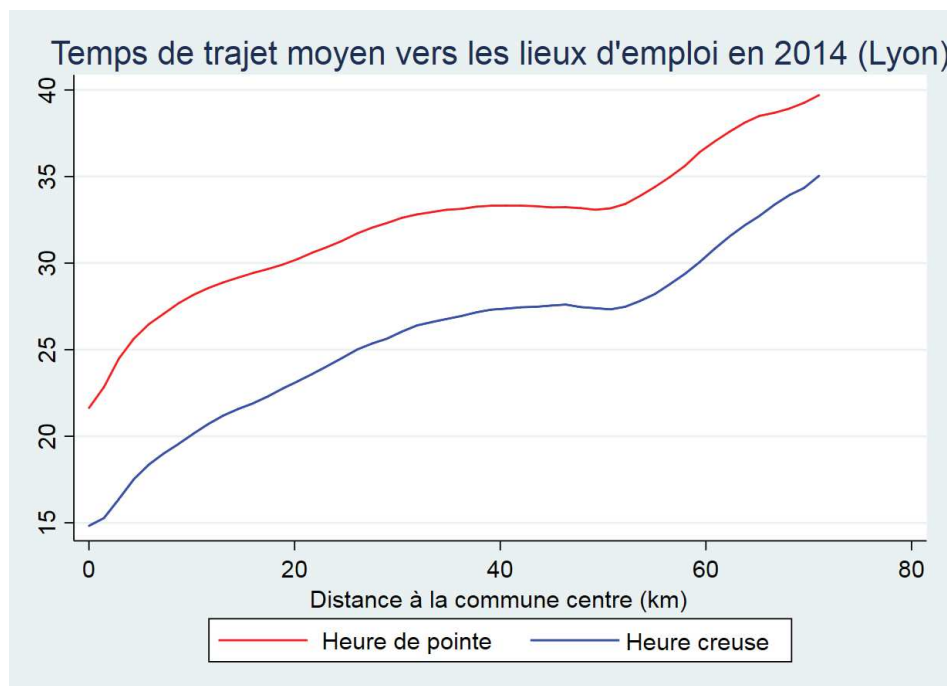


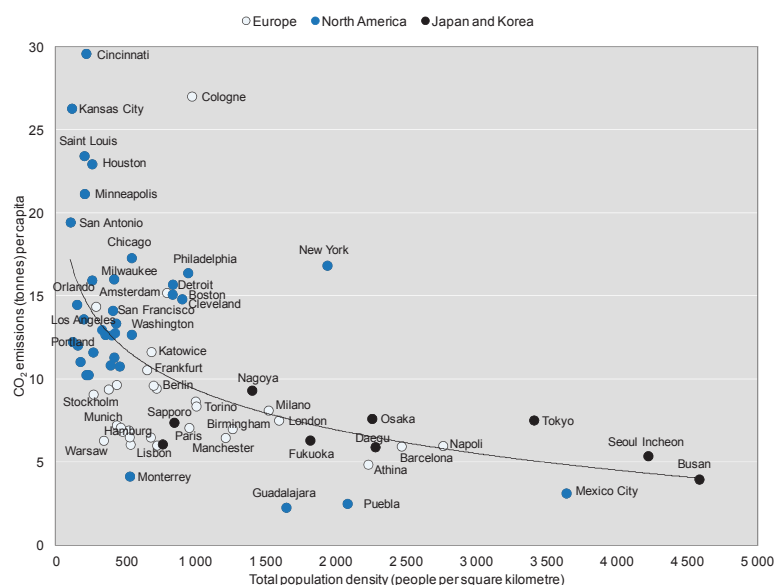
Figure 1: Temps de trajet en heures creuse et de pointe (minutes) par communes de l'aire urbaine en fonction de la distance à la commune centre en 2014.

augmenter dans le futur (Rode *et al.*, 2014). Selon un scénario de statu quo, 800 millions de véhicules supplémentaires viendront compléter le parc automobile mondial d'ici 2050 (PNUE, 2011). Les scientifiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'énergie et l'évolution du climat (GIEC) prévoient un doublement des émissions de GES d'ici 2050. Cette augmentation est principalement due à l'urbanisation rapide des pays émergents et en développement (ONU, 2014)² Aujourd'hui, l'Afrique et l'Asie sont les principaux continents touchés par cette urbanisation rapide, en particulier l'Inde, la Chine et le Nigeria (ONU, 2014). Les transports sont responsables du quart des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) dans la consommation d'énergie de tous les secteurs. Nous prenons principalement en compte le CO_2 parce que ce gaz contribue le plus à l'effet de serre, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2012). De plus, la demande globale d'énergie provenant du secteur des transports augmentera en moyenne de 1,3% par année d'ici 2035. Cette pollution résulte de l'utilisation accrue de la voiture particulière qui affecte les mégapoles dans les pays émergents (AIE, 2012). Les effets sur la santé sont drama-

²Le taux d'urbanisation, mesuré par le nombre d'habitants vivant en ville, était similaire en 1990 au Brésil et aux États-Unis. Cependant, il a fallu 30 ans au Brésil pour atteindre ce taux, contrairement aux États-Unis, où il a fallu 90 ans (Henderson, 2002).

tiques. La pollution de l'air par divers gaz à effet de serre et particules fines provoque les décès prématurés de 3,2 millions de personnes par an (OCDE, 2014b). Les pays développés et en voie de développement sont affectés.

Les émissions de GES dépendent de la forme urbaine qui induit une distance maximale à parcourir entre les lieux de travail et les lieux d'habitation. Les émissions dépendent également du niveau d'activité dans les villes (mesuré en tonnes ou en passagers-kilomètres), l'énergie consommée par habitant et les carburants utilisés pour chaque mode de transport (Gwilliam, 2002). Pour réduire les émissions de GES, des politiques de densification devraient être mises en œuvre, car la densité de population semble être une variable clé (Zheng *et al.*, 2011 ; OCDE, 2012). Les villes à forte densité de population par kilomètre carré sont sujettes à des émissions de CO_2 moins élevées par habitant. De plus,



Note: Data unavailable for Australia, Chile, Israel and New Zealand.

Source: OECD (2012), *Redefining "Urban": A New Way to Measure Metropolitan Areas*, OECD Publishing, doi: 10.1787/9789264174108-en.

le graphique précédent suggère que les villes asiatiques sont plus "vertes" que les villes américaines conçues pour l'automobile en raison de (i) leur forte densité de population et (ii) l'utilisation des modes doux (vélo, marche, etc.) et des transports publics pour se rendre au travail (OCDE, 2012). Sur la base de ce constat, le modèle de la ville compacte stimule les débats entre économistes et les décideurs politiques urbains parce que ce modèle concilierait le développement économique et la durabilité des villes (OCDE, 2012 ; Newman et Kenworthy, 1989 ; Glaeser et Kahn, 2010). Les villes plus denses sont synonymes de proximité entre les entreprises, d'effets d'entraînement et des rende-

ments d'échelle croissants (Krugman, 1991). Henderson (2002) examine les avantages des économies d'agglomération dans les villes, qui ont été largement démontrées dans la littérature. Dans les grandes villes, les entreprises et les travailleurs gagnent plus grâce au regroupement, à la spécialisation, l'innovation et le processus de diffusion des connaissances (Henderson, 2002 ; Duranton et Puga, 2004 ; De la Roca et Puga, 2017, Puga, 2010). Cependant, les grandes villes induisent des coûts sociaux qui sapent la croissance économique. Les coûts fonciers dans le centre principal d'affaires d'une ville " monocentrique " force les ménages à s'installer plus loin, ce qui conduit à l'étalement urbain.

L'étalement urbain est un facteur clé concernant les externalités de congestion et de pollution. L'accent devrait être mis sur les relations existantes entre les organisations spatiales et les flux de transport (Rode *et al.*, 2014). La croissance urbaine s'est accélérée au cours des 50 dernières années et a entraîné une consommation massive de terres agricoles (OCDE 2014a ; Cavailhès *et al.*, 2015). Simultanément, ces villes existantes ont commencé à s'étendre en observant une diminution de leur densité de population (Angel *et al.*, 2011). L'absence d'une gouvernance et d'un contrôle solides en matière de planification urbaine ont favorisé ce phénomène (Henderson, 2002). Entre la fin des années 1990 et le milieu des années 2000, la croissance des zones urbaines a été plus que proportionnelle à la croissance démographique des villes. Par exemple, entre 1990 et 2015 en Chine, les zones bâties ont quadruplé, tandis que la population urbaine a presque triplé (Chen, 2018). Le développement des centres dorts et des banlieues est le résultat de nombreux facteurs socio-économiques (aménagement du territoire, zones commerciales périphériques, coûts de transport, espace de vie disponible par habitant, etc.). Par conséquent, l'étalement urbain implique des distances parcourues plus longues vers les lieux de travail et une plus grande dépendance à l'égard de l'utilisation de la voiture particulière pour les ménages vivant dans des zones à faible densité (Hubert *et al.*, 2016 ; Pouyanne, 2007 ; Breheny, 1995).

L'absence de prise en compte des externalités négatives (congestion, pollution, accidents, problèmes de santé,) a favorisé l'étalement urbain. Ce phénomène affecte les villes asiatiques, notamment en Chine et en Inde, en raison d'une planification ou d'une réglementation fixant une limite de taille des logements en milieu urbain (Rode *et al.*, 2014 ; Bertaud et Brueckner, 2005 ; Borck, 2016). En outre, certaines villes comme Londres ou Hambourg ont choisi de se redensifier (Floater *et al.*, 2013). Il y a une augmentation des investissements dans les transports publics dans le monde entier et de la part modale du système de transport en commun a augmenté dans certains pays de l'OCDE (Sims *et al.*, 2014). Ces changements sont principalement le résultat d'une volonté politique et d'une exigence

citoyenne d'une meilleure qualité de vie qui vont au-delà des considérations économiques.

Par conséquent, les coûts urbains sont un problème que chaque ville doit résoudre pour rester attrayante et réduire leur empreinte carbone. De toute évidence, la volonté politique est importante en ce qui concerne les politiques de transports urbains (Chen, 2018). Différentes politiques existent et ont été mises en œuvre dans le passé. Nous passerons en revue ces politiques urbaines et évalueront leur efficacité en mentionnant que peu d'études se sont concentrées sur les impacts de ces politiques urbaines dans les villes polycentriques.

Politiques visant à faire baisser les émissions de GES et la congestion en zones urbaines.

Les politiques urbaines peuvent réduire efficacement les émissions de GES en mobilisant de nombreux acteurs tels que les collectivités locales, régionales et les autorités publiques nationales (OCDE, 2014a). Le développement de villes compactes offrant des services de transport en commun efficaces et l'amélioration des infrastructures liées aux modes doux (c.-à-d. non motorisés) de transport est promu par le GIEC. En effet, plus la part des modes de transport utilisant moins de carbone dans les déplacements de personnes et de marchandises est élevée, plus les émissions de CO_2 par habitant sont faibles (Bongardt *et al.*, 2013). Une combinaison de politiques foncières et de planification urbaine orientées vers un espace limité pour la voiture particulière et une proximité entre sites résidentiels et commerciaux permet de réduire l'empreinte carbone d'une ville (Suzuki *et al.*, 2013). Les politiques de gestion de la congestion par les péages ne sont appliquées que dans quelques villes du monde (Londres, Singapour, Stockholm, Trondheim, Oslo, etc.) comme le soulignent Fosgerau et De Palma (2013). Les préoccupations politiques et le coût électoral d'initiatives impopulaires expliquent cette absence de mise en œuvre de la fiscalité routière (Fosgerau et De Palma, 2013).

Taxation. La fiscalité (positive ou négative)³ est un moyen à la disposition des membres d'un conseil municipal pour atteindre des objectifs de durabilité urbaine. Elle permet de modifier le comportement des consommateurs en les influençant afin d'acheter et/ou d'utiliser des modes de transport vertueux. Une taxe sur les émissions de carbone ou un péage urbain visent à faire payer les externalités négatives (congestion, accidents, pollution de l'air, etc.) qui proviennent de l'achat de véhicules qui ne respectent pas certaines

³Une réduction d'impôt ou une subvention de l'État est considérée comme une fiscalité positive puisqu'un agent économique est récompensé par un changement de comportement. Inversement, le paiement d'un impôt ou d'une taxe fait partie de l'imposition négative.

normes environnementales par des personnes qui les imposent à la collectivité. Toutefois, cette stratégie reste inefficace si la taxe ne correspond pas au coût marginal induit comme dans le cas des taxes sur les carburants (Rode *et al.*, 2014). La mise en œuvre de systèmes de tarification de la congestion est souvent préconisée comme une solution pour internaliser les coûts sociaux du transport (GAO, 2012 ; Eliasson et Mattsson, 2006). Ces péages de congestion ont deux objectifs : (i) réduire la quantité d'effets externes négatifs (congestion, pollution, émissions de gaz à effet de serre), et (ii) fournir des ressources financières afin de développer une offre alternative de transport public. Singapour, Oslo, Stockholm et Londres ont mis en place des péages urbains et mènent des politiques de lutte contre la congestion. En outre, les transports publics sont encouragés et la qualité de service est améliorée.

Depuis l'introduction d'un péage urbain à Londres en 2003, le trafic a diminué dans la zone où les navetteurs paient une taxe (Santos, 2005). Les recettes de péage ont été utilisées pour financer l'amélioration du système de transport public (fréquence, entretien, etc.). La Norvège a mis en place des péages de cordon à Trondheim, Oslo et Bergen, par exemple. Ce système a également permis de réduire le trafic dans les centres-villes mais aussi financer des infrastructures à forte capitalisation telles que les tunnels et les ponts. Singapour est une ville-État qui a mis en place son péage urbain en 1975 pour gérer la fluidité du trafic tout en favorisant les transports en commun, le covoiturage et les modes de transport doux (p. ex., le vélo et la marche). Le système ERP de Singapour est un système de péage variant dans le temps qui fait payer les navetteurs davantage pendant les heures de pointe le matin (7-8h) et en fin d'après-midi (18 h). Ces politiques de péage urbain sont rares et permettent de réduire les flux de trafic et les émissions de CO_2 dans les zones concernées (Fosgerau et De Palma, 2013). Cependant, elles ont des effets pervers tels que le report de la congestion vers d'autres routes sans péages (Santos, 2005). En outre, l'augmentation du prix des logements dans les zones taxées a une incidence sur le bien-être des locataires vivant dans ces secteurs (Tikoudis *et al.*, 2015 ; Segal et Steinmeier, 1980). L'allocation spatiale des emplois et des ménages n'est pas optimale à court terme pour des localisations données lorsque les taxes sont appliquées. Les ajustements des emplacements des entreprises et des ménages à long terme doivent être pris en compte pour évaluer l'efficacité de ces politiques.

La mise en œuvre des péages urbains est un défi, comme à Stockholm (Eliasson et Mattsson, 2006). La future loi française sur la mobilité prévoit que chaque ville française de plus de 100 000 habitants peut mettre en place un péage urbain. À ce stade, les autorités locales ne peuvent les imposer qu'à titre expérimental pour une période maximale de trois

ans. Aucune expérience n'a été menée en France. Des alternatives telles que des politiques visant à accroître la densité de la population dans les zones urbaines sont souvent moins controversées.

Les impacts des politiques urbaines de densification. Rode *et al.*, (2014) montrent que la densité urbaine (population/hectare) est une variable critique lorsqu'il s'agit de réduire les investissements dans l'infrastructure routière et d'autres services pour l'habitat (eau, assainissement, etc.). Une ville dense et clairsemée, offrant un bon service de transport public nécessite moins d'investissements dans des infrastructures. L'offre de transports publics est plus efficace en termes de coûts d'exploitation dans les zones urbaines denses. Par exemple, les communes françaises les plus denses couvrent 3,5% du territoire ; elles représentent la moitié de la population totale d'une région résidentielle moyenne de 1 000 habitants au kilomètre carré en 2008 (CGDD, 2010). Par conséquent, ce niveau de densité est un marché potentiel pour un système de transport en commun efficace. Inversement, une ville faiblement peuplée accroît le besoin d'infrastructures routières et de fourniture de services sur de plus grandes superficies. En outre, la dépense de carburant par habitant est plus élevée dans une ville dispersée que dans une ville compacte (Houston vs Copenhague, voir Laconte, 2005). Duranton et Turner (2017) et Blaudin de Thé *et al.* (2018) démontrent qu'une augmentation de la densité de population est associée à une diminution de la consommation de carburant et du nombre de véhicules-kilomètres parcourus dans les zones urbaines.

Les restrictions relatives à la taille et à la densité des bâtiments peuvent avoir des effets négatifs tels que de l'étalement urbain, qui induit une diminution de l'offre de surface au sol (Rode *et al.*, 2014). En effet, les politiques qui limitent la hauteur des constructions créent de l'étalement urbain en augmentant le prix des terrains dans la zone de restriction (Bertaud et Brueckner, 2005). La densité de la population diminue près du centre-ville et augmente en périphérie. Il en résulte une augmentation des distances moyennes entre le domicile et le lieu de travail dans le cas d'une ville monocentrique et des émissions associées à ces déplacements. Ces émissions peuvent même être amplifiées dans le cas des choix modaux non vertueux selon Borck (2016). Cette politique a également des effets ambigus sur les émissions de GES provenant des zones résidentielles (Borck, 2016). Un changement judicieux dans la planification urbaine peut être une solution de rechange aux politiques de taxation et de densification afin de réduire les effets externes de la congestion et les émissions de CO_2 .

Répercussions économiques et environnementales des différentes formes urbaines.

Les villes compactes rapprochent physiquement les gens de leur lieu de travail et de leurs activités économiques créant des économies d'agglomération (Fujita et Thisse, 2013). Cependant, des externalités négatives de congestion et de pollution existent dans les zones urbaines et peuvent réduire l'intérêt des politiques de densification. Le niveau d'infrastructure dédiée aux transports publics est en concurrence avec l'espace utilisé par les véhicules privés. Dans une étude portant sur plusieurs villes du monde (p. ex. Londres, Los Angeles et Hong Kong), Newman et Kenworthy (1989) démontrent une relation négative entre le niveau de densité de population et l'énergie utilisée provenant des flux de transport. En effet, l'utilisation de modes de transport à faibles émissions (vélo, Les transports publics, la marche à pied) a augmenté dans les zones à forte densité de population (CGDD, 2010).

Les villes étalées aux fonctions urbaines dispersées, comme Houston ou Los Angeles, rendent tacitement obligatoire d'être propriétaire de véhicules privés. Ce besoin s'explique aussi par le faible coût du transport pour se rendre au travail en voiture (Glaeser et Kahn, 2004). Ainsi, l'espace urbain des centres centraux d'affaires est occupé principalement par les places de stationnement (Manville et Shoup, 2004). En outre, une augmentation des investissements dans les infrastructures routières permettant la construction de nouvelles voies de circulation dans les zones urbaines conduit à un déplacement des citoyens vers les périphéries des aires métropolitaines (Baum-Snow, 2007). Ces effets doivent être pris en compte par les planificateurs urbains car cette infrastructure est construite pour durer, alors que les délocalisations d'emplois et de ménages peuvent être plus rapides. Par conséquent, les décisions d'aménagement du territoire doivent être analysées au regard des systèmes de transport au sein d'une structure spatiale urbaine.

La décentralisation des emplois dans les villes monocentriques a des effets ambigus sur les distances moyennes parcourues et les temps de déplacement domicile-travail. Plusieurs études montrent que la localisation des emplois dans des centres d'affaires secondaires réduit les distances et les déplacements par rapport au regroupement des activités économiques prédominantes (Giuliano et Small, 1993 ; Veneri, 2010 ; Alpkokin *et al.*, 2008). En Allemagne, Gutz *et al.* (2009) comparent les villes de Francfort et de Stuttgart, qui ont une forme polycentrique, avec Munich et Hambourg, qui sont monocentriques. Les auteurs observent des distances parcourues plus courtes pour les navetteurs vivant à Francfort et à Stuttgart. Cependant, des effets opposés sont également observés (Naess et Sandberg,

1996). La dispersion des emplois a entraîné des problèmes de mauvais appariement entre lieux d'emplois et résidentiels dans les villes de Paris, Lyon et Marseille de 1990 à 1999, augmentant les distances moyennes parcourues (Aguiléra, 2005). En outre, les mesures progressives de décentralisation des emplois de 1986 à 1996 à Barcelone a également entraîné une augmentation des distances entre le domicile et le lieu de travail ; les emplois ont été délocalisés dans des zones à faible densité de population. Les chercheurs ont constaté l'absence d'une politique régionale pour le développement de l'habitat résidentiel et une forte dépendance à l'égard de la voiture a conduit à ce résultat (Muñiz et Galindo, 2005).

Plusieurs économistes urbains considèrent les coûts de transport exogènes dans la structure spatiale des villes, quoique potentiellement négligeable. En outre, le coût de la congestion est supposé être fixe par unité de distance (Lucas et Rossi-Hansberg, 2002 ; Gaigné *et al.*, 2012). Par conséquent, il n'y a pas de concurrence sur le marché foncier entre le réseau routier et l'utilisation des terres à des fins commerciales et résidentielles. Il serait utile d'étudier les structures spatiales urbaines en tenant en compte des coûts de transport en fonction des localisations et des embouteillages et de mettre en œuvre les politiques disponibles pour relever ces défis dans le cadre d'une ville possédant plusieurs centres d'emplois.

Modéliser la ville polycentrique.

Deux principaux modèles polaires existent en ce qui concerne la structure spatiale urbaine : le modèle monocentrique et le modèle polycentrique⁴ Une ville est désignée comme monocentrique ou polycentrique en fonction du nombre de centres d'affaires. Dans ces centres, seules les entreprises utilisent les terrains et attirent tous les travailleurs de la ville (Fujita et Thisse, 2013). Les données empiriques suggèrent que les entreprises n'ont peut-être pas l'usage exclusif du terrain à leur emplacement. Une utilisation mixte des sols est observée dans certaines villes américaines, mais cette tendance nécessite un examen plus approfondi en raison de l'interaction peu claire entre les temps de déplacement et la dispersion de l'emploi (Wheaton, 2004). En tout état de cause, les entreprises sont incitées à s'implanter plus près les unes des autres, ce qui génère des rendements croissants et des économies d'agglomération (externes et internes). Toutefois, le regroupement d'entreprises dans un centre des affaires entraîne des loyers fonciers élevés à proximité de cet emplacement et des coûts de transport élevés pour les travailleurs. Les particuliers utilisent les voies urbaines pour se rendre au centre des affaires principal (Solow, 1972, 1973). Certains

⁴voir Fujita et Thisse (2013) pour une discussion plus détaillée sur tous les modèles sous-jacents de villes monocentriques et polycentriques existants dans la littérature.

modèles intègrent des déplacements de loisirs et de shopping comme Anas et Kim (1996).

En résumé, le foncier urbain est principalement consacré à des usages résidentiels, commerciaux, d'agrément et de transport. Les deux premiers sont communément intégrés dans des modèles économiques urbains selon des formulations diverses. L'utilisation du sol dans un centre d'affaires principal peut être attribué exclusivement aux entreprises (Larson et Yezer, 2015) ou mixte (Fujita et Ogawa, 1982). Il y a donc une concurrence sur un marché foncier entre les entreprises et les ménages. De puissants modèles économiques urbains émergent avec les travaux fondateurs d'Alonso (1964), Mills (1967) et Muth (1969) parce qu'ils reflètent ce que nous observons dans les villes européennes et américaines (Brueckner, 2011). Les choix résidentiels des ménages dépendent d'un arbitrage entre le coût de location d'un logement et les coûts de transport. Le fait de vivre plus loin de son lieu de travail entraîne des coûts de transport élevés, qui sont contrebalancés par des coûts de logement moins élevés. Les ménages enchérissent pour des lots dont la taille est mesurée en mètres carrés. Ces lots sont disponibles à chaque unité de distance. (voir Figure 2). La surface habitable est souvent l'unique caractéristique des logements. Les prix des loyers

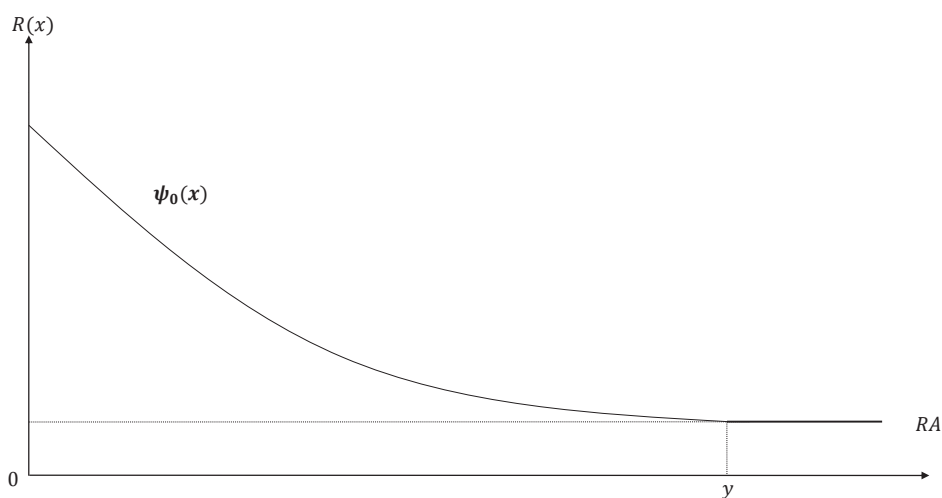


Figure 2: Enveloppe supérieure des enchères foncières à l'équilibre et localisation du centre central d'affaires $x = 0$, et limite y de la ville monocentrique (Solow, 1972).

proposés sont plus élevés près du centre-ville qu'en périphérie. La rente foncière d'équilibre est égale à l'enchère foncière la plus élevée à chaque emplacement et représente l'enveloppe supérieure du processus de mise aux enchères (Figure 2). Étant donné que les enchères foncières décroissent avec la distance au centre, cela entraîne une augmentation de la consommation de logements. Autrement, il n'y aurait pas d'incitation à vivre plus loin du

centre principal d'affaires. Par conséquent, la densité résidentielle diminue par rapport à la distance au centre des affaires, car les ménages ont besoin de plus d'espace lorsque la rente foncière devient moins chère. Une nouvelle forme urbaine est apparue au fur et à mesure que les grandes métropoles se développaient. Les entreprises bénéficient des technologies de l'information et de la communication moins coûteuses pour faire évoluer leur structure industrielle. Ils ont changé le lieu de leurs fonctions économiques. Le siège social est centralisé. Les usines et les entrepôts sont décentralisés en périphérie des villes (Fujita et Thisse, 2013). Il devient donc utile de reconsidérer le modèle de base et d'évaluer les politiques économiques et environnementales dans une ville polycentrique. Nous utilisons un modèle avec des mécanismes similaires à ceux d'une ville monocentrique. Les enchères foncières diminuent par rapport au centre et augmentent de nouveau près des centres secondaires. Enfin, ils diminuent de l'emplacement des centres secondaires jusqu'à la limite de la ville (Figure 3).

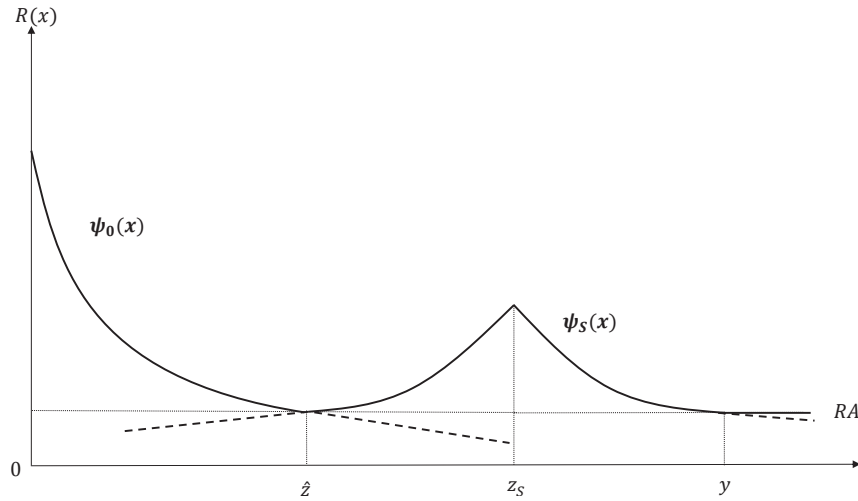


Figure 3: Enveloppe supérieure des enchères foncières à l'équilibre et localisation du centre principal d'affaires $x = 0$, d'un centre secondaire z_S et de la limite y de la ville polycentrique (auteur).

Il y a une prime salariale dans le centre principal. En effet, les services aux entreprises et les emplois hautement qualifiés y sont localisés alors que les centres secondaires concentrent les emplois moyennement spécialisés. Notre modèle est une ville linéaire où les entreprises ne se disputent pas les terres et sont situées dans des centres d'affaires. Les lignes radiales m partagent le même point initial ($x = 0$) qui est le centre d'affaires principal. L'emplacement des centres secondaires sont déterminés de façon endogène à l'équilibre comme dans Cavailhès *et al.*, (2007), Gagné *et al.*, (2012) et Lucas et Rossi-

Hansberg (2002). Notre analyse porte principalement sur l'évolution des émissions de CO_2 provenant des flux de transport et la gestion de la congestion dans une ville fermée avec une forme urbaine changeante. Les systèmes urbains de plusieurs villes ne sont pas pris en compte.

Approche Marshallienne. Dans notre modèle, les entreprises n'utilisent pas d'espace et ne font pas concurrence aux ménages pour louer des terrains. Cependant, nous ne négligeons pas les externalités marshalliennes qui favorisent les économies d'agglomération (Fujita et Thisse, 2013). Notre ville est le résultat de forces socio-économiques qui ont donné lieu à une concentration d'entreprises dans un centre d'affaires. En outre, notre ville monocentrique de base peut se transformer en une ville polycentrique, tandis que le centre d'affaires reste le plus attractif comme lieu de travail grâce à une prime salariale. Tous les ménages travaillent et se rendent dans les centres d'affaires. Dans un modèle monocentrique, tous les habitants sont identiques et partagent le même niveau d'utilité, mais les paniers de consommation diffèrent (Brueckner, 1987). Conformément au modèle précurseur de Von Thünen pour les agriculteurs qui vendaient leurs récoltes sur un marché central et développé par Alonso, Muth et Mills, chaque agent économique est confronté à un arbitrage entre la rente foncière et les coûts de transport (Fujita et Thisse, 2013). Dans les modèles théoriques, les centres d'affaires sont souvent entourés de zones résidentielles occupées par des travailleurs qui sont libres de choisir leur lieu de résidence et le lieu de travail en fonction de leurs contraintes budgétaires (Fujita et Thisse, 2013). À l'équilibre, on obtient une utilité indirecte pour chaque travailleur qui n'est pas incité à déménager dans la ville ($\frac{\partial V}{\partial x} = 0$). Par conséquent, les travailleurs partagent le même niveau d'utilité, peu importe où ils se trouvent. Sans perte de généralité, nous supposons qu'il n'y a pas de chômage et que les travailleurs ne réagissent pas à un changement des coûts de transport en quittant leur emploi. En outre, nous avons délibérément mis de côté la littérature qui inclut les aménités et nous avons mis en évidence celle qui couvre l'utilisation des infrastructures routières et les embouteillages à l'intérieur des villes.

Les externalités négatives. Dans un cadre théorique parfait d'un marché donné en concurrence pure et parfaite, tous les agents sont rationnels. Par conséquent, un optimum de Pareto est atteint lorsque le bien-être d'un individu ne peut être augmenté sans réduire celui d'un autre agent. L'application de ces principes au secteur des transports dans les villes où l'automobile est le mode de transport le plus utilisé ne correspond pas à la réalité. Nous savons que le manque de coordination entre les agents conduit à un marché imparfait. En outre, des défaillances de marché sont observées bien que la littérature se soit principalement concentrée sur les avantages liées aux économies d'agglomération

(Fujita et Thisse, 2013 ; Brueckner, 2011). L'utilisation quotidienne de la voiture dans les villes entraîne des externalités négatives telles que la pollution atmosphérique, le bruit, les accidents de la route et la congestion (Mirabel et Raymond, 2013). Une route est congestionnée lorsqu'un agent impose un déplacement supplémentaire sur le réseau, ce qui augmente le temps et les frais de retard pour les autres navetteurs. Différents outils existent pour gérer la congestion et la pollution dans les villes tels que les péages urbains, les zones à faibles émissions, les limites urbaines, la gestion des parkings, les transports publics, les investissements et la réglementation de l'utilisation du sol tels que les limites de densité (zonage de la taille minimale des lots), les limites de hauteur et les ceintures vertes (Small et Verhoef, 2007 ; Brueckner, 2011).

Par conséquent, leur rentabilité économique et l'efficacité environnementale doivent être évalués et nous devons déterminer leurs impacts sur les formes urbaines (de développement durable des villes). Nous passons en revue les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse. Les trois chapitres sont décrits et nous concluons.

Chapitre 1: Structure spatiale urbaine, émissions liées au transport et bien-être.

Dans ce premier chapitre théorique⁵, nous avons étudié les impacts de la structure spatiale urbaine sur les émissions de CO_2 provenant des flux de transport et sur le bien-être des ménages. Pour ce faire, nous avons construit un modèle théorique d'une ville monocentrique et d'une ville polycentrique avec des lieux de travail endogènes. Dans le cadre de ces structures, le choix de l'emplacement des ménages et leur demande de logement sont déterminés de manière endogène. Tout d'abord, nous analysons les changements d'émissions de CO_2 et de bien-être lorsqu'une ville monocentrique se transforme en ville polycentrique avec des centres d'affaires secondaires endogènes. Deuxièmement, nous évaluons nos résultats en élargissant notre modèle avec une offre de logements plus importante dans le centre central des affaires par rapport aux centres secondaires et en permettant la détermination endogène des salaires au sein de chaque centre d'affaires.

Notre chapitre est lié à des travaux théoriques antérieurs qui ont étudié le développement des zones d'activité secondaire dans les villes (Cavallès *et al.*, 2007). Floater *et al.*, (2014) et Burgalassi et Luzzati (2015) indiquent que les impacts environnementaux de l'urbanisation dépendent des formes urbaines (conception, densité, etc.). Des études antérieures ont mis en lumière les avantages de la ville polycentrique en tant que structure spatiale qui diminuerait la distance totale parcourue par les travailleurs et atténuerait la pollution urbaine (Gaigné *et al.*, 2012 ; Legras et Cavallès, 2016). Cependant, la littérature n'évalue pas l'impact d'une décentralisation des emplois sur les émissions de CO_2 lorsque la taille des logements est endogène. En outre, l'émergence de villes polycentriques est microfondée lorsque la taille du logement réagit à un changement du lieu de travail (Fujita et Ogawa, 1982) ; Anas et Kim, 1996 ; Lucas et Rossi-Hansberg, 2002). Toutefois, ces auteurs n'ont pas abordé une question importante liée à l'impact de la décentralisation des emplois sur la pollution liée aux transports et sur le bien-être des personnes quand la taille des logements s'ajuste. Par conséquent, nous développons notre modèle pour inclure à la fois la demande endogène de logements et la décentralisation des emplois.

Nous constatons que la décentralisation des emplois à l'intérieur des villes n'est pas nécessairement "la" stratégie pour réduire les émissions liées aux transports et améliorer le bien-être. Notre analyse repose sur les éléments d'arbitrage suivants. D'une part, pour une

⁵Ce chapitre est associé à un article de recherche original (Denant-Boemont *et al.*, 2018), publié dans le *Journal of Environmental Economics and Management*.

densité de population donnée, la distance moyenne parcourue par les travailleurs diminue lorsque la ville passe d'une structure monocentrique à une configuration polycentrique. Ainsi, pour une taille de logement donnée, la décentralisation des emplois dans les villes réduit les émissions de carbone en raccourcissant les trajets domicile-travail. Ceci est vrai tant que la frontière de la ville reste inchangée. D'autre part, la taille moyenne des logements augmenterait lorsque les emplois sont situés à la périphérie de la ville puisque le prix moyen des terres diminue. Par conséquent, la frontière de la ville s'élargit et s'éloigne du centre. La distance moyenne des trajets domicile-travail peut augmenter. L'augmentation de la demande de logements pourrait contrebalancer ainsi les effets positifs de l'émergence des centres d'affaires secondaires sur les distances à parcourir pour se rendre au travail et les émissions de carbone.

En effet, l'effet net de cette décentralisation sur le bien-être dépend des caractéristiques du réseau de transport au sein de la ville. Plus précisément, lorsque la taille des logements s'ajuste aux formes urbaines par un changement des rentes foncières, une ville polycentrique n'est pas souhaitable d'un point de vue économique et écologique lorsque la vitesse moyenne de déplacement et/ou le nombre de routes directement liés au centre-ville sont peu nombreux. Plus généralement, nos résultats montrent que l'évaluation de l'effet des politiques urbaines sur les émissions polluantes doit prendre en compte les ajustements à long terme de la taille des logements et de la densité de population.

Dans notre modèle, nous supposons que la densité de population et les rentes foncières diminuent avec la distance aux lieux d'emplois comme la demande de logements est endogène. Toutefois, nous ne savons pas si notre hypothèse est restrictive quand on étudie la relation entre la forme urbaine et la pollution liée au transport. Lorsque nous étendons la ville verticalement, nos résultats se maintiennent lorsque les salaires sont égaux entre les centres d'affaires des villes. Ensuite, nous testons nos résultats lorsque les salaires sont endogènes dans notre ville polycentrique. Nous considérons implicitement que le taux de salaire ne s'ajuste pas à un changement de la taille des marchés du travail. Toutefois, des changements peuvent survenir en raison d'une variation du nombre de personnes travaillant au centre d'affaires principal ou dans un centre secondaire. Dans le cas des salaires endogènes, l'écart entre les centres d'affaires augmente avec la taille du centre principal, de sorte que la relation entre la taille du centre principal et l'écart salarial reste négative. Par conséquent, même si les salaires réagissent à un changement de forme urbaine, nos principaux résultats se maintiennent. Notre analyse peut également expliquer pourquoi les effets de la décentralisation des emplois dans les aires métropolitaines polycentriques sur les formes de navettage diffèrent selon les études empiriques. Par exemple, Giuliano et

Small (1993) constatent que la décentralisation des emplois raccourcit les trajets domicile-travail, tandis qu'Aguilera (2005) montre que les villes polycentriques sont sources de plus longues distances domicile-travail que les villes monocentriques.

Nous montrons qu'une ville polycentrique est souhaitable du point de vue du bien-être et de l'écologie à condition que la vitesse de déplacement et/ou le nombre de routes directement reliées avec le centre ville sont suffisamment élevés. En effet, d'une part, une ville polycentrique procure des avantages directs grâce à la valeur des économies induites par les déplacements pour un emplacement résidentiel inchangé. D'autre part, un changement d'emplacement du lieu de travail a des répercussions sur les choix résidentiels, car les loyers fonciers diminuent en moyenne. Par conséquent, la demande de logements augmente ce qui étend la ville. Les flux pendulaires et les émissions liées au transport augmentent. Ces coûts indirects peuvent l'emporter sur les avantages directs dans des situations réalistes (Veneri, 2010). Dans l'ensemble, l'extension spatiale des villes reste la variable critique pour réduire la pollution urbaine liée aux transports.

Chapitre 2: Efficacité des systèmes de tarification routière avec des centres d'affaires endogènes en ville polycentrique.

Dans ce deuxième chapitre théorique, le modèle urbain s'appuie sur celui utilisé dans le premier chapitre afin d'étudier les impacts de trois systèmes de tarification routière (la taxe pigouvienne, le péage au cordon et la taxe forfaitaire) sur la taille du centre principal d'affaires lorsque deux externalités (congestion et agglomération) interagissent dans une ville polycentrique. La congestion routière est modélisée conformément aux travaux d'Arnott (2007), Verhoef (2005) et Tikoudis *et al.* (2015). Premièrement, les effets des systèmes de tarification routière sont évalués dans la ville monocentrique en tant que référence. Ensuite, nous mettons l'accent sur les changements de niveau de congestion lorsqu'il y a décentralisation des emplois. La taille du centre principal et des centres secondaires sont déterminés à l'équilibre ("Laissez-faire") et à l'optimum (un planificateur bienveillant maximise le bien-être des habitants). Enfin, nous étudions les impacts de nos trois systèmes de tarification routière dans une ville polycentrique sur le niveau de congestion, la taille du centre secondaire et sur le bien-être global. Nous discutons de la mise en place d'un deuxième mode de transport et de parkings dans le modèle urbain en relation avec les effets des taxes.

Les études antérieures ont souvent traité séparément les formes urbaines et la congestion de la circulation lorsque le modèle monocentrique a été utilisé dans des contextes théoriques. Un courant de littérature s'est penché sur la question de l'offre optimale de capacité routière dans les villes en utilisant le modèle monocentrique avec congestion routière (Solow, 1972, 1974). Ensuite, des modèles de villes monocentriques ont été étudiés concernant l'internalisation d'une ou deux externalités par Arnott (1979, 2007) et Wheaton (1998, 2004) en particulier. Plus récemment, plusieurs auteurs se sont concentrés sur la gestion de la congestion dans les modèles d'équilibre partiel des villes monocentriques. Quelques auteurs ont considéré la ville polycentrique pour analyser les impacts de la congestion urbaine sur les salaires, les loyers fonciers, le bien-être et la qualité de vie, le choix de l'emplacement des entreprises et des ménages (Anas et Kim, 1996 ; Anas, 2013 ; Zhang et Kockelman, 2016a, 2016b). Cette littérature est rare et ne fournit pas souvent des solutions analytiques complètes. Des simulations numériques sont utilisées pour résoudre des modèles complexes, incluant un marché du travail, d'entreprises de production dans les villes, de ménages, d'autres entreprises et des centres commerciaux dont la localisation est endogène avec des externalités de congestion et d'agglomération. De plus, nous ne

connaissions pas précisément comment la taille du centre principal ou du centre secondaire varie en fonction des systèmes de tarification routière. Au meilleur de notre connaissance, il s'agit de la première étude qui fournit des solutions analytiques concernant l'impact des systèmes de tarification routière sur la taille du centre principal lorsque deux externalités existent au sein d'une ville polycentrique.

La stratégie de la taxe pigouvienne appliquée uniquement aux ménages ne permet pas d'atteindre l'optimum. Ce fait peut s'expliquer par deux défaillances de marché : la congestion et la mauvaise répartition des emplois dans la ville. Ce genre de taxe ne peut pas "faire d'une pierre deux coups", c'est-à-dire réduire l'externalité de congestion pour une localisation donnée des lieux de travail et donner la répartition spatiale optimale des entreprises. En équilibre, la taille du centre des affaires (zone résidentielle où vivent les travailleurs) est trop grande par rapport à la taille optimale. Il y a une plus grande proportion des travailleurs qui sont désireux de faire la navette vers le centre-ville en raison de la prime salariale du centre des affaires par rapport aux centres secondaires. Comme ils ne tiennent pas compte de leurs coûts sociaux de congestion, ils considèrent que le gain marginal privé d'être situés plus près du centre d'affaires est supérieur aux coûts marginaux encourus par ceux qui y vivent déjà. Les lieux de travail et d'habitation sont interdépendants dans les choix résidentiels des ménages. Pour une taille de ville donnée, la taxe pigouvienne rend le centre des affaires trop petit dans une ville polycentrique. En d'autres termes, le centre secondaire s'élargit et augmente l'externalité de congestion de chaque usager de la route autour de ce lieu de travail. Cette politique de first-best, à localisation contrainte, corrige fortement l'externalité de congestion en raison (i) des libres décisions de localisation des travailleurs et (ii) le niveau des péages capitalisés dans les loyers fonciers. Une taxe forfaitaire et un péage de cordon n'ont pas pour effet d'obtenir une localisation optimale pour le centre secondaire. Le présent chapitre confirme les effets des systèmes de tarification routière, qui ont été démontré dans la littérature concernant la ville monocentrique. Tikoudis *et al.* (2015) utilisent des simulations numériques dans un contexte différent, en incluant une taxe sur le travail dans leur modèle avec des systèmes de tarification routière pour étudier les effets de l'interaction fiscale. Leurs résultats montrent clairement qu'un péage routier est nécessaire et que le bien-être s'améliore lorsqu'il n'y a pas de distorsion sur le marché du travail. Tikoudis *et al.* (2015) et Verhoef (2005) sont d'accord pour dire qu'une taxe kilométrique forfaitaire est plus efficace qu'un péage de cordon dans une structure monocentrique. Cependant, lorsqu'une structure polycentrique émerge, ce résultat ne tient plus puisque l'efficacité du péage de cordon et de l'impôt forfaitaire dépend principalement de l'écart salarial entre les centres d'affaires avant la mise en œuvre du système de tarification routière. Selon l'emplacement initial du centre

secondaire (trop petit ou trop grand), un impôt forfaitaire peut être moins (resp. plus) dommageable qu'un péage de cordon.

Dans notre modèle, nous supposons que la densité de population est fixée dans un modèle de ville fermée et que la demande de transport est inélastique. Toutefois, les loyers fonciers diminuent avec la distance aux emplois, même si la demande de logements est exogène. Nous ne savons pas si notre hypothèse est restrictive lorsque nous étudions la relation entre la forme urbaine et les systèmes de tarification routière à long terme. En effet, la mise en œuvre de systèmes de tarification routière peut obliger les ménages à ne pas se rendre à leur lieu de travail, ce qui réduit l'offre de main-d'œuvre, ou passer à un autre mode de transport (Tikoudis *et al.*, 2015). Dans un système de villes, certains ménages migreraient ou se déplaceraient vers un nouveau lieu de travail dans une ville voisine où les taxes seraient inexistantes ou inférieures à celles de leur ville d'origine. Sur le plan politique, la mise en place de péages urbains suscite un tollé dans l'opinion publique et, par conséquent est peu utilisé dans le monde (Fosgerau et De Palma, 2013). Les transports publics utilisant la capacité routière existante d'une ville peut augmenter les coûts de transport des navetteurs, mais peut également modifier la prime salariale dans un centre principal. Il peut y avoir un contre-effet tel que forcer les ménages à changer de lieu de travail, améliorant ainsi l'attrait du centre secondaire là où l'utilisation de l'automobile prédomine, ce qui provoquerait aussi de l'étalement urbain. De toute évidence, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour analyser les politiques urbaines de densité et de congestion. dans les villes polycentriques.

Ce chapitre a mesuré l'efficacité de trois systèmes de tarification routière afin d'internaliser l'externalité de congestion lorsque la décentralisation des emplois est endogène. Le modèle tient compte du fait que les navetteurs font face à un arbitrage entre l'avantage salarial du centre principal et le fait d'être bloqué dans le trafic. La stratégie de la taxe pigouvienne n'atteint pas l'optimum social en raison de la présence de deux défaillances de marchés au sein de l'économie urbaine : la congestion et la mauvaise répartition des emplois dans la ville. Elle ne peut pas résoudre simultanément deux problèmes différents, à savoir la réduction du niveau de congestion d'un réseau de transport public et atteindre l'allocation spatiale optimale des entreprises. Sans réglementations, le nombre d'emplois dans le centre des affaires est trop élevé (et la charge de congestion est excessive), tandis que le nombre d'emplois dans le centre des affaires est trop élevé. "L'impôt pigouvien" génère une trop petite taille du centre principal. En outre, une taxe forfaitaire n'est pas nécessairement pire qu'une taxe pigouvienne, contrairement au péage de cordon.

Chapitre 3: Mobilités pendulaires et formes urbaines : cas des aires urbaines françaises métropolitaines.

Enfin, dans ce troisième chapitre, nous avons collecté les données du recensement de la population française pour analyser les effets des formes urbaines sur les distances et les temps de déplacement domicile-travail aux heures de pointe. Trois périodes sont étudiées : 1999, 2007 et 2014. Nous utilisons un distancier appelé "Odomatrix" qui est un outil de mesure de l'accessibilité routière sur le réseau routier français. Les données municipales sont combinées à une base de données routières de l'Institut national géographique et de l'information forestière (IGN). Tout d'abord, nous définissons quatre mesures de la forme urbaine. Notre principale préoccupation est la distribution spatiale des lieux de travail et de la population dans les zones urbaines françaises. Dans une deuxième étape, nous spécifions un modèle économétrique afin d'évaluer la pertinence et l'ampleur de la relation entre ces formes urbaines et les distances domicile-travail sur trois périodes. Troisièmement, nous nous concentrons sur les impacts des formes urbaines sur les temps de déplacement aux heures de pointe et les distances entre les habitations et les lieux de travail seulement en 2014. Enfin, nous procédons à une analyse de la relation entre les mesures de forme urbaine au niveau communal et les temps et distances de navettage en 2014.

En France, les distances moyennes parcourues ont augmenté entre 1990 et 2014. Cette augmentation s'explique principalement par l'étalement urbain et la ségrégation des fonctions urbaines (espaces de vie vs lieux de travail) (Coudène et Levy, 2016). Le même phénomène est observé dans les économies occidentales (Kahn, 2010 ; Garcia-Palomares, 2010 ; Aguilera *et al.*, 2009). La densification de la population urbaine est une politique actuelle visant à réduire les distances domicile-travail et la consommation d'énergie qui en résulte (transport, logement, etc.) (Larson et Yezer, 2015 ; Duranton et Turner, 2017 ; Blaudin de Thé *et al.*, 2018). Toutefois, les effets restent faibles dans les différentes analyses empiriques. De plus, une augmentation de la densité de la population par kilomètre carré peut entraîner des temps de parcours plus longs (Priemus *et al.*, 2001 ; Schwanen *et al.*, 2004). Ainsi nous nous concentrons sur l'organisation spatiale des emplois dans les zones urbaines. Nous utilisons quatre mesures de forme urbaine comme variables explicatives : (i) un rapport entre le nombre d'emplois dans une commune centre et le nombre total d'emplois dans la zone urbaine, (ii) un indice de concentration des emplois de la même veine que celui d'Herfindahl-Hirschmann, (iii) un indice de distribution spatiale de la population et des emplois dans les communes centres et (iv) un indice de la répartition

des emplois et de la population dans les municipalités de chaque aire urbaine. Notre objectif est de déterminer celles qui sont pertinentes afin de suggérer un meilleur ciblage des politiques urbaines.

Nos analyses économétriques montrent une relation positive et significative entre les distances moyennes parcourues et la concentration des emplois dans les communes centres ainsi que dans les zones urbaines où elles sont situées. Nous obtenons des élasticités entre les distances de navettage et l'indice de dispersion des emplois entre 0,22 et 0,26 pour notre analyse en coupe répétée (1999, 2007 et 2014). Notre analyse en 2014 donne des relations qualitativement similaires avec les temps de trajets domicile-travail pendant les heures de pointe. Notre dernière analyse contrefactuelle confirme que si l'emploi et la population active étaient identiques dans une région urbaine, les temps de trajet en heures de pointe et les distances domicile-travail diminueraient en moyenne de 10% pour la majorité des municipalités, en particulier celles situées en périphérie. Nos résultats mettent en évidence les élasticités significatives entre nos variables dépendantes et explicatives, mais il serait nécessaire de tester l'effet causal de nos mesures des formes urbaines en approfondissant nos analyses économétriques et expérimentant une politique in situ.

Ce chapitre complète nos deux analyses théoriques précédentes. Notre analyse empirique s'est concentrée sur la pertinence de l'impact de l'organisation spatiale des emplois et de la population afin de poursuivre la question de l'aménagement de villes polycentriques. Nous avons estimé les effets des mesures des formes urbaines par rapport à la durée et aux distances moyennes des trajets domicile-travail au sein des zones urbaines françaises dans notre analyse transversale de 1999 à 2014. En outre, les effets de la distribution spatiale de la répartition des emplois et des logements par rapport à la durée moyenne des trajets domicile-travail pendant les heures de pointe et par rapport aux centres urbains sont estimés en 2014.

La plus grande concentration géographique des emplois dans les zones urbaines par rapport à la population semble avoir un impact significatif influençant le temps et les distances de déplacement. La densité et la répartition des lieux d'emploi peuvent gérer la congestion urbaine. Toutefois, nos estimations suggèrent des effets relativement modestes. De plus, nos résultats montrent que le temps de déplacement et les distances parcourues pour se rendre au travail dépendent de bien d'autres paramètres que la répartition spatiale des emplois dans les zones urbaines (densité de population, démographie, transports publics, etc.).

Conclusion

Les trois chapitres de cette thèse apportent de nouveaux éléments au débat sur les villes compactes, qui émettent moins de CO_2 et sont moins congestionnées. Nos trois chapitres analysent les effets des formes urbaines sur les émissions de CO_2 , la congestion routière et les temps et distances de déplacement en voiture. Dans notre analyse, la planification urbaine implique une nouvelle organisation spatiale des emplois et de la population : la ville polycentrique.

Nos principaux résultats peuvent être résumés comme suit. Notre premier chapitre théorique donne quelques aperçus sur les problèmes de l'urbanisation et des émissions de CO_2 provenant du transport. Nous soutenons que la ville polycentrique n'est pas nécessairement la ville la plus souhaitable à développer dans certaines circonstances. En effet, un examen attentif doit être accordé à l'interaction entre la demande de logements, les distances de navettage et l'ampleur de la pollution urbaine. La prise en compte de l'externalité de la pollution provenant de l'ensemble des distances parcourues atténue l'attrait de la ville polycentrique même si elle réduit les distances maximales domicile-travail. La vitesse de déplacement et le nombre de routes reliées au centre-ville jouent un rôle crucial dans le choix de la forme urbaine la plus souhaitable. Enfin, l'extension spatiale des villes est une variable clé lorsqu'il s'agit de réduire les émissions de CO_2 .

Le chapitre 2 étend le modèle, en y incluant la congestion routière et l'utilisation des sols par des infrastructures routières. Un changement dans la forme urbaine et la gestion de la congestion avec des systèmes de tarification routière dans une ville polycentrique ont fait l'objet d'une étude. Une ville polycentrique peut atténuer les coûts de congestion pour chaque usager de la route à condition qu'il n'existe aucune distorsion sur les marchés du travail et du logement lorsque la congestion n'est pas tarifée. Tant que la croissance des flux de trafic et l'étalement urbain ne diminuent pas substantiellement les bénéfices directs des délocalisations d'emplois, l'aménagement du territoire reste une politique clé pour faire face aux problèmes de transport urbain au lieu des systèmes de tarification. En effet, les systèmes de tarification routière n'atteignent pas le niveau optimal de congestion. La taxe pigouvienne donne un centre principal trop petit. D'après l'emplacement initial du centre secondaire (trop petit ou trop grand), une taxe forfaitaire peut être moins (resp., plus) dommageable qu'un péage de cordon. Il est à noter que les systèmes de tarification routière profitent à tous les propriétaires fonciers, quelle que soit la structure urbaine fermée sans redistribution à l'ensemble de la collectivité. Par conséquent, les préoccupations politiques concernant la redistribution des recettes fiscales sont à prendre en compte lorsque nous

internalisons l'externalité négative de congestion.

La relation entre les formes urbaines et les temps et distances de navettage dans les aires urbaines françaises est étudiée au chapitre 3. Notre analyse statique des déterminants de la répartition spatiale des emplois et de la population nous montre qu'une augmentation de la concentration des emplois en milieu urbain est associée à une élasticité entre 0,22 et 0,26 avec les distances moyennes domicile-travail. Une augmentation de la densité de population a le même effet qualitatif sur les distances moyennes de navettage. Toutefois, il ne faut pas sous-estimer les effets de second ordre. En effet, plus la densité est élevée, plus les temps de déplacement sont longs dans les villes. Ce chapitre met en évidence une politique alternative possible à la densification de population, à savoir une décentralisation des emplois du centre principal vers les centres secondaires. Il valide le choix d'analyser théoriquement les villes polycentriques. En outre, les politiques de décentralisation et de densification pourraient être combinées pour avoir un impact plus important sur la réduction des temps et des distances de navettage. Nos résultats montrent que la durée et les distances des trajets domicile-travail dépendent également de facteurs socio-économiques tels que la démographie, le genre et la demande de transports publics.

Cette thèse souligne la nécessité d'une approche prudente dans la mise en œuvre de certaines politiques qui permettraient de garantir un développement soutenable des villes. Une ville polycentrique peut être souhaitable ou non en fonction de (i) l'accessibilité des lieux de travail, (ii) la qualité de l'infrastructure routière (vitesse, capacité, etc.) et (iii) la densité d'emploi dans les villes. Cette thèse démontre également le rôle important de la demande de logements sur la structure urbaine lorsque cette dernière est endogène dans un contexte de congestion des transports sans tarification. Quelques projets de densification urbaine pourrait reconsidérer les externalités négatives (congestion et pollution) qui surviennent lorsqu'une population augmente au sein d'une ville. Ces externalités sont des coûts indirects dus à l'ajustement de la demande de logements et de transport à long terme.

General introduction

1 Motivation.

Since 2007, the global urban population has exceeded the rural population. It amounted to 4 billion people in 2014 (UN, 2014). Cities are currently facing skyrocketing growth, especially in developing economies such as China, India and Nigeria. The number of “millionaire” cities increased sixfold between 1950 and 2010. Indeed, 75 cities were home to more than one million people in 1950 compared to 449 in 2010 (Seto *et al.*, 2014). Among these cities, 71 have become megalopolises ⁶, such as Tokyo, Sao Paulo, Shanghai, Los Angeles, and Manila; 45 of them are located on the Asian continent, particularly in India and China (UN, 2014). Urban growth is a result of rural exodus in those countries. People gather in urban areas, but one-third live in slums for two main reasons. Developing cities are not building as much housing as needed, and there is a lack of clear property rights on land, which leads to the expansion of shanty towns. In developed countries, agglomeration economies have fostered urbanization in Western cities since the beginning of the industrial revolution in the 19th century. Firms and workers benefit from better wage conditions and better dissemination of ideas and innovations (Glaeser, 2012).

However, increasing urbanization has major drawbacks, including air pollution, greenhouse gas (GHG) emissions and congestion externalities due to transport in car-based cities; these drawbacks come despite the benefits of agglomeration economies (Fujita et Thisse, 2013; Kahn, 2010). For instance, in France, cities have been designed to be convenient for private cars since the implementation of urban transport policies under the mandate of Georges Pompidou at the end of the 1960s (Mirabel et Raymond, 2013). Harmful effects on the environment, urban congestion issues and greater use of agricultural land (since the 1980s) call the car-based city paradigm into question (Cavallières, 2015). In addition, some studies predict a significant increase in the cost of these drawbacks of urbanization over the next 10 years. For instance, direct costs of congestion (value of

⁶Megalopolises are urban cores generally populated by more than 5 million inhabitants.

fuel and time wasted) for all households in Paris are expected to increase from \$6.2*bn* to \$10.0*bn* between 2013 and 2030 (CEBR, 2014). Cities are experimenting with and implementing policies to reduce these negative effects and make them more attractive. They are building new road lanes, improving mass transit availability and reliability and attempting to impose urban tolls. Political opposition to the introduction of taxes prevents cities from reducing traffic and car use as the main means of transport for commuting. However, urban forms play a key role regarding these negative consequences. The development of polycentric cities is recent and may be a strategy to reduce pollution and traffic congestion (Storper, 2013; Gaigné *et al.*, 2012).

First, we highlight the economic and environmental issues caused by the increasing use of cars in urban areas and the resulting congestion and pollution due to more intensive use of road infrastructure. Second, we focus on the role played by different urban structures and modal choice in order to determine their impacts on the evolution of greenhouse gas emissions and traffic congestion. Then, we evaluate urban policies designed to curb these negative externalities. Finally, we describe our methodology of modeling cities and our main hypothesis. Our three chapters are outlined.

1.1 High congestion and pollution costs in urban areas across the globe.

Today, 10 million trips occur in urban areas every day. Traffic congestion is an issue for large agglomerations around the world. Urban road congestion arises mainly during peak commuting hours. As economic activities are spatially concentrated due to agglomeration economies, workers gather in cities close to their workplace. These economies depend on the traditional trade-off between scale economies and transportation costs (Brueckner, 2011). Congestion costs matter as households and firms waste time and fuel. Firms lose both productivity and efficiency based on their location and their business sector, whether their workers arrive late for work. Furthermore, logistics businesses suffer from delivery delays due to extra travel time within a city.

Congestion costs. The economic costs are relatively high. Vehicle owners have direct costs related to purchase, maintenance, value depreciation, fuel consumption and parking. In addition, there are indirect costs, such as congestion costs, which are measured as wasted time and fuel in traffic jams. In 2001, Americans spent 161 minutes on average per day in a private vehicle (Duranton and Turner, 2011). There was a decline in travel time due to the economic crisis from 2011 to 2013 (CEBR, 2014). However, economic activity

recovered. Today, American cities remain among the most congested in the world. For instance, a commuter living in Los Angeles spends 102 minutes a day in rush hour traffic (Cookson, 2018). In France, 37.2 million vehicles were in circulation according to the survey “Transport et déplacements 2008” (CGDD, 2010). Daily travel time has reached 56.4 minutes in France in 2008 (CGDD, 2010). The distance traveled by each French person (active and mobile) grew by 8 kilometers between 1982 and 2008, which is an increase of 45% in 26 years. A densely populated area such as Paris saw home-to-work travel times hit 75 minutes on average in 2008, despite the fact that traveled distances are shorter than they were in 1982. Paris’ commuters wasted 55 hours on average in traffic for home-to-work trips in 2013 (CEBR, 2014). We can observe the discrepancy between travel times for work-related trips during peak and off-peak hours for the city of Lyon in 2014. Travel times increase with the distance from the CBD. It is straightforward to

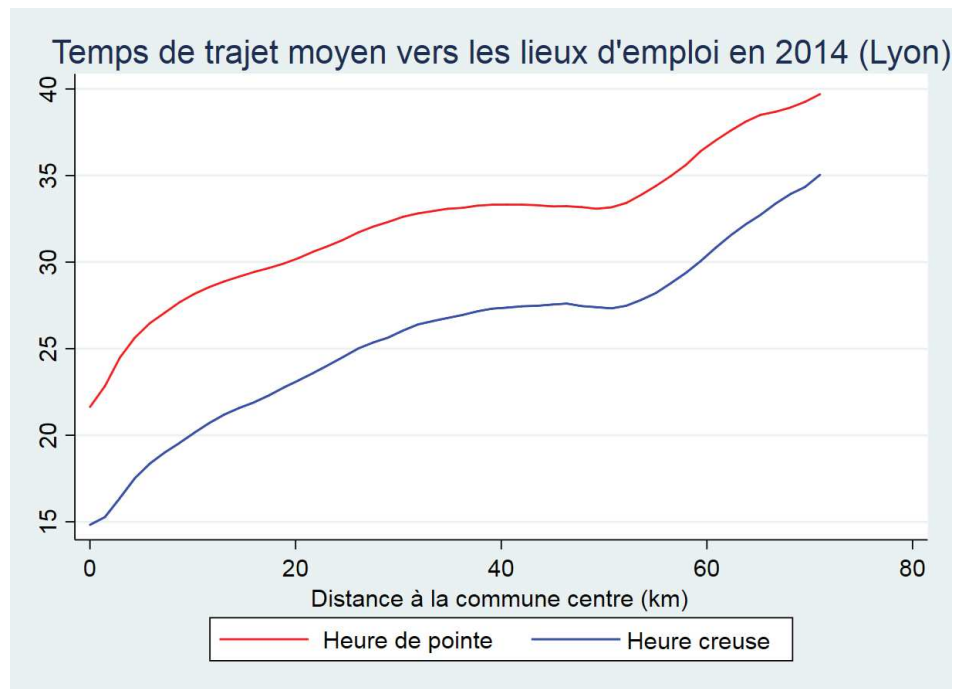


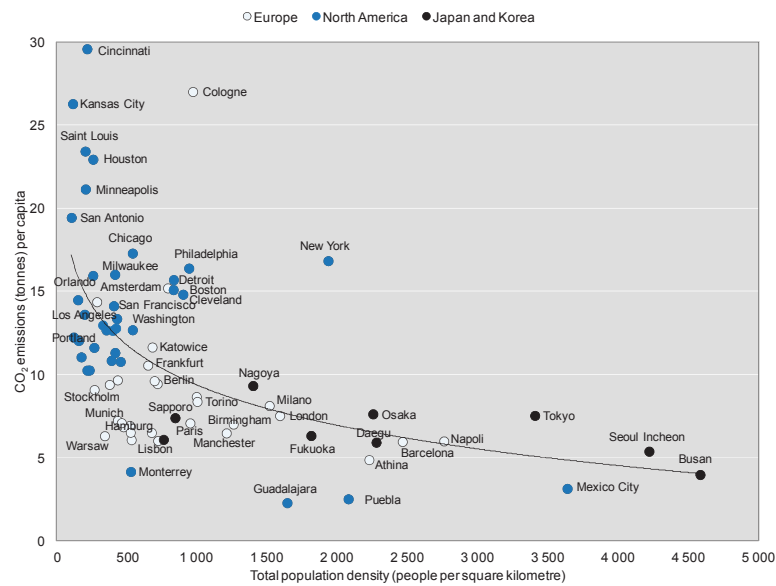
Figure 4: Travel times in peak and off-peak hours (minutes) by municipalities of the urban area with respect to the distance from Central Business Districts (CBD) in 2014.

check that peak hour travel times are higher than off-peak. A driver spends 26 minutes for an average round trip in off-peak hours, while it takes 32.4 minutes during peak hours. That is a 25% increase. In addition, traffic congestion induces carbon dioxide emissions stemming from idling vehicles.

Pollution costs. The growth of GHG emissions due to the transportation sector is driven especially by the increasing use of private cars and declining densities in urban areas since the mid-1950s (OECD 2014a). More than one billion motor vehicles (private cars, buses and trucks) have been in circulation since 2010, and the demand for private vehicles, driven by emerging countries, will increase in the future (Rode *et al.*, 2014). According to a “*business as usual*” scenario, 800 million additional vehicles will complete the global vehicle fleet by 2050 (UNEP, 2011). The scientists of the Intergovernmental Panel on Energy and Climate Change (IPCC) anticipate a doubling of GHG emissions by 2050. This increase is mainly due to the rapid urbanization of emerging and developing countries (UN, 2014)⁷. Transportation is responsible for a quarter of carbon dioxide (CO_2) emissions from energy consumption in all sectors. We mainly take into account the CO_2 because this gas contributes the most to greenhouse effect, according to the International Energy Agency (IEA, 2012). In addition, overall energy demand from the transport sector will grow by an average of 1.3% per year by 2035. This pollution stems from the increased use of private cars affecting megapolises in emerging countries (IEA, 2012). Health effects are dramatic. Air pollution by various greenhouse gases and fine particles cause premature deaths of 3.2 million people each year (OECD, 2014b). Developed and developing countries alike are both affected.

GHG emissions depend on urban form, which induces a maximum distance to travel between job location and residential places. Emissions also depend on the level of activity within cities (measured by tons or passenger kilometers), the energy consumed per capita and fuels used for each mode of transport (Gwilliam, 2002). To reduce GHG emissions, densification policies should be implemented, as population density appears to be a key variable (Zheng *et al.*, 2011; OECD, 2012). Cities with high population levels per square kilometer are subject to lower CO_2 emissions per capita. In addition, the previous graph suggest that Asian cities are “greener” than American car-based cities due to (i) their high population density and (ii) use of soft modes (cycling, walking, etc.) and public transport to commute (OECD, 2012). Based on this observation, the compact city model is stimulating debates among economists and urban policy makers because this model would reconcile economic development and the sustainability of cities (OECD, 2012 ; Newman and Kenworthy, 1989; Glaeser and Kahn, 2010). Denser cities mean proximity between firms, spillover effects and increasing returns of scale (Krugman, 1991). Henderson (2002) review the benefits of agglomeration economies in cities, which have been largely demon-

⁷The urbanization rate, measured by the number of inhabitants living in cities, was similar in 1990 in Brazil and in the USA. However, it took Brazil 30 years to reach this rate, unlike the USA, where it took 90 years (Henderson, 2002). Today, Africa and Asia are the main continents affected by this fast-paced urbanization, including India, China and Nigeria in particular (UN, 2014).



Note: Data unavailable for Australia, Chile, Israel and New Zealand.

Source: OECD (2012), *Redefining “Urban”: A New Way to Measure Metropolitan Areas*, OECD Publishing, doi: 10.1787/9789264174108-en.

strated in the literature. In large cities, firms and workers earn more thanks to clustering, specialization, innovation and the process of knowledge spillover (Henderson, 2002; Duranton and Puga, 2004; De la Roca and Puga, 2017, Puga, 2010). However, large cities induce social costs that undermine economic growth. Land costs in the CBD of a “monocentric” city force households to locate further away, which leads to urban sprawl.

Urban sprawl as a key factor regarding externalities of congestion and pollution. Emphasis should be placed on existing relationships between space organizations and transport-related flows (Rode *et al.*, 2014). Urban growth has accelerated over the past 50 years and has led to massive consumption of agricultural land (OECD 2014a; Cavailhès *et al.*, 2015). Simultaneously, these existing cities have started to spread out by observing a decrease in their population density (Angel *et al.*, 2011). A lack of strong governance and control in urban planning foster this phenomena (Henderson, 2002). Between the late 1990s and the mid-2000s, growth of urban areas has been more than proportional to population growth in cities. For instance, between 1990 and 2015 in China, built-up areas quadrupled, while the urban population nearly tripled (Chen, 2018). Development of bedroom communities and suburbs is the result of many socioeconomic factors (land planning, peripheral commercial areas, transport costs, available living space per capita, etc.) and low costs of access to private transport. As a consequence, urban sprawl implies longer traveled distances to workplaces and a higher dependency on private car use

for households living in low-density areas (Hubert *et al.*, 2016; Pouyanne, 2007; Breheny, 1995).

Lack of consideration of negative externalities (congestion, pollution, accidents, health problems, etc.) has fostered urban sprawl. This phenomenon affects Asian cities, especially in China and India, due to assumed planning or regulations setting a housing size limit in urban centers (Rode *et al.*, 2014; Bertaud and Brueckner, 2005; Borck, 2016). In addition, some cities such as London or Hamburg have chosen to redensify (Floater *et al.*, 2013). There is also an increase in public transport investment worldwide and the modal share of mass transit system has increased in some OECD countries (Sims *et al.*, 2014). These changes are mainly the result of political will and citizen demands for a better quality of life that go beyond pure economic considerations.

Hence, urban costs are an issue every city must address to remain attractive and to reduce their carbon footprint. Clearly, political will matters regarding urban transportation policies (Chen, 2018). Different policies exist and have been implemented in the past. We will review these urban policies and evaluate their efficiency mentioning that only a few studies have focused on the impacts of these urban policies in polycentric cities.

1.2 Policies aiming to lower GHG emissions and congestion in urban areas.

Urban policies may efficiently curb GHG emissions by mobilizing numerous actors such as local, regional and national public authorities (OECD, 2014a). Development of compact cities providing efficient public transport service and improved infrastructure related to soft (i.e., non-motorized) modes of transport is promoted by the IPCC. Indeed, the higher the share is of transport modes that use less carbon for trips involving people and goods, the lower the CO_2 emissions per capita (Bongardt *et al.*, 2013). A mix of land policies and urban planning oriented toward a limited space for private cars and a proximity of residential and business locations enable a city's carbon footprint to be reduced (Suzuki *et al.*, 2013). Policies of congestion management through tolls arise only in a few cities worldwide (London, Singapore, Stockholm, Trondheim, Oslo, etc.) as pointed out by Fosgerau and De Palma (2013). Political concerns and electoral cost of unpopular initiatives drive this lack of tax implementation (Fosgerau and De Palma, 2013).

Taxation. Taxation (positive or negative)⁸ is a means at the disposal of city council members to achieve the objective of urban sustainability. It enables consumers' behavior to be changed by influencing them to purchase and/or use virtuous carbon transport modes. A "carbon" tax or an urban toll aims to charge for the negative externalities (congestion, accidents, air pollution) that come from purchasing vehicles that do not meet certain environmental standards by individuals who impose them on the community. However, this strategy remains ineffective if the tax does not correspond to the marginal cost as with fuel taxes (Rode *et al.*, 2014). Implementing congestion charging schemes is often advocated as a solution to internalize the social costs of transport (GAO, 2012; Eliasson and Mattsson, 2006). These congestion charges have two objectives: (i) curbing the quantity of negative external effects (congestion, pollution, GHG emissions), and (ii) providing financial resources in order to develop an alternative supply of public transport. Singapore, Oslo, Stockholm and London have implemented urban tolls and pursue anti-congestion policies. In addition, public transport is promoted.

Since the introduction of an urban toll in London in 2003, traffic has declined in the zone where commuters incur a tax (Santos, 2005). Toll revenues have been used to finance improvements in the public transport system (frequency, servicing, etc.). Norway has set up cordon tolls in Trondheim, Oslo and Bergen, for example. This system has also made it possible to reduce traffic in city centers but also to finance large-capitalization infrastructure such as tunnels and bridges. Singapore is a city-state that implemented its urban toll in 1975 to manage traffic flow while promoting public transport, carpooling and soft modes of transportation (e.g., cycling and walking). The ERP system in Singapore is a time-varying toll charging commuters more during peak hours in the morning (7-8 am) and in late afternoon (6 pm). These urban toll policies are rare and have reduced traffic flows and CO_2 emissions in the areas concerned (Fosgerau et De Palma, 2013). However, they have perverse effects such as shifting congestion to other roads that are free of charge (Santos, 2005). In addition, the increase in housing prices in the areas subject to urban tolls affect the well-being of tenants living in those areas (Tikoudis *et al.*, 2015; Segal and Steinmeier, 1980). Spatial allocation is not optimal in the short run for given location when taxes are implemented. Firms and households location adjustments in the long run matter.

The implementation of urban tolls is a challenging road, as in Stockholm (Eliasson et Mattsson, 2006). The future French mobility law provides that each French city may

⁸A tax reduction or a state subsidy is considered positive taxation since an economic agent is rewarded due to a change in behavior. Conversely, paying a tax is part of negative taxation

implement an urban toll. At this stage, local authorities can only set them up on an experimental basis for a maximum period of three years. No experiment has been conducted in France. Alternatives such as policies to increase population density in urban areas are often less controversial.

Policy impacts of urban densification. Rode *et al.*, (2014) show that urban density (population/hectare) is a critical variable when it comes to lower investments in road infrastructure and other services for housing (water, purification, etc.). A dense, sparsely spread city offering good public transport service requires less infrastructure investment. Public transport supply is more efficient in terms of operating costs in dense urban areas. For instance, the densest French communes cover 3.5% of the territory; they account for half of the total population for an average residential density of 1,000 inhabitants per square kilometer in 2008 (CGDD, 2010). Hence, this density level is a potential market for an efficient mass transit system. Conversely, a sparsely populated city increases the need for road infrastructure and service provision over larger areas. In addition, per capita fuel expenditure is higher in a city that is spread out than in a compact city (Houston vs. Copenhagen, see Laconte, 2005). Duranton and Turner (2017) and Blaudin de Thé *et al.* (2018) demonstrate that an increase in population density yield a decline in fuel consumption and vehicle kilometer traveled in urban areas.

Restrictions on building size and density can lead to negative effects such as a more sprawling urban form, which induces a decrease in the supply of floor space (Rode *et al.*, 2014). Indeed, policies that limit building heights create urban sprawl by increasing land prices in the restriction zone (Bertaud and Brueckner, 2005). Population density declines close to the city center and increases on the outskirts. As a result, it increases average distances between home and work in the case of a monocentric city and emissions associated with these trips. These emissions may even be amplified in the case of modal choice according to Borck (2016). This policy has also ambiguous effects on GHG emissions stemming from residential areas (Borck, 2016). A sound change in urban planning may be an alternative to taxation and densification policies to reduce congestion externalities and CO_2 emissions.

1.3 Economic and environmental implications of different urban spatial structures.

Compact cities bring people physically closer to their workplace and economic activities between them creating agglomeration economies (Fujita and Thisse, 2013). However, con-

gestion and pollution externalities do exist in urban areas and can reduce the interest of densification policies. The level of infrastructure dedicated to public transport is in competition with the space used by private vehicles. In a study on several cities worldwide (e.g., London, Los Angeles, and Hong Kong), Newman and Kenworthy (1989) demonstrate a negative relationship between population density level and energy used stemming from transport flows. Indeed, the use of low-emission transport modes (cycling, public transport, walking) has increased in densely populated areas (CGDD, 2010).

Sparse cities with dispersed urban functions such as Houston or Los Angeles require ownership of private vehicles. This need is also explained by the low cost of transportation for commuting by car (Glaeser and Kahn, 2004). Therefore, the urban space in central business districts is occupied mainly by parking spaces (Manville and Shoup, 2004). In addition, an increase in road infrastructure investment allowing for the construction of new lanes in urban areas leads to a relocation of city dwellers to the outskirts of metropolitan areas (Baum-Snow, 2007). These effects must be taken into account by urban planners because this infrastructure is built to last, while job and household relocations can be faster. Therefore, land use decisions must be analyzed in relation to transport systems within an urban spatial structure. The decentralization of jobs in monocentric cities has ambiguous effects on average traveled distances and home-to-work travel times. Several studies show that the location of jobs in secondary business districts reduces distances and travel times against the CBD gathering the predominant economic activities (Giuliano et Small, 1993; Veneri, 2010; Alpkokin *et al.*, 2008). In Germany, Gutz *et al.* (2009) compare the cities Frankfurt and Stuttgart, which have a polycentric form, with Munich and Hamburg, which are monocentric. The authors observe shorter traveled distances for commuters living in Frankfurt and Stuttgart. However, opposite effects are also observed (Naess et Sandberg, 1996). The dispersion of jobs led to mismatching problems in Paris, Lyon and Marseilles from 1990 to 1999, increasing the average traveled distances (Aguiléra, 2005). In addition, progressive decentralization of employment has also led to an increase in home-to-work distances as jobs were relocated to low-density areas from 1986 to 1996 in Barcelona. Scholars have noted an absence of a regional policy for the development of residential land, and high car-use dependency has led to this result (Muñiz et Galindo, 2005).

Several urban economists only consider transport costs to be fixed per distance in the spatial structure of cities, albeit potentially negligible. In addition, traffic congestion is assumed to be fixed per unit of distance (Lucas and Rossi-Hansberg, 2002; Gaigné *et al.*, 2012). Accordingly no competition occurs in the land market between the road system and land use for commercial and residential purposes. It would be useful to study urban

spatial structures considering transport costs depending on location and traffic congestion and implement the available policies to address these challenges.

2 Literature review.

2.1 Modeling the polycentric city.

Two main polar models exist regarding urban spatial structure: the monocentric and the polycentric city⁹. A city is denoted as monocentric or polycentric based on the number of business districts. In these districts, only firms use land and attract all workers from the city (Fujita and Thisse, 2013). Empirical evidence suggests that firms may not have exclusive use of the land at their location. Mixed land use is observed in some US cities, but this trend requires more scrutiny due to the unclear interplay between commuting times and employment dispersion (Wheaton, 2004). In any case, firms have an incentive to locate closer to each other, generating increasing returns and agglomeration economies (external and internal). However, gathering firms in a CBD leads to high land rents in the vicinity of this location and high commuting costs for workers. Individuals use roadways for commuting to the CBD (Solow, 1972, 1973). Some models allow for leisure and shopping trips as Anas and Kim (1996).

To sum up, urban land is mainly devoted to residential, commercial, amenities and transportation use. The two former are commonly designed in urban economic models according to diverse formalizations. Land use in a CBD can be exclusively allotted to firms (Larson and Yezer, 2015) or mixed (Fujita and Ogawa, 1982). Hence, it allows for competition in a land market between firms and households. Powerful urban economic models emerge with the seminal works of Alonso (1964), Mills (1967) and Muth (1969) because they reflect what we observe in European and American cities (Brueckner, 2011). Location choice of households depends on a key trade-off between rental price and commuting costs. Living farther from one's workplace results in high commuting costs, which are balanced by a lower housing cost. Households bid for housing lots measured in square feet per housing floor space available at each point (see Figure 2). Housing floor space is often the single feature for dwellings. Bid-rent prices are higher near the CBD than at the city fringe. The equilibrium land rent equals the highest bid at each location and represents the upper envelope of the auctioning process (Figure 2). As bid-rent prices decrease with respect to the distance from the CBD, housing consumption increases. Otherwise, there would be no

⁹see Fujita and Thisse (2013) for a more detailed discussion about all underlying models existing in the literature of monocentric and polycentric cities.

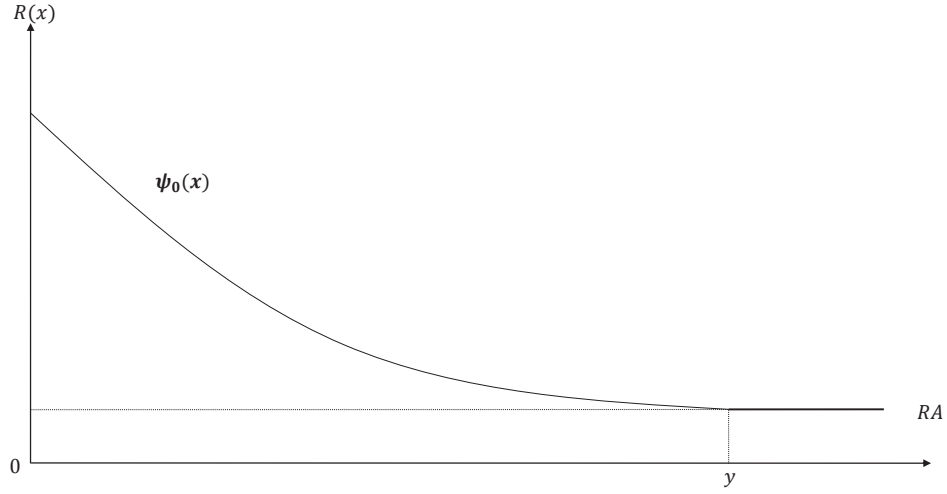


Figure 5: Upper envelope of the bid rents in equilibrium and location of CBD $x = 0$, and limit y of the monocentric city (Solow, 1972).

incentives to live farther from the CBD. Accordingly, the residential density decreases with respect to the distance from the CBD as households demand more space when land rent becomes less expensive. A new urban form has emerged as major metropolises expand. Firms benefit from cheaper technology of information and communication to change their industrial structure. As a consequence, they have changed the location of their economic functions. Headquarters are centrally located while plants and warehouses are decentralized in the outskirts of cities (Fujita and Thisse, 2013). Hence, it becomes useful to reconsider the basic model and evaluate economic and environmental policies within a polycentric city. We use a model with similar mechanisms as in a monocentric city. Bid-rents decrease from the CBD and rise again close to the SBD. Finally, they decrease from the location of the SBD to the city limit (Figure 3). There is a wage premium in the CBD. Indeed, business services and high skilled jobs are located there while SBDs concentrate medium-skilled jobs. Our model is a linear city where firms do not compete for land and are located in business districts. m lines share the same initial point ($x = 0$) which is the CBD. The location of the SBD is determined endogenously in equilibrium in line with Cavailhès *et al.*, (2007), Gaigné *et al.*, (2012) and Lucas and Rossi-Hansberg (2002). Our analysis focuses mainly on the evolution of CO_2 emissions stemming from transport flows and congestion management in a closed-city with a changing urban form. Urban systems of several cities are not considered.

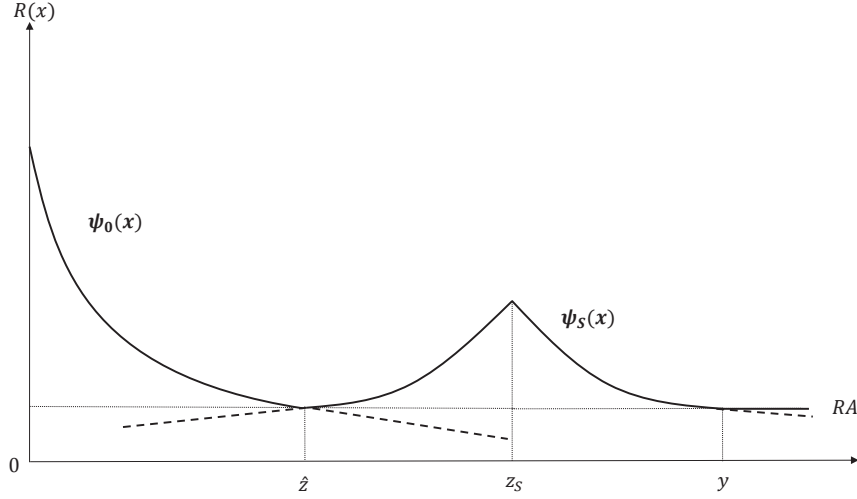


Figure 6: Upper envelope of the bid rents in equilibrium and location of CBD $x = 0$, SBD z_S and limit y of the polycentric city (author).

Marshallian approach. In our model, firms do not use space and do not compete with households to rent land. However, we do not neglect Marshallian externalities that foster agglomeration economies (Fujita and Thisse, 2013). Our city is a result of socioeconomic forces yielding a concentration of firms in a CBD. In addition, our basic monocentric city can shift to a polycentric city, while the CBD remains the most attractive workplace thanks to a wage premium. All households work and travel to the business districts. In a pure monocentric model, all inhabitants are identical and share the same utility level, but consumption bundle differs (Brueckner, 1987). In line with the seminal model of Von Thünen for farmers selling their crops to a central market and developed by Alonso, Muth and Mills, each economic agent faces a trade-off between land rent and transport costs (Fujita and Thisse, 2013). In the theoretical models, business districts are often surrounded by residential areas occupied by workers who are free to choose their residential location and workplace according to their budget constraint (Fujita and Thisse, 2013). In equilibrium, we derive the indirect utility for each worker who does not have incentives to relocate in the city ($\frac{\partial V}{\partial x} = 0$). Hence, the workers share the same level of utility regardless of their location. Without loss of generality, we assume there is no unemployment and that workers do not react to a change in transport costs by quitting their jobs. In addition, we have purposely set aside the literature that includes amenities and shed light on that one covering road land use and traffic congestion within cities.

Negative externalities. In a perfect theoretical framework of a given market in pure and perfect competition, all agents are rational. Hence, a Pareto optimum is achieved when the welfare of one agent cannot be raised without reducing that of another agent. Applying these principles to the transport sector within car-based cities does not correspond to reality. We know that lack of coordination between agents leads to an imperfect market. Additionally, market failures observed, though the literature has focused mainly on the benefits of agglomeration (Fujita and Thisse, 2013; Brueckner, 2011). The daily use of cars within cities causes negative externalities, such as air pollution, noise, road accidents and congestion (Mirabel et Raymond, 2013). A road is congested when an agent imposes an additional trip on the network, thereby increasing time and delay costs for other travelers. Different tools exist to manage congestion and pollution in cities such as urban tolls, low-emission zones, urban boundaries, parking management, public transport investments and land use regulation such as density limits (minimum lot size zoning), height limits, yard setbacks, and greenbelts (Small and Verhoef, 2007; Brueckner, 2011). Therefore, their economic and environmental efficiency must be evaluated to determine their impacts on urban models and real cities. We review existing theoretical literature including congestion externality in monocentric cities in order to understand their transposition into a polycentric model.

2.2 Impact of anti-congestion policies on urban forms and environment.

In discussing the stakes of the new economic geography (NEG), Fujita and Krugman (2004) agreed that transportation costs are substantial to explain location decision of firms and households. Raising urban costs to internalize externalities of congestion may improve the allocation of resources but also have an impact on location decisions in the long run. First, economists have assessed short-term consequences of implementing an urban toll, economists have focused on traffic, welfare effects, modal choice conditions and pricing equity (Eliasson and Mattson, 2006; Raux and Souche, 2004). They have also studied long-term effects regarding transport preferences and GHG emissions (Bhatt, 2011).

Short-term consequences. In the seminal work of Solow (1972), the author determines a rent profile that is more convex in the case in which congestion is taken into account. This means that rents become more expensive close to the CBD and relatively less at the edge of the city. Accordingly, households locate in smaller housing spaces near their workplace than at points farther away. Solow obtains a similar result in his subsequent

paper in which he slightly changes the model (Solow, 1973). When congestion costs are introduced, land rents rise at all locations for a given city size. However, when housing density adjusts the city size expands. In the monocentric model, seven cases are analyzed where the pure distance costs and the congestion costs vary in the annual transportation cost function with the help of numerical simulations. The fraction of income spent on housing space after travel costs and the fraction of land allotted to residential use shift as well. When congestion costs are high, the diameter of the monocentric circular city increases gently. Some simulations are performed in which the fraction of land allotted to housing is low and increases from the CBD to the periphery. The simulations yield a flattening effect of the rent profile and a sprawling effect of the city boundary (Solow, 1972). Solow (1972) is also concerned with the optimal fraction of land that can be allotted to the road system. In his seminal paper, he demonstrates that the best share between roads and housing is a fraction of land allocated to residential use yielding a minimum to the rent at the edge of the CBD. But his answer does not lead to an analytical solution, and he therefore leaves it for further research. Accordingly, in a subsequent study he carries out a cost-benefit analysis comparing shifts in the fraction of land use with the help of numerical simulations (Solow, 1973). Since no congestion tolls are implemented, land values represent diverse private transport costs. Households face a unique trade-off between rent and travel costs and do not take into account the social cost imposed to other families. Numerical simulations are performed to compare three distinct planning decisions regarding the fraction of land devoted to housing and its effects on average annual rent, travel costs and welfare per household. The cost-benefit analysis leads to roads' overcapacity within the city, especially close to CBD since market land values are distorted through the lack of a road-pricing scheme (Solow, 1973).

Regarding land use regulation in an urban model, a city planner is commonly used as a municipality for Solow (1972) or a manager for Arnott (1979). The former must choose the best allocation of land between roads and housing, and the latter must minimize its variable resource costs to supply the whole population in lot size, transportation and other goods consumed by each resident. Arnott (1979) demonstrates that transport improvement such as a road widening induces indirect costs that should be considered even though Solow (1973) ignored them. Indeed, it causes larger traffic flows than what existed previously and avoids an over-evaluation of land for both road and residential use. Transport upgrades in an unpriced road-scheme create a distorted urban economy in a long-run competitive equilibrium. Accordingly, indirect costs must be taken into account carefully in the cost-benefit analysis as it relates to optimal capacity allocated to roads.

Anas and Kim (1996) set up a first-best optimum toll. Transport planners are assimilated as public authorities. Transportation is priced at its social marginal cost; however, the budget is unbalanced in the short run due to the rent to pay for land using roads. All rents are redistributed equally among residents. The authors analyze two cases. The first concerns shopping preferences, which are independent of the mall size. Hence, congestion is the only externality. They determine a unique equilibrium solution wherein consumers and jobs are dispersed among all zones of the city in which rent, wage, commodity price gradients and traffic peak at the CBD.

In the second case, shopping preferences are affected by the size of shopping mall. In other words, the scale of economies in shopping are strictly positive. Multiple equilibria arise from the same parameters value. Employment may be concentrated in a subset of each zone, and residences/streets are present in all zones. With scale economies in shopping, consumers' preferences for shopping depend on income, prices of shopping trips and on the relative sizes of shopping centers. Production may otherwise concentrate in some zones, while other zones shelter only residences (streets are present everywhere). Accordingly, in that case a polycentric urban structure emerges.

In the paper of Arnott (1979), city size is determined endogenously, and lot size consumption is fixed at each location but provided endogenously by the city manager. The major contribution of his work regards transport improvement effect on urban form. In a distorted economy, a marginal increase in the road width leads to commuting savings in the short run but causes larger traffic flow at each unit distance. This indirect cost may be larger than benefits in the long run due to housing adjustment. In other words, the change may induce a sprawling effect that burdens transportation costs as a long-term effect.

Long-term effects. Wheaton (1998) continues the analysis of Arnott (1979) by pricing the congestion externality in the model. He addresses two cases: one with a fixed fraction of land allocated to transportation and another with an optimal capacity. His model allows for density adjustments as advocated by Arnott (1979). The originality of his approach regards the maximization of the aggregate land rents within the city to allocate land given that externalities exist. The first case brings two externalities: a marginal social cost of commuting and one linked with adding a new resident at a given distance. These costs increase the commuting time of travelers at all locations inward along the given distance. Wheaton determines that land consumption at the periphery is efficient and land prices are undervalued near the CBD. A congestion toll equal to the marginal increase in travel time due to an extra resident at a given distance would not set the problem, so the author

suggests implementing a tax that internalizes social cost of density. In the second case, the land market is still distorted. However, the marginal cost of increasing congestion or marginal gain of expanding roadways is equal to the social rent. Accordingly, increasing commuting distance leads analytically to higher velocity and hence a fall in travel time per mile. Some numerical simulations are performed to measure the magnitude of the analytical conclusions. An optimal city is denser close to the CBD than a market city when transport capacity is constant across locations. This effect is mitigated when the share of highways is constrained to 99% at the edge of the CBD and decreases to 1% at the urban border. Density is lower for both market and optimal cities, but the social rent not only is still above the market rent near the business center but also holds much more longer than in the first case.

In a later paper, Arnott (2007) raises the question of what level of toll to implement in order to internalize the congestion externality. The framework also integrates agglomeration externalities and non-market interaction between externalities. Toll revenues are redistributed equally among residents. However household location choice is not analyzed since each resident lives in the same lot size according to the model specifications. Each day, she receives a wage that corresponds to her average product lowered by the toll over the private time cost of a workday (i.e., labor and commuting time). The optimal toll is determined as the social opportunity cost of leisure multiplied by the social cost of congestion minus the agglomeration externality in terms of output per worker. Arnott (2007) performed some numerical simulations using parameters stemming from the empirical literature. As a result, the magnitude of the optimal toll decreases when congestion externalities are small and agglomeration externalities are large, which is why a government should consider the interplay between externalities, especially between agglomeration economies and traffic congestion externalities. However the government is unable to observe differences between individual types and unable to differentiate tolls and transfers¹⁰. Accordingly, the author advises of set second-best optimal toll taking into account uninternalized agglomeration externalities. A tax on a daily commute without knowledge of the uninternalized agglomeration externality might be set at a lower level than the congestion externality cost. A question remains regarding the internalization of all known negative externalities, which may or may not be efficient.

Tikoudis *et al.*, (2015) question the impacts of diverse second-best road tolls on the labor

¹⁰In the specific case of a dynamic congestion model, a planner should solely impose a time-varying toll corresponding to the externality cost to achieve a Pareto efficient allocation with a redistribution of the toll revenue (Arnott (2007)).

market and welfare in the long run in order to observe labor supply and commuting distance adjustments from households. Residential density and labor supply vary over space, but lot size of housing is constant for identical individuals. The first toll implemented is the *Pigouvian toll*, which internalizes the marginal external cost of congestion. It is a first best policy without distortions on the labor market. The authors analyze the effect of a cordon toll as a varying-kilometer tax that approximates a second-best policy and then the impacts of a tax per traveled kilometer. Anas (2013) analyzed the effects of road pricing schemes on workplace and residential locations within Chicago as well as on wages, rents, housing prices and land development. The author shows that quasi-Pigouvian tolls have an unclear effect on both location of jobs and dwellings. Fuel taxes make a city more compact, leading to greater wages, rents and housing prices on average. Increasing pecuniary transport costs is a right tool to reduce urban sprawl.

Regarding land use, it should be noted that the choice to build road infrastructure for private cars creates a lock-in effect. This implies that road lanes are built to last on areas that will not be used for other alternatives. In other words, Williamson (1981) calls this an asset specificity within the urban structure in our case. However, some expressway projects dedicated exclusively to high-quality service buses (HQSB) have emerged since Curitiba's successful experience in Brazil using existing infrastructure (Rode *et al.*, 2014). In addition, the development of infrastructure to facilitate cyclists and pedestrians changes mobility so that they are less carbon intensive in urban centers. Car-sharing and the provision of self-service bicycles is developing within cities such as Paris, Lyon or Rennes in France. These measures have a dual impact in that they make it possible (i) to reduce CO_2 emissions and (ii) to reduce the externalities of congestion (Turner and Pourbaix, 2014). Electrifying urban transport systems may lead to reduced GHG emissions as well.

3 Outline.

3.1 Chapter 1: Urban spatial structure, transport-related emissions and welfare.

In this first theoretical chapter¹¹, we have studied the impacts of urban spatial structure on CO_2 emissions stemming from transport flows and on welfare of households. To do so, we have built a theoretical model of a monocentric city and a polycentric city with an endogenous location of workplace. Within these spatial structures, location choice of households and their housing demand are determined endogenously. First, we analyze changes in CO_2 emissions and welfare when a monocentric city shifts to a polycentric one with an endogenous secondary business district. Second, we assess our results extending our model with a larger supply of housing in the central business district in comparison with the SBD and by allowing wages to be determined endogenously within each business center.

Our chapter is related to previous theoretical works that have studied the development of secondary business districts in cities (Cavallières *et al.*, 2007). Floater *et al.*, (2014) and Burgalassi and Luzzati (2015), state that environmental impacts of urbanization depend on urban forms (design, density, etc.). Previous studies shed light on the benefits of the polycentric city as a spatial structure that would decrease the total distance traveled by workers and mitigate urban pollution (Gaigné *et al.*, 2012; Legras and Cavallières, 2016). However, the literature does not assess the impact of a change in workplace location on carbon emissions when housing size is endogenous. In addition, the emergence of polycentric cities is microfounded when housing size reacts to a change in workplace location (Fujita and Ogawa, 1982; Anas and Kim, 1996; Lucas and Rossi-Hansberg, 2002). However, these authors have failed to address a major issue, namely, the impacts of job decentralization on transport-related pollution and welfare when housing size adjusts. Therefore, we develop our model to include both endogenous housing demand and decentralization of jobs.

We find that decentralization of jobs within cities is not necessarily “the” strategy to reduce transport-related emissions and to improve welfare. Our analysis relies on the following trade-off. On the one hand, for a given population density, the average distance traveled by workers shrinks when the city shifts from a monocentric structure to a polycentric configuration. Hence, for a given housing size, job decentralization within cities

¹¹This chapter is associated with an original research paper (Denant-Boémont *et al.*, 2018), published in the *Journal of Environmental Economics and Management*

decreases carbon emissions by making commuting trips shorter. This is true as long as the city border remains unchanged. On the other hand, the average housing size would increase when jobs are located on the edge of the city since the average price of land diminishes. As a consequence, the city border expands away from the city center and the average commuting distance may rise. The increasing housing demand may therefore counteract the positive effects of the emergence of secondary business districts on commuting distances and carbon emissions.

Indeed, the net effect of this development on welfare depends on the characteristics of the transportation network within the city. More precisely, when housing size adjusts to urban forms through a change in land rents, a polycentric city is not desirable from welfare and ecological viewpoints when average travel speed and/or the number of roads directly connected with the inner city are low. More generally, our results show that the evaluation of urban policy effect on pollution emission must consider the long-run adjustments in housing size and density.

In our model, we assume that population density and land rents are decreasing with distance to jobs as housing demand is endogenous. However, we do not know whether our assumption is restrictive when we study the relationship between urban form and transport-related pollution. When we extend the city vertically, our results hold when wages are equal between business centers in cities. Then, we test our results when wages are endogenous in our polycentric city. We implicitly consider that wage rate does not adjust to a change in the size of labor markets. However, changes may occur due to a change in the number of individuals working in the CBD or in the SBD. Under endogenous wages, the gap between business centers increases with the size of the CBD so that the relationship between the size of the CBD and the wage gap remains negative. Hence, even if wages react to a change in urban form, our main results hold. Our analysis can also explain why the effects of employment decentralization in polycentric metropolitan areas on the patterns of commuting differ across empirical studies. For example, Giuliano and Small (1993) find that the decentralization of jobs shortens commuting trips, whereas Aguilera (2005) shows that polycentric cities cause potentially higher commuting distances than monocentric cities.

We show that a polycentric city is desirable from a welfare and ecological perspective, provided that travel speed and/or the number of roads directly connected with the city center are sufficiently high. Indeed, on the one hand, a polycentric city yields direct benefits through the value of induced travel savings for an unchanged residential location. On the other hand, a change in workplace location affects residential choice, as land rents decrease on average. As a consequence, the demand for housing increases so that the city

expands. Commuting flows and transport-related emissions grow. These indirect costs may outweigh direct benefits in realistic situations (Veneri, 2010). Overall, the spatial extension of cities remains the critical variable to curb transport-related urban pollution.

3.2 Chapter 2: Efficiency of road pricing schemes with endogenous workplaces in polycentric city.

In this second theoretical chapter, the urban model builds on the one used in the first chapter to study the impacts of three road pricing schemes (*Pigouvian tax*, *cordon toll* and *flat tax*) on the size of the CBD when two externalities (congestion and agglomeration) interplay in a polycentric city. Traffic congestion is modeled in line with the works of Arnott (2007), Verhoef (2005) and Tikoudis *et al.* (2015). First, the effects of road pricing schemes are evaluated within the monocentric city as a benchmark. Then, we focus on the changes in congestion level when a decentralization of jobs occurs. The size of the CBD as well as SBD are determined in equilibrium (“*Laissez-faire*”) and in optimum (a benevolent planner maximizes the welfare of inhabitants). Finally, we study the impacts of our three road pricing schemes in a polycentric city on congestion level, the size of the SBD and on aggregate welfare. We discuss the implementation of a second transport mode and car parks in the urban model in relation to tax effects.

Previous studies have often treated urban forms and traffic congestion separately when the monocentric city model has been used in theoretical contexts. A stream of literature has addressed the question of the optimum supply of road capacity in cities using the monocentric model with traffic congestion (Solow, 1972, 1974). Then, monocentric city models have been studied regarding the internalization of one or two externalities by Arnott (1979, 2007) and Wheaton (1998, 2004) in particular. More recently, several authors have focused on congestion management in partial equilibrium models of monocentric cities. A few authors have considered the polycentric city to analyze the impacts of urban congestion on wages, land rents, welfare and location choices of firms and households (Anas and Kim, 1996; Anas, 2013; Zhang and Kockelman, 2016a, 2016b). This literature is scarce and does not often deliver full analytical solutions. Numerical simulations are used to solve complex models, including a mix of labor market, production firms in cities, households, other firms and shopping centers of endogenous location with the externalities of congestion and agglomeration. In addition, we do not know precisely how the size of the CBD or SBD vary with road pricing schemes. To the best of our knowledge, this is the first study that delivers analytical solutions regarding the impacts of road pricing schemes on the size of the CBD when two externalities exist within a polycentric city.

The *Pigouvian tax* strategy fails to reach the optimum. This fact can be explained by two market failures: congestion and misallocation of jobs within the city. This kind of tax cannot “kill two birds”, namely, reducing the congestion externality for a given location of workplaces and yielding the optimal spatial allocation of firms. In equilibrium, the CBD’s size (residential area where workers live) is too large against the optimal size. There is a larger proportion of workers who are eager to commute toward the central city due to the CBD’s wage premium compared to the SBDs. As they do not take their social costs of congestion into account, they consider that the private marginal gain of being located closer to the CBD is greater than the marginal costs incurred by those who already live there. Work and residential places are interdependent in household location choices. For a given city size, the *Pigouvian tax* makes the CBD too small in a polycentric city. In other words, the SBD expands and increases the congestion externality of each road user around that workplace. This location-constrained first-best policy heavily corrects the congestion externality because of (i) the free location decisions of workers and (ii) the toll level capitalized in land rents. A flat tax and a cordon toll do not achieve an optimal location for the SBD. This chapter determines the effects of road pricing schemes, which have been demonstrated in the literature regarding the monocentric city. Tikoudis *et al.* (2015) use numerical simulations in a different context, including a labor tax in their model with road pricing schemes to study the tax-interaction effects. Their results make clear that a road toll is necessary and that welfare improves when no distortion exists on the labor market. Tikoudis *et al.* (2015) and Verhoef (2005) are in accordance to say that a flat kilometer tax is more efficient than a cordon toll in a monocentric structure. However, when a polycentric structure emerges, this result does not hold as the efficiency of the cordon toll and the flat tax depends mainly on the wage gap between the business centers before the implementation of the road pricing scheme. According to the initial location of the SBD (SBD too small or too large), a flat tax may be less (resp., more) harmful than a cordon toll.

In our model, we assume that population density is fixed in a closed-city model and that transport demand is inelastic. However, land rents decrease with distance to jobs even if housing demand is exogenous. We do not know whether our assumption is restrictive when we study the relationship between urban form and road pricing schemes in the long run. Indeed, implementation of road pricing schemes may force households not to travel to their workplace, which lowers labor supply, or switch to another mode of transport (Tikoudis *et al.*, 2015). In a system of cities, some households would migrate or travel toward a new workplace in a close city where taxes would be nonexistent or lower

than in their hometown. Politically, implementation of urban tolls generates public outcry and thus is scarcely used around the world (Fosgerau and De Palma, 2013). Public transport using a city's existing road capacity may increase transport costs of commuters but may also alter the wage premium in a CBD. It may have a counter-effect, such as forcing households to switch workplaces, thereby improving the attractiveness of the SBD where car use prevails, which would also cause urban sprawl. Clearly, further works are needed to analyze urban policies of density and congestion management in polycentric cities.

This chapter has measured the efficiency of three road pricing schemes (*Pigouvian tax*, *flat tax* and *cordon toll*) to address congestion externality when decentralization of jobs is endogenous. The model captures the fact that commuters face a trade-off between taking advantage of the CBD's wage premium and being stuck in traffic. The "Pigouvian tax" strategy fails to reach the social optimum due to the presence of two market failures in the urban economy: congestion and misallocation of jobs within the city. A "Pigouvian" tax cannot solve two different problems simultaneously, namely reducing congestion level for a given location of jobs and reaching the optimal spatial allocation of firms. Without regulation the number of jobs in the CBD is too large (and the congestion burden is excessive), while the "Pigouvian tax" generates a too low a size of CBD. In addition, a flat tax is not necessarily worse than a "Pigouvian" tax, in contrast to the cordon toll.

3.3 Chapter 3: Commuting and urban forms: case study of French municipality areas.

Finally, in this third chapter, we have collected data from the French national census to analyze the effects of urban forms on home-to-work distances and travel time during peak hours. Three periods are studied: 1999, 2007 and 2014. We use a distance meter called "Odomatrix" which is a tool that measures road accessibility on the French network. Municipal data are combined with a road database from the National Institute for Geographic and Forestry Information (IGN). First, we define four measures of urban form. Our main concern is the spatial organization of workplaces and population within the French urban areas. In a second step, we specify an econometric model in order to evaluate the relevance and the magnitude of the relationship between these urban form measures and home-to-work distances over three periods. Third, we focus on the impacts of urban forms on peak hour travel times and distances between dwellings and workplaces only in 2014. Finally, we conduct an analysis of the relationship between urban form measures at the municipal level and commuting times and distances in 2014.

In France, average traveled distances increased between 1990 and 2014. This increase was mainly due to urban sprawl and segregation of urban functions (living spaces vs. workplaces) (Coudène and Levy, 2016). The same phenomenon is observed in Western economies (Kahn, 2010; Garcia-Palomares, 2010; Aguiléra *et al.*, 2009). Urban densification is a current policy designed to reduce home-to-work distances and resulting energy consumption (transport, housing, etc.) (Larson and Yezer, 2015; Duranton and Turner, 2017; Blaudin de Thé *et al.*, 2018). However, the effects remain weak in the various empirical analyses. In addition, an increase in population density per square mile can lead to longer journey times (Priemus *et al.*, 2001; Schwanen *et al.*, 2004). Thus we consider focusing on the spatial organization of jobs within urban areas. We use four urban form measures as explanatory variables: (i) a ratio between the number of jobs in a central municipality and the total number of jobs in the urban area, (ii) a concentration index in the same vein as Herfindahl-Hirschmann, (iii) a spatial distribution index of population and jobs in the central municipalities and (iv) an index of the distribution of jobs and population within the municipalities of each urban area. Our objective is to determine those that are relevant in order to suggest a better targeting for urban policies.

Our econometric analyses yield a positive and significant relationship between the average traveled distances and the concentration of jobs in the central municipalities as well as in the urban areas where they are located. We obtain elasticities between commuting distances and jobs dispersion index between 0.22 and 0.26 for our cross-sectional analysis (1999, 2007 and 2014). Our analysis in 2014 yields relationships that are qualitatively similar. commuting times between dwellings and workplaces during rush hour. Our last counterfactual analysis confirms that if jobs and the labour force were equally distributed within an urban area, peak-hour travel times and home-to-work distances would decrease on average by 10% for the majority of municipalities, especially those located on the periphery. Our results highlight the significant elasticities between our dependent and explanatory variables but it would be necessary to test the causal effect of our urban forms measures by deepening our econometric analyses and experimenting a policy in situ.

This chapter adds on our two previous theoretical analyses. We have focused our empirical analysis on the relevance of spatial organization of jobs and population in order to pursue the question concerning polycentric cities design. We have estimated the effects of urban forms measures in relation to average commuting time and distances within French urban areas in our cross-sectional analysis from 1999 to 2014. In addition, the effects of the spatial distribution of jobs and dwellings in relation to average commuting time during peak-hours and to urban cores are estimated in 2014.

The greater geographical concentration of jobs in urban areas with respect to the population seems to significantly influence commuting time and distances. Density and distribution of employment locations may manage urban congestion. However, our estimates suggest relatively modest effects. In addition, our results show that commuting time and distances depend on many other parameters than the spatial distribution of jobs within urban areas (population density, demography, public transport, etc.).

4 References

Aguiléra, A. (2005). Growth in commuting distances in French polycentric metropolitan areas: Paris, Lyon and Marseille. *Urban studies*. 42: 1537–1547.

Aguiléra, A., Wengleski, S., et Proulhac, L. (2009). Employment suburbanisation, reverse commuting and travel behaviour by residents of the central city in the Paris metropolitan area. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 43(7): 685–691.

Alonso, W. (1964). Location and land use. Toward a general theory of land rent. Cambridge University Press. 204 p.

Alpkokin, P., Cheung, C., Black, J. et Hayashi, Y. (2008). Dynamics of Clustered Employment Growth and Its Impacts on Commuting Patterns in Rapidly Developing Cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 42(3): 427–444.

Anas, A. (2013). The Location Effects of Alternative Road-Pricing Policies, Chapter 6 in *Infrastructure and Land Policies*, eds. Ingram, Gregory K. and Karin L. Brandt. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.

Anas, A., Arnott R., and K.A. Small (1998). Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature*. 36: 1426–1464.

Anas, A., and Kim, I. (1996). General equilibrium models of polycentric urban land use with endogenous congestion and job agglomeration. *Journal of Urban Economics*. 40: 232–256.

Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., and Blei, A. M. (2011). Making room for a planet of cities. Policy Focus Report/Code PF027, Lincoln Institute of Land Policy.

Arnott, R. J. (1979). Unpriced transport congestion. *Journal of Economic Theory*. 21(2): 294–316.

Arnott, R. (2007). Congestion tolling with agglomeration externalities. *Journal of Urban Economics*. 62: 187–203.

Baum-Snow, N. (2007). Did highways cause suburbanization?. *The Quarterly Journal of Economics*. 122(2): 775–805.

Bertaud, A., and Brueckner, K. (2005). Analyzing building-height restrictions: predicted impact and welfare costs. *Journal of Urban Economics*. 35: 109–125.

Bhatt K. (2011). Congestion pricing: an overview of experience and impacts Gregory K. Ingram, Yu-Hung Hong (Eds.), Proceedings of the 2010 Land Policy Conference: Climate Change and Land Policies.

Blaudin de Thé, C., Carantino, B. and Lafourcade, M. (2018). The Carbon ‘Carprint’ of Suburbanization: New Evidence from French Cities. CEPR Discussion Paper No. DP13086. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3222602>

- Bongardt, D., Creutzig, F., Hüging, H., Sakamoto, K., Bakker, S., Gota, S., and Böhler-Baedeker, S. (2013). Low-carbon land transport: policy handbook. Routledge.
- Borck, R. (2016). Will skyscrapers save the planet? Building height limits and greenhouse gas emissions. *Regional Science and Urban Economics*. 58: 13–25.
- Breheny, M. (1995). The compact city and transport energy consumption. *Transactions of the institute of British Geographers*. 81–101.
- Brueckner, J. K. (2011). Lectures on urban economics. MIT Press. 283 p.
- Brueckner, J. K. (1987). The structure of urban equilibria: A unified treatment of the Muth-Mills model. *Handbook of regional and urban economics*. 2: 821–845.
- Burgalassi, D., and Luzzati, T. (2015). Urban spatial structure and environmental emissions: A survey of the literature and some empirical evidence for Italian NUTS 3 regions. *Cities*. 49: 134–148.
- Cavailhès, J. (2015). Localisation des activités économiques et la consommation de terres agricoles. *La Revue Foncière*. 4: 5–10.
- Cavailhès, J., Gaigné C., Tabuchi T. and Thisse J.-F. (2007). Trade and the structure of cities. *Journal of Urban Economics* 62: 383–404.
- Center for Economics and Business Research (2014). The future economic and environmental costs of gridlock in 2030. An assessment of the direct and indirect economic and environmental costs of idling in road traffic congestion to households in the UK, France, Germany, and the USA. 67 p.
- CGDD, (2010). La mobilité des Français, panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. *La Revue du CGDD*. Décembre 2010, Paris. 228 p.
- Chen, C. L. (2018). Tram development and urban transport integration in Chinese cities: A case study of Suzhou. *Economics of Transportation*. 15: 16–31.
- Cookson G. (2018). INRIX Global Traffic Scorecard. 44 p. Available at <http://inrix.com/scorecard/>, (visited on September 30, 2018).
- Coudène M., et Lévy D. (2016). "De plus en plus de personnes travaillent en dehors de leur commune de résidence", Insee Première numéro 1605, juin 2016.
- Duranton, G., and Puga, D. (2004). Micro-foundations of urban agglomeration economies. *Handbook of regional and urban economics*. 4: 2063–2117.
- Duranton, G., and Turner, M. A. (2011). The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities. *American Economic Review*. 101(6): 2616–2652.
- Duranton G. and Turner M.A. (2017). Urban form and driving: Evidence from US cities. Working paper, Brown University. 49 p.
- Eliasson J. and Mattsson L.-G. (2006). Equity effects of congestion pricing: Quantitative methodology and a case study for Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 40(7): 602–620.

Floater, G., Rode, P., and Zenghelis, D. (2013). Stockholm: green economy leader report.

Fosgerau, M., and De Palma, A. (2013). The dynamics of urban traffic congestion and the price of parking. *Journal of Public Economics*. 105: 106–115.

Fujita, M., and Krugman, P. (2004). The new economic geography: Past, present and the future. *Regional science*. 83(1): 139–164.

Fujita, M., and Thisse, J. F. (2013). Economics of agglomeration: cities, industrial location, and globalization. Cambridge university press. 528 p.

Fujita M. and Ogawa H. (1982). Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Regional science and urban economics* 12(2): 161–196.

Gagné C., S. Riou and J.-F. Thisse (2012) Are compact cities environmentally friendly? *Journal of Urban Economics* 72: 123–136.

GAO (2012). Traffic congestion. Road pricing can help reduce congestion but equity concerns may grow. Report to the subcommittee on Transportation, Housing and Urban development and Related Agencies, Committee on appropriations, House of Representatives. 60 p.

García-Palomares, J. C. (2010). Urban sprawl and travel to work: the case of the metropolitan area of Madrid. *Journal of Transport Geography*. 18(2): 197–213.

Giuliano, G., and Small, K. A. (1993). Is the journey to work explained by urban structure?. *Urban studies* 30: 1485–1500.

Glaeser, E. L. (2012). Triumph of the city: How our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier. Penguin.

Glaeser, E. L., and Kahn, M. E. (2010). The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of urban economics*. 67(3): 404–418.

Glaeser, E. L., and Kahn, M. E. (2004). Sprawl and urban growth. *Handbook of regional and urban economics*. 4: 2481–2527.

Guth, D., Holz-Rau, C., Maciolek, M., et Scheiner, J. (2010). Beschäftigungssuburbanisierung, siedlungsstruktur und Berufspendelverkehr: Ergebnisse für deutsche Agglomerationsräume 1999–2007. *Raumforschung und Raumordnung*. 68(4): 283–295.

Gwilliam, K. M. (2002). Cities on the move: a World Bank urban transport strategy review. The World Bank. 206 p.

Henderson, V. (2002). Urbanization in developing countries. *The World Bank research observer*. 17(1): 89–112.<http://documents.worldbank.org/curated/en/743171468151775418/Urbanization-in-developing-countries>

Hubert, J. P., Pistre, P., et Madre, J. L. (2016). L'utilisation de l'automobile par les ménages dans les territoires peu denses: analyse croisée par les enquêtes sur la mobilité et le Recensement de la population. *Economie et Statistiques*. (483–484–485), 179–203.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate change 2014: mitigation of climate change - Transport. Working group III (Vol. 3). Cambridge University Press. Potsdam. 599–670

International Energy Agency (2012). World Energy Outlook.

Kahn, M. E. (2010). New evidence on trends in the cost of urban agglomeration. *Agglomeration economics*. University of Chicago Press. 339–354.

Krugman, P.R (1991). Increasing returns and economic geography. *Journal of Political Economy*. 99: 483–499.

Laconte, P. (2005). Urban and transport management-international trends and practices. In International Symposium “Sustainable Urban Transport and City”. Shanghai, Tongji University and Nagoya University.

Larson W., Yezer A. (2015). The energy implications of city size and density. *Journal of Urban Economics* 90: 35–49.

Legras, S. and Cavailhès, J. (2016). Environmental performance of the urban form. *Regional Science and Urban Economics*. 59: 1–11.

Lucas Jr, R. E., and Rossi-Hansberg, E. (2002). On the internal structure of cities. *Econometrica*. 1445–1476.

Manville, M., and Shoup, D. (2005). Parking, people, and cities. *Journal of Urban Planning and Development*, 131(4), 233-245.

Mills, E.S. (1967). An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. *American Economic Review*. 57: 197–210.

Mirabel François, Reymond Mathias (2013). Économie des transports urbains, Paris, La Découverte « Repères ». 128 p.

Muñiz, I., and Galindo, A. (2005). Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics*. 55(4): 499–514.

Muth, R.F. (1969). *Cities and Housing*. Chicago: University of Chicago Press.

Naess, P. et Sandberg, S.L. (1996). Workplace Location, Modal Split and Energy Use for Commuting Trips’, *Urban Studies*. 33(3): 557–580.

Newman, P. W., and Kenworthy, J. R. (1989). Gasoline consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey. *Journal of the american planning association*. 55(1): 24–37.

OECD (2014a). Cities and Climate Change: National government enabling local action. OECD Publishing, Paris. 21 p.

OECD (2014b). The Cost of Air Pollution: Health Impacts of Road Transport, OECD Publishing, Paris.

OECD (2012). Compact City Policies: A Comparative Assessment. OECD Growth Studies, OECD. Éditions OCDE, Paris. Disponible à <http://dx.doi.org/10.1787/>

[9789264167865-en](#).

Pouyanne, G. (2007). Note de recherche. Une estimation du lien entre forme urbaine et choix modal. Le cas de six aires urbaines françaises. *Revue d'Économie Régionale et Urbaine*. (3), 521–541.

Priemus, H., Nijkamp, P., and Banister, D. (2001). Mobility and spatial dynamics: an uneasy relationship. *Journal of transport geography*. 9(3): 167–171.

Puga, D. (2010) The magnitude and causes of agglomeration economies. *Journal of Regional Science*. 50: 203–219.

Raux, C., and Souche, S. (2004). The acceptability of urban road pricing: A theoretical analysis applied to experience in Lyon. *Journal of Transport Economics and Policy*. 38(2): 191–215.

Roca, J. D. L., and Puga, D. (2017). Learning by working in big cities. *The Review of Economic Studies*. 84(1): 106–142.

Rode, P., Floater, G., Thomopoulos, N., Docherty, J., Schwinger, P., Mahendra, A., and Fang, W. (2014). Accessibility in Cities: Transport and Urban Form. NCE Cities Paper 03. LSE Cities. London School of Economics and Political Science. 61 p.

Santos, G., (2005). Urban congestion charging: a comparison between London and Singapore. *Transport Reviews*. 25(5): 511–534.

Schwanen, T., Dieleman, F. M., et Dijst, M. (2004). The impact of metropolitan structure on commute behavior in the Netherlands: a multilevel approach. *Growth and change*. 35(3): 304–333.

Segal, D., and Steinmeier, T. L. (1980). The incidence of congestion and congestion tolls. *Journal of Urban Economics*. 7(1): 42–62.

Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G. C., Dewar, D., ... and McMahon, J. (2014). Human settlements, infrastructure and spatial planning. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Sheppard, S. (2004). Land use regulation and its impact on welfare. *Contributions to Economic Analysis*. 266: 285–316.

Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M. J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J. J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014: Transport. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and

J.C. Minx (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Small, K. A., and Verhoef, E. T. (2007). *The economics of urban transportation*. Routledge. 276 p.

Solow, R. M. (1973). Congestion cost and the use of land for streets. *The Bell Journal of Economics and Management Science*. 602–618.

Solow, R. M. (1972). Congestion, density and the use of land in transportation. *The Swedish journal of economics*. 161–173.

Storper, M. (2013) Keys to the City: How Economics, Institutions, Social Interaction, and Politics Shape Development. Princeton University Press (July 2013).

Suzuki, H., Cervero, R., and Iuchi, K. (2013). Transforming cities with transit: Transit and land-use integration for sustainable urban development. World Bank Publications.

Tikoudis, I., Verhoef, E. T. and van Ommeren, J. (2015), On revenue recycling and the welfare effects of second-best congestion pricing in a monocentric city. *Journal of Urban Economics*. 89: 32–47.

UNEP (2011). Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. *UNEP*. [online]. <http://web.unep.org/greeneconomy/resources/green-economy-report>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352).

UN-Habitat (2013). Planning and design for sustainable urban mobility: Global report on human settlements. United Nations Human Settlements Programme. 78 p.

Veneri, P. (2010). Urban polycentricity and the costs of commuting: evidence from italian metropolitan areas. *Growth and Change*. 41(3): 403–429.

Verhoef, E. T. (2005). Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city. *Journal of Urban Economics*. 58(3): 367–388.

Wheaton, W. C. (2004). Commuting, congestion, and employment dispersal in cities with mixed land use. *Journal of Urban Economics*. 55: 417–438.

Wheaton, W. C. (1998). Land use and density in cities with congestion. *Journal of urban economics*. 43: 258–272.

Williamson, O. E. (1981). The economics of organization: The transaction cost approach. *American journal of sociology*. 87(3): 548–577.

World bank (2002). Cities on the move : a World Bank urban transport strategy review.

Zhang, W., and Kockelman, K. M. (2016a). Congestion pricing effects on firm and household location choices in monocentric and polycentric cities. *Regional Science and Urban Economics*. 58: 1–12.

Zhang, W., and Kockelman, K. M. (2016b). Optimal policies in cities with congestion and agglomeration externalities: Congestion tolls, labor subsidies, and place-based strategies. *Journal of Urban Economics*. 95: 64–86.

Zheng, S., Wang R., Glaeser E. and Kahn M. (2011). The greenness of China: household carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Economic Geography*. 11(5): 761–792.

Chapter 1

Urban spatial structure,
transport-related emissions and
welfare.

1 Introduction

According to the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations (United Nations, 2014), the global urban population has exceeded the rural population since 2007, amounting to 4 billion persons in 2014. Moreover, forecasts are consistent with skyrocketing urban growth in which 66% of the world population will live in an urban area by 2050. A striking feature of urban development is that the average floor space per capita tends to increase strongly and the spatial extension of a city increases more than proportionally with population size. For instance, the average living space per capita increased by 80% in the US between 1975 and 2005 (Calwell, 2010 and Xue *et al.*, 2014). A similar trend is also observed in European countries (Naess and Vogel, 2012) and OECD countries, where the average dwelling size increased by 10% between 1990 and 2004 (Birol, 2007). One consequence of the growing urban population and housing size per inhabitant is the spread of urban areas into rural areas (urban sprawl) in such a way that the spatial size of cities rises more than proportionally with their number of inhabitants. For example, the land allocated to residential areas increased by 48% between 1976 and 1992 in the US, while the urban population increased by 18% (Overman *et al.*, 2008).¹ Hence, traveled distances within urban areas rise strongly when the urban population grows because the land area assigned to these cities expands. As a consequence, an important drawback of urbanization is that it positively affects the level of greenhouse gas (GHG) emissions through the growth of the energy services required for lighting, heating, and cooling (Hoornweg *et al.*, 2010), but also coming from increasing traffic demand (Hickman and Banister, 2014 ; Litman, 2015).

Technological progress and increasing motor efficiency are likely to be insufficient to curb the pollution level associated with the transport of people within cities (European Environment Agency, 2007). Regarding technological progress and fuel efficiency, Larson *et al.* (2012) recall that increased fuel efficiency is partly offset by a "rebound" effect in which driving increases, due to a latent demand effect. For instance, Sorrel (2007) gives empirical evidence for this rebound effect, meta-analysis suggesting a value between 10 to 30% for it. Goulden *et al.* (2014) also emphasize that absolute decoupling between transport and emissions could only come from widespread electrification of vehicles, which should be very costly and does not solve indirect emissions issues. In France, similar evidence of

¹As suggested by Rode and Floater (2014), long-run analysis of population densities in cities suggests that there are certain trends towards de-densification. By using a representative sample of cities in developed countries, Angel *et al.*, (2005) estimated that while urban populations grew approximately 5 per cent between 1990 and 2000, their built-up area increased by 30 per cent. Angel *et al.* (2005) also observed that average densities decline by 22 per cent during the same period.

a rebound effect had been provided by Levy and Le Jeannic (2011). Between 1990 and 2007, technological gains enable a decrease of 13.2% of CO_2 emissions coming from private vehicles if the total distance traveled by workers would be constant. At the same time, average trip distance and population size have increased more rapidly than technological gains, offsetting it. The total evolution of CO_2 emissions stemming from private cars had finally increased from 10% during that period. Another problem related to better energy efficiency and decrease in commuting costs is provided by Brueckner (2011), as empirical evidence suggests that the elasticity of urban area land to commuting cost could be between -0.3 and 0, which suggests that fuel efficiency improvements causing a decrease in commuting costs could entail increasing commuting distances.

As improvements in energy efficiency are likely to be insufficient to stabilize the transport-related pollution in cities, policy makers and urban planners need to consider other initiatives to mitigate urban pollution². As noted by Floater *et al.*, (2014) and Burgalassi and Luzzati (2015), the environmental impacts of urbanization may depend on differences in spatial structures and their dynamics. In other words, urban forms play a key role in the carbon emissions. For instance, for a given population, higher population density is associated with lower levels of emissions (Glaeser and Kahn, 2010; Zheng *et al.*, 2011). By increasing the share of public transport, high density induces relatively low carbon emissions. In addition, an important factor of transport demand is the imbalance of housing *vs.* jobs, that is, the distance between dwellings and workplaces (Bento *et al.*, 2005). Longer commuting flows are caused by the development of jobs in the inner city while workers live farther away from the city center. The decentralization of jobs through the creation of subcenters within a city (*i.e.*, the formation of a polycentric city) may also be a strategy to reduce the amount of commuting and improve global welfare (Gaigné *et al.*, 2012). Public authorities may control the intra-city distribution of firms to decrease the average distance traveled by workers.³

From the ecological and economic efficiency viewpoints, the polycentric city is seductive at a first glance (Anas *et al.*, 1998; Bertaud, Lefèvre and Yuen, 2011). Because there are many job centers, the average distance between a household's residential place and workplace is expected to be shorter than the corresponding distance in a monocentric city.

²An important issue to tackle the problem between energy consumption, emissions and urbanization, not discussed in this paper, is about optimal taxation of externalities coming from urban sprawl, *e.g.*, traffic congestion and pollution. These dimensions are discussed, among others, by Larson *et al.*, (2012) and Borck and Brueckner, (2016).

³The decentralization of jobs in a few subcenters within cities is observed in London, Paris, Los Angeles and even Mexico, which have become polycentric cities in the past few decades (Storper, 2013).

Hence, the development of secondary business districts would decrease the total distance traveled by workers and, in turn, shrink carbon emissions due to a lower traffic volume and land rents (see Gaigné *et al.*, 2012; Legras and Cavailhès, 2016). However, when assessing the impact of decentralization of jobs on carbon emissions, the existing literature has failed to address a major issue. Indeed, the housing size is assumed to be given, so the population density is constant. Instead, the effects of urban spatial structure should be analyzed within a framework in which housing size is endogenously determined in response to the location of jobs and land rents. Urban housing size cannot be considered independently from the urban form.⁴

The objective of this paper is to assess the impacts of job decentralization on transport-related pollution and welfare when housing size reacts to a change in workplace location. Some studies provide the theoretical micro-foundations of the formation of polycentric cities when the housing size is endogenous (Fujita and Ogawa, 1982; Anas and Kim, 1996; Lucas and Rossi-Hansberg, 2002). However, they do not study the impact of the emergence of polycentric cities on urban pollution and welfare. To reach our goal, we develop a simple model in which housing demand and job decentralization are endogenous. However, our model delivers full analytical solutions and captures in a simple way (i) the fact that population density is higher in the central city than at the city outskirts, in accordance with the empirical evidence; (ii) the fact that the share of jobs established in subcenters grows with city size and lowers commuting costs and (iii) the basic trade-off between long/short commutes, low/high land rents, and high/low housing size.

We argue that developing subcenters within cities, that is, evolution toward a polycentric structure, is not necessarily the best strategy to reduce commuting flows and to improve welfare. Our analysis relies on the following trade-off. On the one hand, for a given population density, the average distance traveled by workers shrinks when the city shifts from a monocentric structure to a polycentric configuration. Hence, for a given housing size, job decentralization within cities decreases carbon emissions by making commuting trips shorter. This is true as long as the city border remains unchanged. On the other hand, the average housing size would increase when jobs are located on the edge of the city since the average price of land diminishes. As a consequence, the city border expands away from the city center and the average commuting distance may rise. The increasing housing demand may therefore counteract the positive effects of the emergence of secondary business districts on commuting distances and carbon emissions.

⁴Legras and Cavailhès (2016) consider three different lot sizes. However, the authors assume that lot sizes are exogenously given and disregard their effects on welfare.

Indeed, the net effect of this development on welfare depends on the characteristics of the transportation network within the city. More precisely, when housing size adjusts to urban forms through a change in land rents, a polycentric city is not desirable from welfare and ecological viewpoints when average travel speed and/or the number of roads directly connected with the inner city are low. More generally, our results show that the evaluation of urban policy effect on pollution emission needs to consider the long-run adjustments in housing size and density. In a different context, Arnott (1979) and Borck (2016) find that the impacts of transport policies and building height restrictions differ when housing size adjusts.

Our analysis can also explain why the effects of employment decentralization in polycentric metropolitan areas on the patterns of commuting differ across empirical studies. For example, Giuliano and Small (1993) find that the decentralization of jobs shortens commuting trips, whereas Aguilera (2005) shows that polycentric cities cause potentially higher commuting distances than monocentric cities. Therefore, the *spatial extension* of cities remains a critical variable to curb transport-related pollution.

The chapter is organized as follows. In the first section, we describe our model. We discuss in Section 3 the levels of welfare and pollution when the city is monocentric or when the city is polycentric in Section 4. Section 5 provides extensions of our framework to check the robustness of our main results. The last section concludes⁵.

2 A simple model

Our framework extends the model developed in Cavailhès *et al.*, (2007). Lot size is endogenously determined within a city endowed with $L > 0$ workers. They are free to choose their residential location and their workplace and can consume two goods: land, which is used as a proxy for housing, and the numéraire⁶. Urban land is exclusively devoted to residential purposes – firms do not use land and therefore do not compete for it – and transportation capacity is supplied without land. Workers travel only for commuting purposes⁷. We also assume that there is no vacant land at the residential equilibrium.

⁵This chapter is associated with an original research paper (Denant-Boemont *et al.*, 2018), published in the *Journal of Environmental Economics and Management*.

⁶For simplicity, we assume that land is owned by absentee landlords.

⁷We neglect shopping and leisure trips in that framework. According to CGDD (2010) for France and AASHTO (2013) for the US, commuting trips represent approximately 1/4 of total local trips for households.

The city is endowed with $m \geq 1$ residential areas, which are connected only to the central business district (CBD). Formally, the city is described by m one-dimensional half-lines sharing the same initial point $x = 0$. Distances and locations to the CBD are expressed by the same variable x measured from 0. Hence, the city is characterized by a hub-and-spoke transportation network in which m is also the number of spokes. Such a spatial representation of the city allows us to study the role of the transportation network structure in the efficiency of urban forms. The city is assumed to be symmetric around the CBD. The limit of the city in each residential area is given by y so that the total residential area is my . Firms are located either in the CBD or in a secondary business district (SBD). Each residential area/spoke hosts at most one SBD. The location of the SBD z_P along each spoke is determined endogenously.

Workers share the same quasi-linear utility function, given by⁸

$$U = q + \sqrt{h} - \mu E, \quad (1.1)$$

where q is the consumption of the numéraire, h is the consumption of housing floor space, and E is a *negative externality* related to the total emission of pollution at the city level generated by commuting flow. The parameter μ captures the magnitude of the disutility arising from urban pollution. Our utility function assumes that the demand for housing does not vary directly with income. As we will see below, the bid rents offered by workers depend on income due to commuting time such that income affects a worker's residential choice.

We consider that $E = \varepsilon C$, where C is the sum of the distance traveled by workers and ε is the amount of carbon dioxide generated by one unit of distance traveled by a worker. The value of ε depends on the technology used (less-fuel-intensive and non-fuel vehicles, eco-driving and cycling) and on the commuting mode (public transportation versus individual cars). For simplicity, we assume that ε is a given parameter that is independent from city size and compactness⁹. Because the terms μ and ε will always appear together throughout this paper, we find it convenient to set $\zeta \equiv \varepsilon \times \mu$.

⁸Using a Cobb-Douglas utility function does not qualitatively change our results.

⁹Because collective forms of transport are more viable in larger and/or more compact cities, one would expect ε to be a decreasing function of city size and/or compactness. Although we treat ε as a parameter, we will discuss what our results become when ε varies.

The time constraint of a worker located at x is given by

$$1 = \ell + \tau |x - z_i|, \quad (1.2)$$

where ℓ is the amount of labor time and $\tau |x - z_i|$ is commuting time from her residential location x to the location of the business district z_i with $z_i = 0$ (resp., $z_i = z_P$) if her job is located in the CBD (resp., SBD)¹⁰. Hence, $\tau > 0$ is the travel time per unit of distance. As a consequence, the parameter τ can also be interpreted as the inverse of average travel speed in the city. The budget constraint of a worker located at x can be written as follows:

$$\omega_i \ell(x) = q + \frac{R(x)}{\delta(x)} h(x) + t(x), \quad (1.3)$$

in which ω_i is the wage rate per time unit with $\omega_i = \omega_0$ (resp., $\omega_i = \omega_P$) if her job is located in the CBD (resp., SBD). The wage rates are treated as exogenous parameters and could vary across business districts within the city, in accordance with empirical evidence (Timothy and Wheaton, 2001). The parameter $t(x)$ represents the monetary costs of commuting between one's workplace and one's residence¹¹, and $R(x)$ is the land rent at x . Because $\delta(x)$ is the housing floor space per unit of land at distance x , $R(x)/\delta(x)$ is the price per floor space unit paid by a consumer living at x . Accordingly, in a competitive market framework, the household that makes the highest bid gets the housing at x , in line with Alonso (1964). Without loss of generality, we assume that $t(x) = 0$ and $\delta(x) = 1$. Hence, workers face a trade-off between the level of land rent to pay, the commuting costs (measured as the opportunity cost of time) and the size of their housing.

Utility (1.1) maximization under the budget constraint (1.3) and the time constraint (1.2) leads to the individual demand for housing

$$h(x) = \frac{1}{4R(x)^2}. \quad (1.4)$$

As expected, the housing size at x decreases with the price $R(x)$ paid by a consumer to reside at x . It follows that we abstract from a direct effect of income on the demand for housing. This point is discussed below. As a result, the indirect utility is given by

$$V(x) = \omega_i(1 - \tau |x - z_i|) + \frac{1}{4R(x)} - \zeta C, \quad (1.5)$$

in which we have plugged (1.3), (1.2) and (1.4) into (1.1). Note that high land rents induce low housing size per resident at each location, given the exogenous supply of hous-

¹⁰In this context, time granted to leisure activities is excluded without loss of generality.

¹¹Fuel, maintenance and insurance costs of car owners.

ing floor space. The indirect utility depends on the pollution externality associated with commuting flows ζC , as well as the income net of commuting time cost and land rents $(\omega_i(1 - \tau |x - z_i|) + 1/[4R(x)])$. The latter term is called *private welfare* because it corresponds to the consumption of private goods. Private welfare is driven by the urban spatial structure, which is determined endogenously regarding the locations of SBDs and city limit.

3 The monocentric city

We begin with a spatial structure commonly used in the urban economics literature: the monocentric city. There is a single business district (the CBD). Workers choose their living place within the city to maximize their utility, such that their residential choice depends on the price paid for housing, the size of housing and commuting time. At the city equilibrium, each worker maximizes her indirect utility (1.5), and markets clear. The opportunity cost of land is R_A at the fringe. The equilibrium land rent at each location is given by $R(x) = \max \{\Psi(x), R_A\}$, where $\Psi(x)$ is the bid rent. Given $V(x)$, the bid rent must solve $\partial V(x)/\partial x = 0$. At the city equilibrium, all workers reach the same indirect utility level. Accordingly, the distribution of urban dwellers is such that $V(x) = V(y)$ regardless of x and $R(y) = R_A$. Hence,

$$V(y) = \omega_0 - \omega_0 \tau y + \frac{1}{4R_A} - \zeta C. \quad (1.6)$$

and the bid rent function is given by

$$\Psi(x) = \frac{R_A}{1 - 4\omega_0 \tau (y - x) R_A}, \quad (1.7)$$

so that the individual demand for housing at the equilibrium is given by

$$h(x) = 4 \left[\frac{1}{4R_A} - \omega_0 \tau (y - x) \right]^2. \quad (1.8)$$

In equilibrium, the land rent depends on the housing floor space per unit of land, the opportunity cost of land, the wage rate, the time spent per unit of distance for a commuting trip within the city and the location x . The equilibrium land rent decreases with respect to the distance x from the CBD. Meanwhile, the housing demand increases. As each household reaches the same utility whatever her/his location x , there is a trade-off between the rent cost and housing size. Notice that the bid rent equals the opportunity cost of land R_A when a worker is located at the city border ($x = y$). The size of housing achieves its

maximal value at the city limit. The city border y_M solves the total population constraint given by

$$L = m \int_0^{y_M} l(x) dx \quad (1.9)$$

in which $l(x)$ is the population density at x with $l(x) = 1/h(x)$. Solving (1.9) by using $l(x) = 1/h(x)$ and (1.8) implies that the equilibrium city border is given by

$$y_M = \frac{1}{4R_A} \frac{L/m}{R_A + \omega_0 \tau L/m}, \quad (1.10)$$

when all jobs are located in the CBD (see Appendix A for the details). It is straightforward to check that the city border decreases with respect both to income ω_0 and commuting time τ as the opportunity cost of travel time increases. Under this configuration, the workers have an incentive to live close to the CBD, rising the land rent and, in turn, reducing the average size of housing. Increasing the number of residential areas around the CBD (m) makes the city more compact, as the city border shrinks. Inserting (1.10) in (1.6) yields the individual welfare in equilibrium

$$V_M = \omega_0 + \frac{1}{4R_A} \left(1 + \frac{\omega_0 \tau L}{m R_A} \right)^{-1} - \zeta C_M, \quad (1.11)$$

when the city is monocentric, where C_M is the total distance traveled by commuters within the city with

$$C_M = \frac{m}{4\omega_0^2 \tau^2} \left[\ln \left(1 + \frac{\omega_0 \tau L}{m R_A} \right) - \frac{\omega_0 \tau L}{m R_A + \omega_0 \tau L} \right]. \quad (1.12)$$

The details of the calculations are reported in Appendix B. Some standard calculations reveal that an increase in the population size increases total distance traveled by workers as the city border increases. As households face higher land rents when the city limit expands (see (1.7)), the demand for housing diminishes near the city center. As a result, the population density increases, even if a fraction of workers relocate farther away from the CBD. However, the individual welfare decreases with population size as long as the wage rate remains unchanged. Having a growing population therefore has two negative effects. First, it reduces private welfare because the land rent increases. Second, it induces longer travel distances and more pollution, which negatively affects the global welfare.¹²

It should be noted that, if a lower travel speed (or a higher τ) generates a more compact city (*i.e.*, the distance traveled by the urban workers living furthest away decline),

¹²Note that the population increase has no effect on wage rates and on the diversity of goods available in the city.

the effects are ambiguous on welfare V_M when transport-related pollution affects utility. As in the standard urban model, the net income of workers decreases with commuting time without pollution. In contrast, the total distance traveled by commuters decreases with commuting cost ($dC_M/d\tau < 0$, see Appendix B). Indeed, workers have a clear incentive to move closer to the city center when commuting cost increases, as households dislike spending time commuting. In this case, the average size of housing decreases, implying a fall in commuting flows and, in turn, in transport-related emissions.

The number of roads directly connected to the CBD (m) may also be a tool to improve the efficiency of the city. A higher m reduces the distance traveled by the urban worker living furthest away (y_M decreases). For a given housing size, more roads connected to the CBD make the city more compact and reduce pollution. However, when the housing size adjusts, the effect is ambiguous on C_M . Indeed, the total residential area of the city (measured by my_M) or the average size of housing increases with the number of roads, which implies that the total distance traveled by commuters increases ($dC_M/dm > 0$, see Appendix B). In contrast, private welfare increases with the number of residential areas.

We summarize our results as follows,

Proposition 1. *Assume a monocentric city. Higher travel speed (lower τ) or more roads directly connected to the CBD (higher m) improves private welfare but magnifies the negative externality arising from transport-related emissions.*

4 The polycentric city

In this section, we determine the spatial equilibrium when a share of firms can be located in the SBDs. Individuals choose their workplace (CBD or SBD) for given wages and land rents. At the spatial equilibrium, no worker wants to change her working place or residence. The distribution of workers is such that $dV(x)/dx = 0$. Both the CBD and the SBDs are surrounded by residential areas occupied by consumers. All the land is used for housing over the interval $[0, y]$. Denote by $\hat{z}$ the right endpoint of the residential area formed by individuals working in the CBD (or, equivalently, the left endpoint of the residential area formed by individuals working in the SBD, see Figure 1.1). We assume, without loss of generality, that the SBD is located in the middle point of the residential area in which the individuals work in the SBD. There is no reason why the distribution of workers around z_p should be not symmetric. Hence,

$$z_P = \frac{\hat{z} + y_P}{2}. \quad (1.13)$$

Therefore, the bid rents at y_P and $\hat{z}$ are equal and reach the opportunity cost of land R_A .

Size of SBDs, housing size and city limit. The worker living at $\hat{z}$ is indifferent between working in the CBD or in the SBD, which implies

$$\omega_0(1 - \tau\hat{z}) = \omega_P[1 - \tau(z_P - \hat{z})]. \quad (1.14)$$

We assume that $\omega_P = \mu\omega_0$ with $0 < \mu < 1$, which measures the magnitude of the spread between the two business districts. Empirical evidence shows that firms are able to pay lower wages in SBDs. For example, Timothy and Wheaton (2001) report large variations in wages according to intra-urban location (15% higher in central Boston than in outlying work zones, 18% between central Minneapolis and the fringe counties). According to Baum-Snow and Pavan (2012), agglomeration economies arise mainly within the central city, which explains why the wage rate is higher in the CBD. In addition, even though the wage rate is lower in the SBD than in the CBD, the former remains attractive because the wage net of commuting cost (for the worker) may be higher in the SBD than in the CBD.

Hence, the location of the worker being indifferent between working in the CBD or in the SBD located at a distance z_P from the CBD is given by,

$$\hat{z}(y_P) = \frac{2(1/\mu - 1) + \tau y_P}{\tau(2/\mu + 1)}, \quad (1.15)$$

in which we have inserted $\omega_P = \mu\omega_0$ and (1.13) in (1.14). It follows that $\hat{z}$ increases with $1/\mu$. As expected, higher wage rates in the CBD than in the SBD make the former more attractive. The size of the CBD (measured as the number of individuals working in the CBD) increases at the expense of the size of the SBDs. Conversely, a wage decline in the CBD leads to urban sprawl as long as the wage rate in the SBDs is unchanged. Indeed, as the CBD becomes less attractive in terms of relative wage, the demand for housing decreases near the CBD and rises near the SBD. There exists a limit value of ω_P/ω_0 ($\underline{\mu}$) below which the city is always monocentric, as given by $\hat{z}(\underline{\mu}) = y_P$ or, equivalently, $\underline{\mu} = 1 - \tau y_P$. Hence, a polycentric city emerges if and only if $\underline{\mu} > 1 - \tau y_P$. The size of the SBD in terms of jobs grows with μ and reaches its maximum size when $\mu = 1$ (so that $\hat{z} = y_P/3$). In other words, $y_P > \hat{z} \geq y_P/3$.

Further, when the city is polycentric, the equilibrium land rent is given by $R_P(x) = \max\{\Psi_0(x), \Psi_P(x), R_A\}$ where $\Psi_0(x)$ (resp., $\Psi_P(x)$) is the bid rent of individuals working in the CBD (resp., SBD). As $\partial V(x)/\partial x = 0$, the bid rents around the CBD and the SBDs

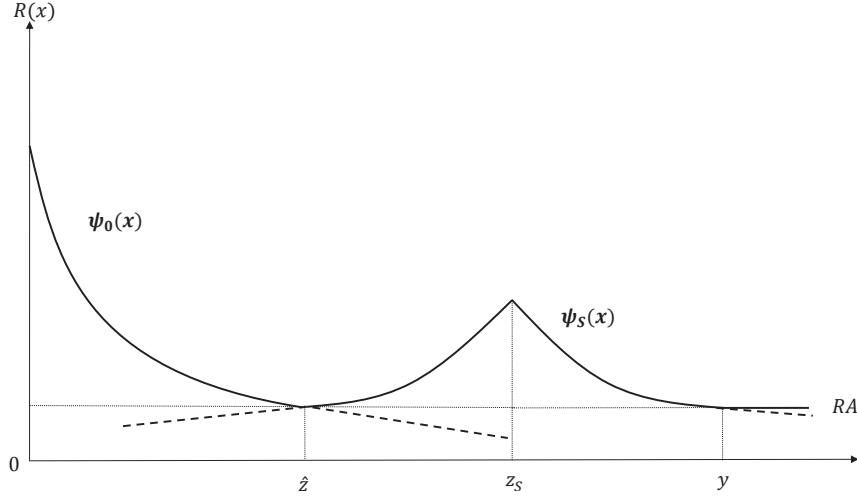


Figure 1.1: Upper envelope of the bid rents in equilibrium and location of CBD limit $\hat{z}$, and limit y_P of the polycentric city.

are given by, respectively,

$$\Psi_0(x) = \frac{R_A}{1 - 4\omega_0\tau(\hat{z} - x)R_A} \quad \text{and} \quad \Psi_P(x) = \frac{R_A}{1 - 4\omega_P\tau\left[\frac{y_P - \hat{z}}{2} - |z_P - x|\right]R_A}.$$

The bid rents decrease with the distance to the business districts (see Figure 1.1). As a result, the equilibrium housing demands for individuals working in the CBD and in the SBD are respectively given by

$$h_0(x) = 4 \left[\frac{1}{4R_A} - \omega_0\tau(\hat{z} - x) \right]^2 \quad \text{and} \quad h_P(x) = 4 \left[\frac{1}{4R_A} - \omega_P\tau \left(\frac{y_P - \hat{z}}{2} - |z_P - x| \right) \right]^2. \quad (1.16)$$

It is straightforward to check that land rent decreases and the housing size grows when the city becomes polycentric, whereas the city boundary is unchanged (see Appendix C). In addition, the bid rents and housing size remain identical for all $x \in [z_P, y_P]$ when a SBD is created if y_P is unchanged. Since the land rent declines and demand for housing rises at distances lower than z_P , the urban fringe must move outward when the economy shifts from a monocentric city to a polycentric city. As the population constraint is non-linear, the expression of the equilibrium city border is implicitly defined. In Appendix D, we show that the city limit is such that

$$\frac{4R_A^2\hat{z}(y_P)}{1 - 4\omega_0\tau\hat{z}(y_P)R_A} + \frac{4R_A^2[y_P - \hat{z}(y_P)]}{1 - 2\mu\omega_0\tau[y_P - \hat{z}(y_P)]R_A} = \frac{L}{m}. \quad (1.17)$$

Hence, equations (1.15) and (1.17) allow us to determine the equilibrium city limit and the equilibrium size of the CBD (in terms of jobs). Notice that if $z = y_P$, then we fall back on the monocentric configuration and $y_P = y_M$. As a result, if a city becomes polycentric, then $\hat{z} < y_M$, so that the population constraint can hold. It is also straightforward to check that $y_P > y_M$ for all $0 < \hat{z} < y_M$ ¹³. Hence, as the average land rent decreases, households receive higher utility from larger housing, which explains the lower average population density¹⁴. Consequently, the housing size effect causes a shift in the city limit y_M . Notice that workers reside gradually closer to the CBD in tinier housing because of their higher value of time when the wage rate in the CBD increases ($1/\mu$ increases).

We summarize our results as follows,

Proposition 2. *The demand for housing increases when the city moves from a monocentric configuration to a polycentric one for a given city border. Therefore, the city limit moves outward when the city becomes polycentric in equilibrium.*

This proposition shows that it is crucial to capture long-run adjustments in the urban housing market in order to study the effect of urban forms on welfare and pollution. Because the city border increases, the effects of a relocation of jobs farther away from the CBD on commuting distances and, in turn, on welfare are ambiguous. Indeed, we have

$$V_P - V_M = \omega_0 \tau \left[y_M - \frac{\mu}{2 + \mu} y_P - \frac{2(1 - \mu)}{\tau(2 + \mu)} \right] - \zeta(C_P - C_M) \quad (1.18)$$

where we have used (1.5) for a worker living at the city border in the monocentric city (V_M) and for a worker who is indifferent between working in the CBD and in the SBD in the polycentric city (V_P). In order to disentangle the different effects at work, we first analyze the case where the wage rates in the CBD and the SBDs are equal. Then, in accordance with empirical evidence, we assume that workers receive a higher wage rate in the CBD than in the SBDs.

No wage gap between the CBD and the SBDs. For simplicity, we first consider that $\omega_P = \omega_0$ ($\mu = 1$) so that $\hat{z} = y_P/3$. In this case, the housing size grows at sites close to the CBD ($x \leq \hat{z}$) and sites located between $\hat{z}$ and z_P when the city becomes polycentric, whereas y_P is unchanged. In addition, the bid rents and housing size remain identical for all $x \in [z_P, y_P]$ when a SBD is created if y_P is unchanged and there is no wage wedge in the city (see Appendix C).

¹³According to (1.17), we have $y(z = 0) > y(z = y_M)$ and $\left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{z=0} > 0 > \left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{z=y_M}$. In addition, $y(z)$ has a single extremum when $z \in [0, y_M]$, which is a maximum.

¹⁴In their urban energy footprint model (UEFM), Larson *et al.*, (2012) demonstrate that a decrease in housing costs also leads to demand for a larger lot size. The structural density is also decreasing, as in our theoretical model.

Using the population constraint (1.17) and $\hat{z} = y_P/3$, the equilibrium border when the city is polycentric is expressed as follows

$$y_P = \frac{1}{4R_A} \frac{L/m}{R_A + \omega_0 \tau L/3m}. \quad (1.19)$$

As expected, the city limit expands when jobs relocate in the SBDs since $y_P > y_M$. The effects of a relocation of jobs farther away from the CBD on commuting distances and welfare are ambiguous. Indeed, the individual welfare is now given by

$$V(y_P) = \omega_0 + \frac{1}{4R_A} \left(1 + \frac{\omega_0 \tau L}{3mR_A}\right)^{-1} \left(1 - \frac{2\omega_0 \tau L}{3R_A m}\right) - \zeta C_P, \quad (1.20)$$

where C_P is total commuting distances within a polycentric city (see Appendix C for details):

$$C_P = \frac{3m}{4\omega_0^2 \tau^2} \left[\ln \left(1 + \frac{\omega_0 \tau L}{3mR_A}\right) - \frac{\omega_0 \tau L}{3mR_A + \omega_0 \tau L} \right]. \quad (1.21)$$

Without pollution externality ($\zeta = 0$), it is straightforward to check that private welfare increases when the city becomes polycentric. Job decentralization leads to lower land rents on average and to higher housing size as the maximum distance traveled by a worker declines. Indeed, the maximum distance traveled between a residential location and a workplace is given by the commuter living at $\hat{z}$ or at the city border y_P . Thus, for an individual working in the SBD, the distance is equal to $\hat{z} = y_P - z_P = y_P/3$ when the city is polycentric, whereas the maximum distance equals $y_M > y_P/3$ when the city is monocentric. As a result, with no pollution externality, private welfare improves when jobs relocate to the periphery of the city. Indeed, using (1.22) implies

$$V_P(\zeta = 0) - V_M(\zeta = 0) = \omega_0 \tau y_M \left(1 - \frac{1}{3} \frac{y_P}{y_M}\right) > 0. \quad (1.22)$$

It follows that if the city border grows in high proportion (y_P/y_M reaches high values), the gain in private welfare is low.

When pollution externality is considered ($\zeta > 0$), the analysis is more complex, as the total distance traveled by workers can increase or decrease when the city becomes polycentric. In Appendix E, we show that $C_P < C_M$ and $V_P > V_M$ if and only if $\omega_0 \tau L/mR_A \equiv \Gamma$ is not too high¹⁵. The polycentric city makes workers better off if travel speed ($1/\tau$) or the

^{15**}This parameter Γ represents the ratio between the opportunity cost of commuting time for the whole city population per unit of distance and the land opportunity cost of all roads within the city.**

number of roads (m) are relatively high in relation to the population size. However, when population size reaches relatively high values ($\Gamma \gg 1$), a monocentric city implies a lower total traveled distance and higher welfare than the polycentric city.

The basic intuition is as follows. When the ratio Γ faces a steep rise, the city border of the polycentric city increases substantially. Indeed, some standard calculations show that $y_P/y_M = (1 + \Gamma)/(1 + \Gamma/3)$, which increases with Γ . In other words, when the city becomes polycentric, the city border expands strongly when the opportunity costs of travel time and population size are sufficiently high. In a monocentric city, households are located close to the CBD in tiny housing when the opportunity costs of travel time are high. In a city endowed with several SBDs, even though the value of travel time is high, the average housing size remains relatively high. Indeed, the maximum distance traveled by a worker is much lower in a polycentric city than a monocentric city ($y_P/3$ instead of y_M). As a result, total commuting distances tend to rise strongly in a polycentric city when commuting time (τ) is high and the number of roads (m) is low. In contrast, the gain in private welfare when the city adopts a polycentric structure is weak when the city limit expands strongly (see (1.22)). Thus, social welfare increases when the city becomes polycentric, provided that the value of travel time is not too high or that the number of roads directly connected to the CBD is sufficiently high.

The case where $\omega_P < \omega_0$. We now examine the case where $\omega_P = \mu\omega_0$ with $0 < \mu < 1$. In Appendix D, we report the expression of the city border $y_P(\mu)$. Several standard calculations reveal that $dy_P(\mu)/d(1/\mu) < 0$ evaluated at $\mu = 1$. A marginal increase of $1/\mu$ leads to a more compact city as $y_P(\mu)$ decreases and approaches the CBD limit $\hat{z}(\mu)$. Because the CBD is more attractive when $1/\mu$ increases, the residential areas surrounded the SBDs shrink. The welfare is now given by

$$V_P(\mu) = \omega_0 \frac{3 - \tau y_P(\mu)}{2/\mu + 1} + \frac{1}{4R_A} - \zeta C_p(\mu), \quad (1.23)$$

in which the expression of $C_p(\mu)$ is provided in Appendix F. As the expressions of $y_P(\mu)$ and $C_p(\mu)$ are highly non-linear, we cannot provide an analytical derivation of these properties. Instead, we present numerical simulations to study the impact of job decentralization on commuting flow and welfare when the wage rate is higher in the CBD than in the SBDs. Different numerical simulations are performed. Under the configuration where $\omega_P = \omega_0$, the ratio $\omega_0\tau L/mR_A$ plays a critical role, confirming our main results.

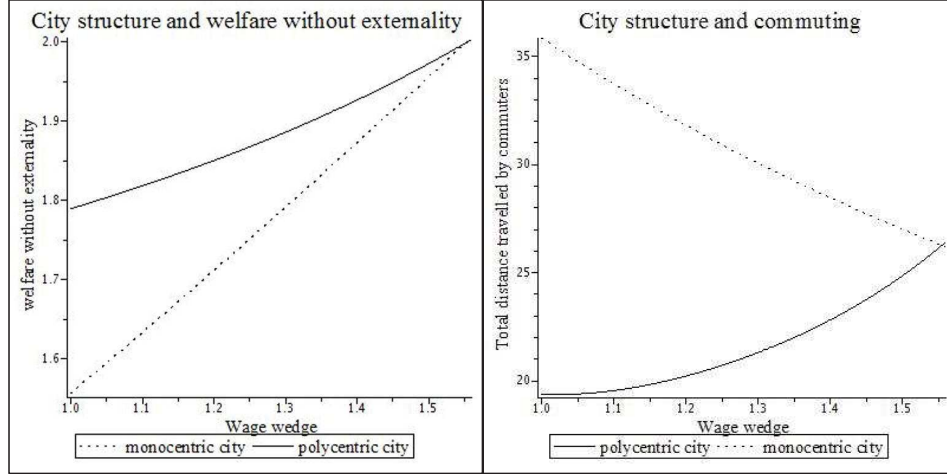


Figure 1.2: Evolution of private welfare (without pollution externality) with wage gap ($1/\mu$) [left-hand side]. Evolution of total commuting distances with wage gap ($1/\mu$) [right-hand side]. Case with a low Γ : ($L = 20, \tau = 1/10, \omega_P = 1, \delta = 1, m = 10, R_A = 1/4$.)

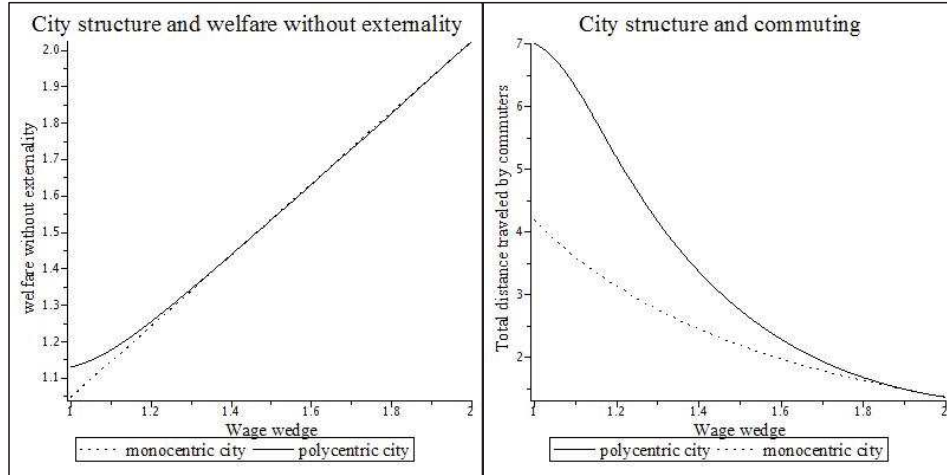


Figure 1.3: Evolution of private welfare (without pollution externality) with wage gap ($1/\mu$) [left-hand side]. Evolution of total commuting distances with wage gap ($1/\mu$) [right-hand side]. Case with a high Γ : ($L = 20, \tau = 1, \omega_P = 1, \delta = 1, m = 2, R_A = 1/4$.)

In Figure 1.2, we select the value of parameters such that $\omega_0 \tau L / m R_A$ is low enough¹⁶, whereas in Figure 1.3, we consider a case where $\omega_0 \tau L / m R_A$ is high¹⁷. Our simulations confirm that $C_P < C_M$ and $V_P > V_M$ (resp., $C_P > C_M$ and $V_P = V_M$) when $\omega_0 \tau L / m R_A$ is low (resp., high) enough. We report the figures plotting C_P and C_M against $1/\mu$ (from 1 to $1/\mu$), as well as V_P and V_M when there is no pollution externality ($\zeta = 0$) against $1/\mu$. It follows that the polycentric city is socially desirable as long as the opportunity cost of

¹⁶We have selected the following values: $L = 20, \tau = 1/10, \omega_P = 1, \delta = 1, m = 10$, and $R_A = 1/4$.

¹⁷In Figure 1.2, we have $L = 20, \omega_P = 1, \delta = 1$, and $R_A = 1/4$, as well as $m = 10$ and $\tau = 1/10$. In Figure 1.3, we have $L = 20, \omega_P = 1, \delta = 1$, and $R_A = 1/4$, as well as $m = 2$ and $\tau = 1$.

travel time is not too high. Whether a polycentric city is an efficient urban form depends on commuting costs, the traffic network, and the relative attractiveness of the CBD. We summarize our results as follows,

Proposition 3. *When a city adopts a polycentric configuration instead of a monocentric configuration, transport-related pollution falls and social welfare rises, provided that travel speed and/or the number of roads directly connected to the CBD are sufficiently high. Without pollution externality, the total number of roads m increases horizontally and private welfare increases as long as the maximum traveled distance of commuters is lower than in the monocentric structure.*

5 Discussion

5.1 Extending the city vertically

In the model, we have considered the housing floor space per unit of land $\delta(x)$ (tallness of buildings) to be uniformly distributed across the city ($\delta(x) = 1$). Despite this assumption, population density and land rents are decreasing with distance to jobs as housing demand is endogenous, in accordance with empirical evidence. However, we do not know whether our assumption is restrictive when we study the relationship between urban form and transport-related pollution. We now assume that the housing supply of floor space per unit of land in residential area around the CBD is given by $1 + \Delta_\delta$ and is higher than the ones in the residential area around the SBDs *i.e.*, $\Delta_\delta > 0$. It allows us to capture the fact that building heights are higher near the CBD because land price is higher (Brueckner, 2011). Skyscrapers are commonly build around the CBD. The equilibrium land rent and the housing demands around the CBD and the SBDs have a similar form as previously studied (see Appendix F).

The residential location of the individual who is indifferent between working in the CBD or in the SBD $\hat{z}$ is the solution to $V_0(\hat{z}) = V_P(\hat{z})$ which is equivalent to

$$\omega_0(1 - \tau\hat{z}) + \frac{1 + \Delta_\delta}{4R_A} = \omega_P[1 - \tau(z_P - \hat{z})] + \frac{1}{4R_A}. \quad (1.24)$$

leading to

$$\hat{z}(y_P) = \frac{2(1/\mu - 1) + \tau y_P + \frac{\Delta_\delta}{2R_A\omega_P}}{\tau(2/\mu + 1)}, \quad (1.25)$$

in which $\omega_P = \mu\omega_0$ is inserted and (1.13) in (1.24). When $\Delta_\delta = 0$, we fall back on the case studied in the previous section. An increase of the housing supply of floor space in

the residential area of the CBD (Δ_δ) leads to expand the size of the CBD. The magnitude of this effect is low when the opportunity cost of land reaches high values. A higher floor space per unit of land around the CBD induces a higher price paid per square meter and, in turn, a larger housing size when the opportunity cost of land R_A is unchanged. Therefore, the CBD attracts more workers.

For more clarity, we focus on the configuration in which the wage rates in the CBD and the SBDs are equal ($\mu = 1$) so that $\hat{z} = \frac{y_p}{3} + \frac{\Delta_\delta}{6\tau R_A \omega_0}$. As expected, the size of the CBD grows when commuting costs decrease and the housing supply of floor space per unit of land around the CBD increases. We show in Appendix F that the equilibrium borders when the city is monocentric and polycentric are expressed as follows

$$y_M(\Delta_\delta) = \frac{1 + \Delta_\delta}{4R_A^2} \frac{L/m}{1 + \Gamma}$$

and

$$y_P(\Delta_\delta) = \frac{1}{4R_A^2} \frac{L/m}{1 + \Gamma/3} \frac{3 + \Delta_\delta}{3},$$

respectively. It is straightforward to check that a polycentric city exists ($z[\Delta_\delta, y_P(\Delta_\delta)] < y_P(\Delta_\delta)$) if and only if $\Gamma > \Delta_\delta$ (see Appendix F). In addition, when the decentralization of jobs is possible, the city limit moves outward when the city becomes polycentric $y_P(\Delta_\delta) > y_M(\Delta_\delta)$ and $y_P(\Delta_\delta)/y_M(\Delta_\delta)$ increases with Γ (see Appendix F). Hence, our main results discussed in the previous section hold as the city border increases with job decentralization. For the same reasons detailed in Section 3, the effects of a relocation of jobs farther away from the CBD on commuting distances are ambiguous.

Notice also that, without pollution externality ($\zeta = 0$), the change in private welfare is still positive when the city becomes polycentric when the wage rate does not vary in the city (as shown in the previous section). Indeed, we have

$$V_P(\zeta = 0) - V_M(\zeta = 0) = \omega_0 \tau y_M(\Delta_\delta) \left\{ 1 - \frac{z[\Delta_\delta, y_P(\Delta_\delta)]}{y_M(\Delta_\delta)} \right\} > 0$$

where $z[\Delta_\delta, y_P(\Delta_\delta)] < y_M(\Delta_\delta)$ when $\Gamma > \Delta_\delta$. As a consequence, the private welfare increases when the economy shifts from the monocentric to a polycentric structure even though the housing supply of floor space per unit of land around the CBD increases. Indeed, the maximum distance traveled by an individual working in the CBD declines when jobs relocate in the periphery of the city. However, the gain in private welfare is low when housing supply around the CBD is high. Hence, for the same reasons reported in Section

3, the effects of jobs decentralization on welfare are ambiguous as the city limit increases.

Hence, the spatial extension of the city remains the critical variable to reduce transport-related pollution. Improvements in vertical extension of cities without controlling for their horizontal extension are likely insufficient to reduce transport-related urban pollution. Even though some empirical evidence suggests that more skyscrapers might be desirable for achieving more sustainable cities (Larson and Yezer, 2015; Larson *et al.*, 2012),¹⁸ there are some reasons to remain cautious. Compact city policies, by reforming inappropriate building densities (e.g., building height restrictions, see Bertaud and Brueckner, 2005), could be a further key priority in order to enable vertical extension (Glaeser, 2011; Suzuki *et al.*, 2013) but should be coordinated with new infrastructure financing schemes for coping with increased local demand. Borck (2016) provides a theoretical but deep analysis of how vertical extension (building skyscrapers) could impact energy uses (coming from commuting and housing) and GHG emissions in a monocentric city. He shows that Floor-Area Ratio (FAR) limits can potentially decrease total emissions. On the one hand, FAR limits (i.e., limits to vertical extension in the inner city) lead to urban sprawl and therefore to increasing commuting distances (and of GHG emissions). But on the other hand, it induces increased competition for inner city land and raises housing prices, which consequently reduces total demand for housing (which decreases GHG emissions stemming from housing). The total effect of FAR limits is therefore not trivial, and vertical extension may not be the ultimate solution for promoting more sustainable cities.

5.2 Endogenous wage

In the previous sections, we have assumed that wages in the CBD and subcenters are exogenous, unlike Fujita and Ogawa (1982) and Lucas and Rossi-Hansberg (2002). We implicitly consider that wage rate does not adjust to a change in the size of labor markets. For example, an increase in the size of CBD ($\hat{z}$) implies a higher mass of individuals working in the CBD and could impact the wage rates prevailing in the CBD and subcenters. We check if our main results hold when wages are endogenous.

We assume that firms produce a homogeneous good and labor is the only production factor. Our setting can easily be extended to the case of firms producing a differentiated good under monopolistic competition and using capital. Let Π_i be the profit earned by a

¹⁸Glaeser (2009) wrote: "To save the planet, build more skyscrapers"

firm producing in the CBD if $i = 0$ and in the SBD if $i = s$ given by

$$\Pi_i = pQ_i - \omega_i T_i \quad (1.26)$$

where p is the output price, T_i is the total amount of time units used by the firm and Q_i is the output size with $Q_i = \mathbf{A}_i T_i^\gamma$, $\mathbf{A}_i \geq 1$ and $\gamma \leq 1$. As in Lucas and Rossi-Hansberg (2002), we consider that the marginal productivity of labor is non increasing and $\mathbf{A}_i$ is a productivity term that reflects an external effect on production which is specific to each business district (CBD and subcenters). The externality acts as a multiplier. Firms locating in the CBD benefits from a more efficient environment that takes the concrete form of a productivity drop $\mathbf{A}_0 > \mathbf{A}_s = 1$. According to Baum-Snow and Pavan (2012), agglomeration economies arise mainly within the central city even if, due the development of new information and communication technologies, their scope has spread within the city. We may then interpret $\mathbf{A}_0$ as follows: the stronger the agglomeration economies in the central city, the higher value of $\mathbf{A}_0$.

No wage bargaining. We first consider there is no wage negotiation. Under this configuration, maximizing (2.14) with respect to working time T_i implies the following labor demand:

$$p\mathbf{A}_i\gamma T_i^{\gamma-1} = \omega_i \quad (1.27)$$

so that $\Pi_i = (1 - \gamma)p\mathbf{A}_i T_i^\gamma = (1 - \gamma)[p\mathbf{A}_i]^{\frac{1}{1-\gamma}} [\gamma/\omega_i]^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$ where we have inserted (1.27) in (1.26). In equilibrium, $\Pi_0 = \Pi_s$ implies

$$\omega_0 = \mathbf{A}_0^{\frac{1}{\gamma}} \omega_s$$

so that $\mu = \omega_s/\omega_0 = \mathbf{A}_0^{-1/\gamma}$. Hence, the wedge between the wage rates in the inner city and in the subcenters depends on the magnitude of agglomeration economies $\mathbf{A}_0$ and scale diseconomies γ . As a result, our results hold except that we have $\mathbf{A}_0^{-1/\gamma}$ instead of μ .¹⁹

Wage bargaining. We now consider that firms and workers bargain bilaterally over the wage rate. Let $\beta \in [0, 1]$ denote the worker's bargaining power. We assume that β is common to all matches. The firm and the worker negotiate a wage rate.²⁰ Wages are determined by bilateral bargaining between employer and each worker separately in the spirit of Stole and Zwiebel (1996a, 1996b) (and Aumann and Shapley, 1974). The

¹⁹Note that labor market clearing yields $N_0 T_0 = m \int_0^{\hat{z}} \Delta_0(x) \ell_0(x) dx$ where N_0 is the number of producers in the CBD and $T_0 = (\mathbf{A}_0 \gamma / \omega_0)^{1/(1-\gamma)}$ as well as $N_s T_s = \int_{\hat{z}}^y \Delta_s(x) \ell_s(x) dx$ where N_s is the number of producers in the SBD and $T_s = (\gamma / \omega_s)^{1/(1-\gamma)}$. We have $T_0/T_s = \mathbf{A}_0^{\frac{1}{\gamma}} < 1$.

²⁰We consider there is no search cost for finding better matches.

bargaining solution of Stole and Zwiebel generalizes the Nash solution to a setting with diminishing returns. Firms and workers bargain over the surplus generated by their employment relationship. Wages are determined by continuous bargaining between the firm and its employees. The firm's outside option is to produce with one fewer worker while the worker's outside option is given by her/his reservation utility which equal to the utility reached by a farmer (denoted v_A). The firm bargains individually with its entire workforce, treating each as marginal. Note that the marginal decision only involves an infinitely small *time* unit of labor as working time is a continuous variable. As in Stole and Zwiebel (1996a, 1996b), the firm pay the same wage rate (per time unit) to all its workers even though it is individually bargained. Hence, because of symmetry of firms, the wage rate prevailing in each business district is identical.

The surplus accruing from a successful match is split between the employee and the firm. The worker's surplus is equal to $\omega_i \ell_i(x) + 1/[4R(x)] - v_A$ with $i = 0, s$, $\ell_0(x) = 1 - \tau x$, and $\ell_s(x) = 1 - \tau |x - z_p|$. The firm's surplus is equal to the marginal increase in the firm's profit associated with an additional unit of labor time given by $\partial \Pi_i / \partial T_i = p \partial Q_i / \partial T_i - \omega_i - T_i \partial \omega_i / \partial T_i$ with $i = 0, s$. Then, we solve the usual Nash-sharing rule

$$\beta \left(p \frac{\partial Q_i}{\partial T_i} - \omega_i - T_i \frac{\partial \omega_i}{\partial T_i} \right) = (1 - \beta) \left[\omega_i \ell_i(x) + \frac{1}{4R(x)} - v_A \right] \quad (1.28)$$

where β is the index of the bargaining power of workers or, equivalently,

$$\omega_i = \frac{(1 - \beta)}{\ell_i(x) + \beta[1 - \ell_i(x)]} \left[v_A - \frac{1}{4R(x)} \right] + \frac{\beta}{\ell_i(x) + \beta[1 - \ell_i(x)]} \left(\frac{\partial \Pi_i}{\partial T_i} - T_i \frac{\partial \omega_i}{\partial T_i} \right)$$

The wage is a weighted average of two terms. The first term is the contribution of the outside option of the worker and land rents to his wage. As expected, higher prices of land imply higher wage rates. The second term is the contribution of working labor of a worker to the profit of the firm, taking into account that if the worker quits job, this also influence the wage rate of other employees of the firm. This equation shows that the wage negotiated depends on employment T_i , chosen before the wage.

As Stole and Zwiebel show, the solution to this differential equation (1.28) is the generalized Shapley value. Since we have $\omega_i \ell_i(x) + [4R(x)]^{-1} = \omega_i \ell_i(\hat{z}) + [4R(\hat{z})]^{-1}$ in equilibrium, regardless of the residential location of workers hired by a firm set up in the CBD, the solution to the differential equation (1.28) is given by

$$\omega_i = \frac{(1 - \beta)}{\ell_i(\hat{z}) + \beta[1 - \ell_i(\hat{z})]} \left[v_A - \frac{1}{4R(\hat{z})} \right] + \frac{\gamma \beta}{1 - \beta + \beta \gamma} \frac{p \mathbf{A}_i T_i^\gamma}{T_i}. \quad (1.29)$$

Note also that our wage equation takes a similar form as in other papers using the Stole–Zwiebel framework, such as Acemoglu and Hawkins (2014), Cahuc *et al.*, (2008) and Elsby and Michaels (2013). Unlike those authors, we consider land rents and commuting costs in the wage equation. Using (1.29), the profit of firm reaches

$$\Pi_i^* = p\mathbf{A}_i T_i^\gamma \frac{1-\beta}{1-\beta+\beta\gamma} - \frac{(1-\beta)}{\ell_i(\widehat{z}) + \beta[1-\ell_i(\widehat{z})]} \left[v_A - \frac{1}{4R(\widehat{z})} \right] T_i$$

Labor demand T_i^* is such $\partial\Pi_i^*[\omega_i(T_i)]/\partial T_i = 0$. Inserting T_i^* in (1.29) yields

$$\omega_i^* = \frac{1}{\ell_i(\widehat{z}) + \beta[1-\ell_i(\widehat{z})]} \left[v_A - \frac{1}{4R(\widehat{z})} \right]$$

so that

$$\mu^* = \frac{\omega_s^*}{\omega_0^*} = \frac{1 - (1-\beta)\tau\widehat{z}}{1 - (1-\beta)\tau(y-\widehat{z})/2}$$

with $\mu^* < 1$ as long as $z > y/3$ and $\partial\mu^*/\partial\widehat{z} < 0$ and $\partial\mu^*/\partial\tau > 0$. A higher share of workers working in the CBD (higher $\widehat{z}$) increases the relative wage rate in the CBD. According to (14), $\widehat{z}$ decreases with μ . Under endogenous wages, μ increases with $\widehat{z}$ so that relationship between $\widehat{z}$ and μ remains negative. In addition, higher commuting costs raise the relative wage rate in the SBD making the city polycentric more likely. Hence, even if wages react to a change in urban form, our main results hold.

5.3 Role of modal choice and congestion

Our model assumes that the utility function depends on a negative externality E in which the carbon emission per unit of distance ϵ does not vary. As a result, we leave aside the role of population density in carbon dioxide emissions generated by the level of traffic congestion and the commuting mode (Grote *et al.*, 2016; Barth and Boriboonsomsin, 2008). For example, the impact of modal choices on carbon emissions in cities can be substantial, as the use of private cars is the major source of energy consumption, given that private cars are the most widespread mode choice among inhabitants living in low-density urban areas (Breheny, 1995; Rode *et al.*, 2014). In particular, higher urban density yields lower levels of car use and more efficient public transportation systems. Therefore, public policies aiming at promoting bigger secondary business districts may conflict with the objective of lower emissions within the city, as a larger CBD provides a denser and a more energy-efficient public transportation system.

Further, our framework disregards carbon emissions stemming from travel speed. We have assumed that travel speed does not vary within the city (our model captures only

an average speed). The travel speed in a site depends on traffic congestion within it, *i.e.*, on the number of commuters using the same road simultaneously. The high density of vehicles in a site forces users to reduce their average speed, as maximum road capacity is reached (Small and Verhoef, 2007; Rao and Rao, 2012). Barth and Boriboonsomsin (2008) highlight a *U*-shaped relationship between carbon emissions and average speed on road segments. When road users suffer from hypercongestion near the city center, carbon emissions are very high because of "stop and go" driving. Hence, a polycentric city would be able to reduce these high levels of road congestion in sites close to the CBD by lowering traffic density near the CBD.

Clearly, additional works are needed to better understand how modal choice and traffic congestion modify the relationship between urban form and social welfare. However, it is quite obvious that travel speed for road vehicles and the number of roads directly connected to the CBD still play a key role.

6 Conclusion

There is a wide consensus regarding implementing new spatial organizations of big cities among politics and urban planners. However, the debate remains complex. Questions regarding the feasibility and the acceptability of these policies and their efficiency remain open. Our paper brings several insights about possible urban policies. We have studied the relationship between urban design, commuting flows, transport-related pollution and welfare in order to assess whether a polycentric city might be a desirable configuration from the viewpoints of economic and ecological outcomes. In our framework, job decentralization within big cities has two opposing effects. On the one hand, we have the direct benefits of the value of induced travel savings for an unchanged residential location. On the other hand, job decentralization modifies residential choice, as land rents decrease on average. Indeed, lower land prices shift the demand for housing upward so that the city border moves outward. As the spatial extension of the city increases, commuting flows and transport-related emissions grow. These indirect costs may be important and, in realistic situations, may be considerably larger than the direct benefits, as suggested by empirical evidence (Veneri, 2010). Hence, a polycentric city is not necessarily the most desirable urban topology to promote. Actually, close scrutiny must be paid to the interplay between the housing demand, travel speed, transportation network structure, and urban pollution stemming from commuting flows. More importantly, the spatial extension of cities remains a critical variable to curb transport-related urban pollution.

Our work highlights the need for a cautious approach to implement policies that would guarantee the sustainable development of a city. This paper also demonstrates the significant role of housing demand on urban structure, which could help in evaluating the efficiency of urban policies. As underlined in Cho and Choi (2014), the desirability of urban forms remains largely a matter of debate.

References

- AASHTO, (2013). Commuting in America 2013: The National Report on Commuting Patterns and Trends – Brief 2. The role of commuting in overall travel. May 2013, Washington, DC. 24 p.
- Acemoglu, D., and Hawkins W. (2014). Search with Multi-Worker Firms. *Theoretical Economics*. 9: 583–628.
- Aguilera, A. (2005). Growth in commuting distances in French polycentric metropolitan areas: Paris, Lyon and Marseille. *Urban Studies*. 42: 1537–1547.
- Alonso, W. (1964). Location and land use: Toward a general theory of land rent. Cambridge University Press. 204 p.
- Anas, A., Arnott, R. and Small, K.A. (1998). Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature*. 36: 1426–1464.
- Angel, S., Sheppard S.C., and Civco, D.L. (2005). The Dynamics of Global Urban Expansion. Transport and Urban Development Department, The World Bank. Washington D.C., September 2005.
- Anas, A., and Kim, I. (1996). General equilibrium models of polycentric urban land use with endogenous congestion and job agglomeration. *Journal of Urban Economics*. 40: 232–256.
- Arnott, R. J. (1979). Unpriced transport congestion. *Journal of Economic Theory*. 21(2): 294–316.
- Barth, M., and Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2058: 163–171.
- Baum-Snow, N., and Pavan, R. (2012). Understanding the city size wage gap. *The Review of Economic Studies*. 79(1): 88–127.
- Bento, A. M., Cropper, M. L., Mobarak, A. M., and Vinha, K. (2005). The effects of urban spatial structure on travel demand in the United States. *Review of Economics and Statistics*. 87(3): 466–478.
- Bertaud, A., and Brueckner, K. (2005). Analyzing building-height restrictions: predicted impact and welfare costs. *Journal of Urban Economics*. 35: 109–125.
- Bertaud, A., Lefèvre, B., and Yuen, B. (2011). GHG emissions, urban mobility, and morphology: A hypothesis. *Cities and Climate Changes*. 87–123.
- Birol, F. (2007). World Energy Outlook. OECD/IEA. 663 p.
- Borck, R. (2016) Will skyscrapers save the planet? Building height limits and urban greenhouse gas emissions. *Regional Science and Urban Economics*. 58: 13–25.
- Borck, R., and Brueckner, J. K. (2016). Optimal Energy Taxation in Cities. *CESifo*

working paper 5711.

Breheny, M. (1995). The compact city and transport energy consumption. *Transactions of the Institute of British Geographers*. 81–101.

Brueckner, J. K. (2011). Lectures on Urban Economics. MIT Press. 283 p.

Burgalassi, D., and Luzzati, T. (2015). Urban spatial structure and environmental emissions: A survey of the literature and some empirical evidence for Italian NUTS 3 regions. *Cities*. 49: 134–148.

Cahuc, P., Marque, F., and Wasmer, E. (2008). “A theory of wages and labor demand with intra-firm bargaining and matching frictions.” *International Economic Review*. 49, 943–972.

Calwell, C. (2010). Is efficient sufficient. The case for shifting our emphasis in energy. European Council for an Energy Efficient Economy. 29 p.

Cavallès, J., Gaigné, C., Tabuchi, T. and Thisse J.-F. (2007). Trade and the structure of cities. *Journal of Urban Economics*. 62: 383–404.

CGDD, (2010). La mobilité des Français, panorama issu de l’enquête nationale transports et déplacements 2008. *La Revue du CGDD*. Décembre 2010, Paris. 228 p.

EEA, (2007). Transport and environment: on the way to a new common transport policy, vol. EEA. Report No. 1/2007 of TERM 2006: indicators tracking transport and environment in the European Union. European Environment Agency. 44 p.

Elsby, M. and Michaels R. (2013). Marginal jobs, heterogeneous firms, and unemployment flows. *American Economic Journal: Macroeconomics*. 5: 1–48.

Floater, G., Rode, P., Robert, A., Kennedy, C., Hoornweg, D., Slavcheva, R. and Godfrey, N. (2014): Cities and the New Climate Economy: the transformative role of global urban growth. New Climate Economy Cities Paper 01. LSE Cities. London School of Economics and Political Science. 61 p.

Fujita M. and Ogawa H. (1982). Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Regional Science and Urban Economics*. 12(2): 161–196.

Gaigné C., S. Riou and J.-F. Thisse (2012). Are compact cities environmentally friendly? *Journal of Urban Economics*. 72: 123–136.

Giuliano, G., and Small, K. A. (1993). Is the journey to work explained by urban structure?. *Urban Studies*. 30: 1485–1500.

Glaeser, E.L., 2009. Green cities, brown suburbs. *City Journal*. 19(1): 50–55.

Glaeser, E. (2011). Triumph of the city: How our greatest invention makes US richer, smarter, greener, healthier and happier. Pan Macmillan.

Glaeser, E. L., and Kahn, M. E. (2010). The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*. 67(3): 404–418.

Goulden, M., Riley T., and Dingwall, R. (2014). Beyond 'predict and provide': UK transport, the growth paradigm and climate change. *Transport Policy*. 32: 139-147.

Grote, M., Williams, I., Preston, J., and Kemp, S. (2016). Including congestion effects in urban road traffic CO_2 emissions modelling: Do Local Government Authorities have the right options?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 43: 95-106.

Hickman, R., and Banister, D. (2014). Transport, Climate Change and the City. Routledge. 376 p.

Hoornweg, D., Bhada, P., Freire, M., Trejos, C. L., and Sugar, L. (2010). Cities and climate change: An urgent agenda. The World Bank, Washington, DC. 92 p.

Larson, W., Liu, F., and Yezer, A. (2012). Energy footprint of the city: Effects of urban land use and transportation policies. *Journal of Urban Economics*. 72(2): 147-159.

Larson, W., and Yezer, A. (2015). The energy implications of city size and density. *Journal of Urban Economics*. 90: 35-49.

Legras, S. and Cavailhès, J. (2016). Environmental performance of the urban form. *Regional Science and Urban Economics*. 59, 1-11.

Levy, D., et Le Jeannic, T. (2011). Un habitant de pôle urbain émet deux fois moins de CO_2 que la moyenne pour se rendre sûr son lieu de travail ou d'études. *INSEE Première*. 1357.

Litman, T. (2015). Analysis of Public Policies That Unintentionally Encourage and Subsidize Urban Sprawl. Victoria Transport Policy Institute. Supporting paper commissioned by LSE Cities at the London School of Economics and Political Science. 89 p.

Lucas Jr, R. E., and Rossi-Hansberg, E. (2002). On the internal structure of cities. *Econometrica*. 1445-1476.

Næss, P., and Vogel, N. (2012). Sustainable urban development and the multi-level transition perspective. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 4: 36-50.

Overman, H., Puga, D., and Turner, M. (2008). Decomposing the Growth in Residential Land in the United States. *Regional Science and Urban Economics*. 38: 487-497.

Rao, A. M., and Rao, K. R. (2012). Measuring urban traffic congestion-a review. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2(4): 286-305.

Rode, P., Floater, G., Thomopoulos, N., Docherty, J., Schwinger, P., Mahendra, A., and Fang, W. (2014). Accessibility in Cities: Transport and Urban Form. NCE Cities Paper 03. LSE Cities. London School of Economics and Political Science. 61 p.

Small, K. A., and Verhoef, E. T. (2007). *The economics of urban transportation*. Routledge. 276 p.

Sorell, S. (2007). The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. UK Energy Research Centre. 108 p.

Stole, Lars A. and Zwiebel J. (1996a). Intra-firm bargaining under non-binding contracts. *Review of Economic Studies*. 63: 375–410.

Stole, Lars A. and Zwiebel J. (1996b). Organizational design and technology choice under intrafirm bargaining. *American Economic Review*. 86: 195–222.

Storper, M. (2013). *Keys to the City: How Economics, Institutions, Social Interaction, and Politics Shape Development*. Princeton University Press (July 2013).

Suzuki, H., Cervero, R., and Luchi, K. (2013). Transforming cities with transit: Transit and land-use integration for sustainable urban development. World Bank Publications. The World Bank. Washington, D.C. 205 p.

Timothy, D. and W.C. Wheaton (2001). Intra-urban wage variation, employment location and commuting times. *Journal of Urban Economics*. 50: 338–366.

United Nations (2014). Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). 32 p.

Veneri, P. (2010). Urban polycentricity and the costs of commuting: evidence from italian metropolitan areas. *Growth and Change*. 41(3): 403–429.

Xue, L. K., Wang, T., Gao, J., Ding, A. J., Zhou, X. H., Blake, D. R., ... and Zhang, Q. Z. (2014). Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 14(23): 13175–13188.

Zheng, S., Wang R., Glaeser E. and Kahn M. (2011). The greenness of China: household carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Economic Geography*. 11(5): 761–792.

7 Appendix

A. The equilibrium border with a monocentric city. The population constraint is given by

$$m \int_0^y l(x) dx = L.$$

Solving (1.9) by using (1.8) leads to

$$m \int_0^y \frac{\delta}{h(x)} dx = L.$$

Trivial calculations show that

$$\begin{aligned} \int_0^y \frac{\delta}{h(x)} dx &= \int_0^y \frac{4\delta R_A^2}{[\delta - 4\omega_0\tau(y-x)R_A]^2} dx = \frac{4\delta R_A^2}{4\omega_0\tau R_A} \left[\frac{-1}{\delta - 4\omega_0\tau(y-x)R_A} \right]_0^y \\ &= \frac{4\delta R_A^2}{4\omega_0\tau R_A} \left(\frac{1}{\delta - 4\omega_0\tau y R_A} - \frac{1}{\delta} \right) = \frac{4R_A^2 y}{\delta - 4\omega_0\tau y R_A}. \end{aligned}$$

Using the population constraint and $\delta = 1$, we obtain

$$y_M = \frac{L/m}{4R_A(R_A + \omega_0\tau L/m)}.$$

Accounting for the monetary costs of commuting and $\delta \neq 1$ does not qualitatively change our results. Indeed, considering $t(x) = tx$ with $t > 0$ in the budget constraint and $\delta \neq 1$ leads to

$$y_M(t > 0, \delta) = \frac{\delta}{4R_A} \frac{L/m}{R_A + (\omega_0\tau + t)L/m}.$$

B. Commuting in a monocentric city. The total distance traveled by workers within the monocentric city is given by

$$C_M = m \int_0^{y_M} xl(x) dx.$$

Inserting $l(x) = 1/h(x)$, (1.8), and (1.10) in C_M leads to

$$\begin{aligned} C_M &= m \int_0^{y_M} \frac{4R_A^2 x}{[1 - 4\omega_0\tau(y-x)R_A]^2} dx \\ &= \frac{m}{4\omega_0^2\tau^2} [\ln(1 - 4\omega_0\tau R_A y_M)^{-1} - 4\omega_0\tau R_A y_M] \\ &= \frac{m}{4\omega_0^2\tau^2} \left[\ln \left(1 + \frac{\omega_0\tau L}{mR_A} \right) - \frac{\omega_0\tau L}{mR_A + \omega_0\tau L} \right] > 0. \end{aligned}$$

Equivalently, we have

$$C_M = \frac{m}{4\omega_0^2\tau^2} \left[\ln(1 + \Gamma) - \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right]$$

with

$$\Gamma \equiv \frac{\omega_0\tau L}{mR_A}.$$

Trivial calculations show that

$$\text{sign} \frac{dC_M}{d\tau} = \text{sign} \left[-(1 + \Gamma)^2 \ln(1 + \Gamma) + \Gamma + \frac{3}{2}\Gamma^2 \right] < 0$$

as the term in brackets is equal to zero when $\Gamma = 0$ and decreases when Γ increases. In addition, we have

$$\text{sign} \frac{dC_M}{dm} = \text{sign} \left[(1 + \Gamma)^2 \ln(1 + \Gamma) - \Gamma(1 + 2\Gamma) \right]$$

where the term in brackets is equal to zero when $\Gamma = 0$ and is positive when $\Gamma > 0$.

C. Change in housing size when the city becomes polycentric. We compare the demand for housing for a city border y that remains unchanged when the city is polycentric and monocentric. We show that housing size increases when the city moves from a monocentric configuration to a polycentric configuration. Using (1.16) and (1.8), we have

$$h_0(x) - h(x) = \omega_0\tau(y - \widehat{z}) > 0$$

for all $x \in [0, \widehat{z}]$. In addition, for all $x \in [\widehat{z}, z_P]$,

$$\begin{aligned} h_P(x) - h(x) &= \omega_0\tau(y - x) - \omega_P\tau \left(\frac{y - \widehat{z}}{2} - z_P + x \right) \\ &= \omega_0\tau(y - x) - \omega_P\tau(x - \widehat{z}) \\ &= \omega_0\tau[y - x(1 + \mu) + \mu\widehat{z}] > 0. \end{aligned}$$

Indeed, under this configuration, the maximum value reached by x is $z_P = (\widehat{z} + y_P)/2$. As a consequence, the minimum value of the term in brackets is positive because

$$\begin{aligned} y_P - z_P(1 + \mu) + \mu\widehat{z} &= y_P - \frac{\widehat{z} + y_P}{2}(1 + \mu) + \mu\widehat{z} \\ &= (y_P - \widehat{z}) \left(\frac{1 - \mu}{2} \right) > 0. \end{aligned}$$

Last, for all $x \in [z_P, y]$, we obtain

$$\begin{aligned} h_P(x) - h(x) &= \omega_0 \tau (y_P - x) - \omega_P \tau \left(\frac{y_P - \hat{z}}{2} - x + z_P \right) \\ &= (\omega_0 - \omega_P) \tau (y_P - x) \geq 0 \end{aligned}$$

D. The city border and commuting flows when the city is polycentric. The population constraint implies

$$\int_0^{\hat{z}} \frac{1}{h_0(x)} dx + \int_{\hat{z}}^{y_P} \frac{1}{h_P(x)} dx = \frac{L}{m}.$$

Because of the symmetry around the SBD, we have

$$\int_{\hat{z}}^{y_P} \frac{1}{h_P(x)} dx = 2 \int_{z_P}^{y_P} \frac{1}{h_P(x)} dx,$$

with $h_P(x) = 4 \left[\frac{1}{4R_A} - \omega_0 \tau (y_P - x) \right]^2$ when $x > z_P$. Hence, the population constraint is given by

$$\int_0^{\hat{z}(y_P)} \frac{1}{h_0(x)} dx + 2 \int_{\hat{z}(y_P)}^{z_P(y_P)} \frac{1}{h_P(x)} dx = \frac{L}{m},$$

or, equivalently,

$$\begin{aligned} \frac{R_A}{\omega_0 \tau} \left[\frac{-1}{1 - 4\omega_0 \tau (y_P - x) R_A} \right]_0^{\hat{z}(y_P)} + 2 \frac{R_A}{\mu \omega_0 \tau} \left[\frac{1}{1 - 4\mu \omega_0 \tau [x - \hat{z}(y_P)] R_A} \right]_{\hat{z}(y_P)}^{z_P(y_P)} &= \frac{L}{m} \\ \frac{4R_A^2 \hat{z}(y_P)}{1 - 4\omega_0 \tau \hat{z}(y_P) R_A} + 2 \frac{4[z_P(y_P) - \hat{z}(y_P)] R_A^2}{1 - 4\mu \omega_0 \tau [z_P(y_P) - \hat{z}(y_P)] R_A} &= \frac{L}{m} \end{aligned}$$

Using the expression of $z_P(y_P)$, we obtain

$$\frac{\hat{z}(y_P)}{1 - 4\omega_0 \tau \hat{z}(y_P) R_A} + \frac{y_P - \hat{z}(y_P)}{1 - 2\mu \omega_0 \tau [y_P - \hat{z}(y_P)] R_A} = \frac{1}{4R_A^2} \frac{L}{m}.$$

If $z = y_P$, then $y_P = y_M$ (we fall back on the monocentric configuration). Hence, equations (1.15) and (1.21) allow us to determine the equilibrium city limit and the equilibrium size of the CBD (in terms of jobs). As the population constraint is highly non-linear, the expression of the equilibrium city border is implicitly defined as follows:

$$\frac{4R_A^2(2 - 2/\mu - \tau y_P)}{4R_A \omega_0 (\tau y_P + 2/\mu - 2) - (2/\mu + 1)} + \frac{8R_A^2(1/\mu - \tau y_P/\mu - 1)}{4R_A \omega_0 (\tau y_P + \mu - 1) - (2/\mu + 1)} = \frac{\tau L}{m}.$$

The total distance traveled by commuters is given by

$$C_P(\mu) = m \left[\int_0^{\widehat{z}(\mu)} \frac{x}{h_0(x)} dx + 2 \int_{z_P(\mu)}^{y_P(\mu)} \frac{x - z_P(\mu)}{h_P(x)} dx \right],$$

where

$$\int_0^{\widehat{z}(\mu)} \frac{x}{h_0(x)} dx = \frac{1}{4\omega_0^2\tau^2} [\ln(1 - 4R_A\omega_0\tau\widehat{z}(\mu))^{-1} - 4R_A\omega_0\tau\widehat{z}(\mu)]$$

and

$$\int_{z_P(\mu)}^{y_P(\mu)} \frac{x - z_P(\mu)}{h_P(x)} dx = \frac{1}{4\mu^2\omega_0^2\tau^2} [\ln(1 - 2R_A\mu\omega_0\tau[y_P(\mu) - \widehat{z}(\mu)])^{-1} - 2R_A\mu\omega_0\tau[y_P(\mu) - z_P(\mu)]] .$$

E. A monocentric city versus a polycentric city with $\omega_0 = \omega_P$. If $\mu = 1$, then $\widehat{z} = y_P/3$ and $h_0(0) = h_P(z_P) = 4 \left[\frac{1}{4R_A} - \omega_0\tau\frac{y_P}{3} \right]^2$ so that

$$C_P = 3m \int_0^{\widehat{z}} \frac{x}{h_0(x)} dx.$$

Standard calculations yield

$$\begin{aligned} \int_0^{\widehat{z}} \frac{x}{h_0^*(x)} dx &= \frac{1}{4\omega_0^2\tau^2} [\ln(1 - 4\omega_0\tau R_A\widehat{z})^{-1} - 4\omega_0\tau R_A\widehat{z}] \\ &= \frac{1}{4\omega_0^2\tau^2} \left[\ln \left(1 + \frac{\omega_0\tau L}{3mR_A} \right) - \frac{\omega_0\tau L/3}{mR_A + \omega_0\tau L/3} \right]. \end{aligned}$$

Hence, inserting $\widehat{z} = y_P/3$ leads to

$$C_P = \frac{3m}{4\omega_0^2\tau^2} \left[\ln \left(1 + \frac{\omega_0\tau L}{3mR_A} \right) - \frac{\omega_0\tau L/3}{mR_A + \omega_0\tau L/3} \right].$$

Notice that $C_M - C_P \equiv \Delta_C$ with

$$\Delta_C = \frac{m}{4\omega_0^2\tau^2} \left[\ln(1 + \Gamma) - 3 \ln \left(1 + \frac{\Gamma}{3} \right) - \frac{1}{1 + 1/\Gamma} + \frac{3}{1 + 3/\Gamma} \right],$$

in which $\Gamma \equiv \omega_0\tau L/mR_A$. It is straightforward to check that $\Delta_C = 0$, $\partial\Delta_C/\partial\Gamma = 0$, and $\partial^2\Delta_C/\partial^2\Gamma > 0$ when $\Gamma = 0$ and $\Delta_C \rightarrow -\infty$ when $\Gamma \rightarrow \infty$. In addition, we have

$$\frac{\partial\Delta_C}{\partial\Gamma} = \frac{m}{4\omega_0^2\tau^2} \frac{2\Gamma(3 - \Gamma^2)}{(1 + \Gamma)^2(\Gamma + 3)^2}$$

so that $\Delta_C = 0$ has a single solution when $\Gamma > 0$, given by Γ_C (with $\Gamma_C \simeq 3.78$). Hence,

over the interval $(0, \Gamma_C)$, $C_M > C_P$ where Δ_C achieves its maximum value when $\Gamma = \sqrt{3}$. Otherwise, $C_M < C_P$.

In addition, we have $V_P - V_M \equiv \Delta_V$ with

$$\Delta_V = \frac{1}{4R_A} \left[\frac{1}{1 + 1/\Gamma} - \frac{1}{1 + 3/\Gamma} \right] + \zeta \Delta_C.$$

Some standard calculations show that $\Delta_V = 0$ when $\Gamma = 0$ and $\Delta_V \rightarrow -\infty$ when $\Gamma \rightarrow \infty$, and

$$\frac{\partial \Delta_V}{\partial \Gamma} = \frac{(3 - \Gamma^2)(\omega_0 \tau + \zeta L)}{2(1 + \Gamma)^2(\Gamma + 3)^2 R_A \omega_0 \tau},$$

with $\partial \Delta_V / \partial \Gamma > 0$ when $\Gamma = 0$. As a result, $\Delta_V = 0$ has a unique solution over the interval $(0, \infty)$ given by $\Gamma_V > \Gamma_C$ and $V_P > V_M$ if and only if $\Gamma < \Gamma_V$.

F. Housing supply discrepancy within a polycentric city. Land rents and housing demand. The equilibrium land rent is given by $R_P(x) = \max\{\Psi_0(x), \Psi_P(x), R_A\}$ where $\Psi_0(x)$ (resp., $\Psi_P(x)$) is the bid rent of individuals working in the CBD (resp., SBD). As $\partial V(x) / \partial x = 0$, the bid rents around the CBD and the SBDs are given by, respectively,

$$\Psi_0(x) = \frac{(1 + \Delta_\delta) R_A}{1 + \Delta_\delta - 4\omega_0 \tau (\widehat{z} - x) R_A} \quad \text{and} \quad \Psi_P(x) = \frac{R_A}{1 - 4\omega_P \tau \left[\frac{y_P - \widehat{z}}{2} - |z_P - x| \right] R_A}.$$

The bid rents decrease with the distance to the business districts. The demand for housing of individuals working in the CBD is now given by $h_0(x) = (1 + \Delta_\delta) / [4R(x)^2]$. As a result, the equilibrium housing demands for individuals working in the CBD and in the SBD are respectively given by

$$h_0(x) = 4 \left[\frac{1 + \Delta_\delta}{4R_A} - \omega_0 \tau (\widehat{z} - x) \right]^2 \quad \text{and} \quad h_P(x) = 4 \left[\frac{1}{4R_A} - \omega_P \tau \left(\frac{y_P - \widehat{z}}{2} - |z_P - x| \right) \right]^2.$$

City limit when the city is monocentric. The population constraint is now expressed as follows:

$$\int_0^{y_M} \frac{1 + \Delta_\delta}{h_0(x)} dx = \frac{L}{m}$$

or, equivalently,

$$\frac{4R_A^2 y_M}{1 + \Delta_\delta - 4\omega_0 \tau R_A y_M} = \frac{L}{m}.$$

leading to

$$y_M(\Delta_\delta) = \frac{1 + \Delta_\delta}{4R_A^2} \frac{L/m}{1 + \Gamma}$$

City limit when the city is polycentric. The population constraint is now ex-

pressed as follows:

$$\int_0^{\widehat{z}(y_P)} \frac{1 + \Delta_\delta}{h_0(x)} dx + 2 \int_{\widehat{z}(y_P)}^{z_P(y_P)} \frac{1}{h_P(x)} dx = \frac{L}{m}$$

with $\widehat{z} = \frac{y_P}{3} + \frac{\Delta_\delta}{6R_A\omega_0}$ when $\mu = 1$ and $z_P(y_P) = (y_P + \widehat{z})/2$. Hence, we have

$$\frac{4R_A^2 \widehat{z}(y_P)}{1 + \Delta_\delta - 4\omega_0\tau \widehat{z}(y_P) R_A} + \frac{4R_A^2 [y_P - \widehat{z}(y_P)]}{1 - 2\mu\omega_0\tau [y_P - \widehat{z}(y_P)] R_A} = \frac{L}{m}.$$

leading to

$$y_P(\Delta_\delta) = \frac{1}{4R_A^2} \frac{L/m}{1 + \Gamma/3} \left(1 + \frac{\Delta_\delta}{3} \right)$$

so that

$$\widehat{z}(\Delta_\delta) = \frac{1}{4R_A^2} \frac{L/m}{1 + \Gamma/3} \frac{1}{3} \left(1 + \Delta_\delta + \frac{2\Delta_\delta}{\Gamma} \right)$$

with $y_P(\Delta_\delta) - \widehat{z}(\Delta_\delta) > 0$ if and only if $\Gamma > \Delta_\delta$.

Standard standard calculations reveal that $y_P(\Delta_\delta) > y_M(\Delta_\delta)$ as long as $\Gamma > \Delta_\delta$ and that

$$\frac{y_P(\Delta_\delta)}{y_M(\Delta_\delta)} = \frac{1 + \Gamma}{1 + \Gamma/3} \frac{3 + \Delta_\delta}{3(1 + \Delta_\delta)}$$

increases with Γ .

Chapter 2

Efficiency of road pricing schemes
with endogenous workplaces in
polycentric city.

1 Introduction

Urban growth leads to serious traffic congestion in cities worldwide. Emerging economies need to set up some efficient urban policies for congestion management. In the United States, Los Angeles was the most congested city in 2016, and commuters lost 104 hours due to their home-to-work travel (Cookson and Pishue, 2017). In Thailand, commuters lost 61 hours on average in traffic due to congestion, regardless of the city. Long travel time delays are also measured in Colombia, Russia and Indonesia according to a recent study by Cookson and Pishue (2017). To improve travel time reliability, road pricing policies, such as the *cordon toll*, have been implemented in cities around the world (Small and Gómez-Ibáñez, 1997). An urban toll aims to regulate traffic demand within some urban area or over a portion of a road during certain periods. Since 1975, Singapore has charged commuters entering the city center a *cordon toll* to improve traffic flow. Indeed, traffic demand dropped by 45% between 1975 and 1991 (Santos, 2005).

Including a congestion externality in an urban model may reduce the benefits of agglomeration economies. Firms have incentives to be close to each other, hence generating increasing returns and agglomeration economies (external and internal). However, gathering firms in either a Central Business District (CBD) or Secondary Business Districts (SBDs) leads to high land rents at these locations and high commuting costs for workers (Fujita and Thisse, 2013). Over the long run, high home-to-work costs may induce adjustments of job and household locations, which requires close scrutiny. The literature has studied the impacts of congestion on urban density and land use using standard monocentric city models since the seminal work of Solow (1972). He is one of the few authors that incorporated both land use for road infrastructure and congestion into an urban economic model to determine the optimal allocation of land for road infrastructure¹. Several studies have used the standard but empirically questionable monocentric model for convenience (Anas and Kim, 1996). Land in the CBD can be exclusively allotted to firms (Wheaton, 1998; Brueckner, 2007; Larson and Yezer, 2015) or to mixed use (Anas and Kim, 1996; Fujita and Ogawa, 1982). Arnott (1979) developed a theoretical model with congestion without internalizing this externality, unlike Solow (1973, 1972). He extended Solow's work on the relationship between private land value and social land value in both residential and road use. The decision to internalize congestion is at issue, as noted by Arnott's works (1979, 2007). As workers respond to a pricing scheme over the long run, complete internalization of the negative externality imposed on other urban dwellers may not be efficient when a second market failure exists (Tikoudis *et al.*, 2015).

¹Strotz (1965) was the first to study the optimal provision of road facilities using a monocentric model with congestion.

Our objective is to understand the evolution of urban congestion and welfare by re-locating jobs in SBDs. This paper assesses which urban land use regulations and road pricing schemes improve the welfare of the whole city. Three different taxes on commuters are evaluated: a *Pigouvian tax*, a *flat tax* and a *cordon toll*. The urban model is a polycentric city with two externalities: (i) positive agglomeration economies yielding a wage premium in the CBD compared to the SBDs and (ii) a negative congestion externality due to home-to-work commutes. Work and residential places are interdependent in household location choices. Several authors have examined road pricing schemes effects using standard monocentric models (Wheaton, 1998; Brueckner, 2007; Tikoudis *et al.*, 2015), whereas only a few have investigated the same effects in polycentric cities (Zhang and Kockelman, 2016a). This approach enables us to reflect the tendency of developed cities (e.g. Los Angeles, Paris, Boston) to evolve toward decentralized and non-monocentric forms. Therefore, we can discuss the efficiency effects and other impacts of urban policies (e.g., taxes and redistribution) in relation to previous work on the monocentric case. In addition, the decentralization of jobs within a city may reduce the average commuting distance and thus reduce traffic congestion for each commuter compared to a monocentric city. This study has similarities with works by Zhang and Kockelman (2016a, 2016b). They evaluate different urban policies and measure their impacts on job decentralization, population density and firm distribution. However, they do not focus on the optimal allocation of jobs within a polycentric city in relation to road pricing schemes. We provide analytical solutions regarding the no-toll equilibrium, as well as the optimal and second-best sizes of SBDs. In addition, our results are not based on simulations.

I find that the *Pigouvian tax* on commuters is not optimal. This can be explained by the presence of two market failures in the urban economy: congestion and job misallocation within the city. This tax cannot kill two birds with one stone, namely, reducing the congestion externality for given workplace locations and yielding the optimal spatial allocation of firms. Firms do not take the social costs of congestion into account when they decentralize jobs in the outskirts yielding too large SBDs. In a no-toll equilibrium, the CBD (the residential area where workers live) is larger than optimal. A large proportion of workers is eager to commute to the city center due to the CBD's wage premium compared to the SBDs. The private marginal gain of being closer to the CBD is greater than the marginal cost incurred by those who already live there.

For a given city size, the *Pigouvian tax* on commuters makes the CBD too small in a polycentric city. In other words, the SBD expands and increases the congestion externality of each road user around the workplace. This second-best policy heavily corrects the congestion externality because firms do not take the effects of jobs decentralization on congestion delay into account. This is due to (i) the free location decisions of workers

and (ii) endogenous workplaces. A *flat tax* and a *cordon toll* do not achieve an optimal location for the SBD. This chapter recaptures the effects of road pricing schemes that have been demonstrated in the literature on monocentric city. Tikoudis *et al.* (2015) use numerical simulations in a different context and include a labor tax in their model with road pricing schemes to study the tax interaction effects. Their results clarify that a road toll is necessary and welfare improving when no distortions exist in the labor market. Tikoudis *et al.* (2015) and Verhoef (2005) agree that a *flat kilometer tax* is more efficient than a *cordon toll* in a monocentric structure. However, when a polycentric structure emerges, this result does not hold, as the efficiency of the *cordon toll* or the *flat tax* depends mainly on the wage gap between the business centers before the implementation of the road pricing scheme. Based on the initial location of the SBD (a SBD that is too small or too large), a *flat tax* may be less (resp., more) harmful than a *cordon toll*.

Related literature . Urban forms and traffic volume in cities with resulting congestion externalities are treated separately. Adding these features affects firm and household location choices within a city. Two bodies of literature address both urban and transport issues. First, the standard urban model (i.e., the monocentric city) has been used since Solow (1972) to address road land use and traffic congestion. One or more urban policies were evaluated in the case of one (Arnott, 1979; Wheaton, 1998) or two (Wheaton, 2004; Tikoudis *et al.*, 2015) externalities in a monocentric city. Wheaton (1998) focused on urban form evolution when the congestion externality is correctly internalized, examining the impacts on resident density and transport capacity in a monocentric circular city. Wheaton (2004) and Arnott (2007) were interested in the interplay between congestion and agglomeration externalities, and Tikoudis *et al.* (2015) questioned the impacts of various second-best road tolls on the labor market and welfare in the long run in order to observe households' decisions to adjust their labor supply and commuting distances.

Second, congestion management has been considered more recently for the polycentric city. Anas and Kim (1996) studied the impacts of congestion on urban structure in a model of a linear, "narrow" city with a link-node road network and households, firms and shopping centers with endogenous locations. In more recent studies, Anas (2013) and Zhang and Kockelman (2016a) analyzed the effects of road pricing schemes on workplace and residential locations as well as on wages, rents, housing prices and land development. Anas (2013) provided some insights for the city of Chicago, whereas Zhang and Kockelman (2016b) considered a general equilibrium model including both agglomeration and congestion externalities with labor market and land use patterns. Extension of the analysis of the impacts of congestion pricing policies on land use, rents and firm locations to a polycentric structure is a recent development in urban economics, as illustrated by Zhang and

Kockelman (2016a). However, the existing literature has not fully addressed the impacts of road pricing policies on the size of the CBD when two externalities interplay. This study provides new insights and thus helps enrich knowledge in this stream of literature.

The paper is organized as follows. In section 2, we describe our model's assumptions. Then, we briefly focus on road pricing scheme effects in a monocentric model in which households face congestion costs. In section 4, we present the configuration in which the polycentric city hosts homogeneous households in the city with a wage gap between the business centers in order to find the equilibrium and optimal size of SBDs. In section 5, we evaluate the efficiency of the three road pricing schemes in terms of congestion management and the allocation of jobs. We then perform one simulation with a set of fixed parameter values to confirm or reverse our analytical results and discuss our results by extending the model to include two transport modes in particular. Section 8 concludes.

2 The model

The urban economy designed here builds on the basic model from Denant-Boèmont *et al.* (2018) and Cavailhès *et al.* (2007). Only one closed-form linear city is built with a fixed population L . While Gaigné *et al.* (2012) analyzed an urban system and the carbon footprints of both firms and households in different city structures, this model copes with congestion and agglomeration externalities within a single city, especially a polycentric structure. The monocentric city is used to compare our findings with those reported in the previous literature (Tikoudis *et al.* 2015; Wheaton, 1998; Arnott, 2007). Locations of SBDs are determined endogenously in the polycentric city.

2.1 The city

Consider a city endowed with $L > 0$ homogeneous workers who are free to choose their residential location and workplace. The city is described by m one-dimensional half-lines sharing the same initial point $x = 0$. Firms are located either in the CBD or in an SBD. Firms do not use land so that households and firms do not compete for land. Both the CBD and the SBDs are surrounded by residential areas occupied by workers and transport infrastructure. Distances and locations to the CBD are expressed by the same variable x measured from 0. Individuals travel only for commuting purposes. They use a single one-way road that ends at the location of their respective workplace. No wasteful commuting occurs in equilibrium. Each worker decides to locate as close to her workplace as possible because spatial mismatches would not maximize her utility. The CBD border $\hat{z}$ and the location of the SBD z_S along each spoke are determined endogenously (the city is assumed to be symmetric around the CBD). The supply of housing floor space δ is constant per unit of distance from the CBD and normalized to 1. At each location x , a and $(1 - a)$ are the exogenous fractions of land devoted to residential purposes and road infrastructure, respectively. The job allocation within the city in relation to transport-related congestion stemming from the flow of commuters is the primary consideration. Therefore, the parameter a is exogenously given, leading to a particular land use pattern (Solow and Vickrey, 1971)². Accordingly, the total housing space available is equal to may , with city size y representing the radius limit from the CBD.

²The optimal allocation of road facilities has already been discussed in the literature (Strotz, 1965; Solow, 1973, 1972). I do not focus on the optimal land use allocation of residential and road capacities in the model, enabling me to disentangle the different effects at work.

2.2 Households

As a matter of fact, only one class of worker is considered in our model. They earn income ω_i with $i = C$ when they work in the CBD or $i = S$ in a SBD. These households have the same preferences and the same utility function, which depends on two consumption goods: land, which is used as a proxy for housing, and the numéraire given by:

$$U(q, h), \quad (2.1)$$

where q is the consumption of the numéraire, and h is the consumption of housing floor space. Housing demand is assumed to be constant and normalized to 1; hence, $U(q, h) = q$. As a consequence, the residential density is constant per unit of distance and does not replicate the widely demonstrated fact that population density is decreasing with the distance from the CBD (Brueckner, 1987). Thus, the fixed city size y depends only on exogenous components because our main interest in this study is to observe the rise and fall of the relative share of jobs in the CBD. In addition, the traditional trade-off between low/high land rents and long/short journey to work is respected, as in numerous urban economic models with fixed lot sizes (Lucas and Rossi-Hansberg, 2002; Gaigné *et al.*, 2016)³. Each household reaches a common utility level $\bar{U}$ within the city in equilibrium. The time constraint of a worker located at x is given by:

$$1 = T_L + T(x), \quad (2.2)$$

where T_L is the amount of labor time, and $T(x)$ is the commuting time from her residential location x to the business district's location z_i , with $z_i = 0$ (resp., $z_i = z_S$) if her job is located in the CBD (resp., SBD). Hence, $T(x) > 0$ is the endogenous time spent commuting per unit of distance. It depends on the congestion imposed by other travelers and the transport mode⁴. The budget constraint of a worker located at x can be written

³Including an endogenous housing demand would increase mechanically the city size while the share of land use devoted to housing is fixed. When a polycentric structure emerges, the average land rent decreases as there are new subcenters. Indeed, these subcenters relax the pressure on land rent near the CBD location. For a given housing size, city limit remains fixed. But, when a monocentric city shifts to a polycentric city, housing demand adjusts. Each household live further out her workplace because the average land rent has lowered. To solve the population constraint, the city has to expand. Therefore they live in larger housing size in a larger city. All things being equal, the size of the CBD increases as well. As a consequence, the congestion delay would rise for each commuter within the city but this negative externality slows down the urban sprawl simultaneously. As long as the size of the CBD does not equal y , each worker will face a lower extra travel time against a monocentric structure. This is also true when the city size is fixed. Our main objective is to determine the effects of three road pricing schemes disregarding the long-run changes of the size of the city.

⁴In this model, time allocated to sleep and leisure is not taken into account. A model with fixed working times and endogenous leisure time would not qualitatively change our results. A case study with

as follows:

$$\omega_i(1 - T(x)) + \bar{G} + \bar{R} = q + \frac{R(x)}{a}h(x) + t_0(x) + \tau_k(x), \quad (2.3)$$

where $k = \text{Pigouvian tax, flat tax or cordon toll}$, t_0 represents the total pecuniary costs of transportation between the workplace and the residence, and $R(x)$ is the land rent at x . $R(x)/a$ is the price paid by a consumer to reside at x . The transport costs contain a fixed component t_0 reflecting fuel, insurance and average maintenance costs for using a car. Thus, the pecuniary costs of using a car differ only with the distances traveled by workers. In the absence of road pricing schemes, no transfer is received by workers (i.e., it is a competitive market). When a road pricing scheme is implemented, tax revenues and aggregated land rents ALR_j ($j = M$ for a monocentric city and $j = S$ for a polycentric one) are returned via a lump sum with $\bar{G}$ and $\bar{R}$:

$$\bar{G} = \frac{G_k}{L}, \quad (2.4)$$

and:

$$G_k = ma \int_0^y \tau_k(x) dx,$$

where G_k is the total amount of tax collected. They receive the second amount given by:

$$\bar{R} = \frac{ALR_j}{L},$$

where:

$$ALR_j = m \int_0^y R(x) dx \quad (2.5)$$

is the aggregate land rent at the whole city. This approach is in line with previous work by Zhang and Kockelman (2016a) and Tikoudis *et al.* (2015). We implicitly assume that a benevolent planner levies a tax on off-farm land rents and redistributes it to residents. Otherwise, households incur a welfare loss due to a change in aggregate land rents when policies are implemented in this closed-city model (Solow, 1973; Parry and Bento, 2001).

2.3 Congestion costs and transport infrastructure

A stationary-state congestion model is implemented in the urban economic model (see Small *et al.*, 2007). All workers take a single road to commute. They face no costs to enter the road, which has no distinctive features such as traffic signals or stops. All homogeneous users are assumed to drive a car with the same characteristics. They face a travel time cost that depends on the number of users on the road at any point and the

two transport modes is discussed at the end.

fraction of land devoted to roads. The road's length corresponds to the city size y . Travel time is increasing with the number of commuters on the road. Households commute to the edge of the CBD and/or of the SBDs according to their residential location. Here, $f(x)$ denotes the cumulative number of travelers using the single road who live beyond the distance x . The travel time per unit of distance at the portion x has the following form⁵:

$$\tau_0 + \tau_1 f(x)^\beta \quad \text{with} \quad \beta = 1 \quad (2.6)$$

$$f(x) = \begin{cases} \int_x^{\widehat{z}} \frac{l}{(1-a)} dz, & \text{if } x < \widehat{z} \\ \int_x^y \frac{l}{(1-a)} dz, & \text{if } x > z_S \\ 0, & \text{if } x = y. \end{cases} \quad \text{and} \quad l = \frac{a}{h} \quad (2.7)$$

The free-flow travel time is equal to τ_0 , and the second term includes the time delay at x induced by the cumulative number of road users living beyond x . This means that the average speed decreases when traffic density increases; namely, there is pure flow congestion. τ_1 is a sensitivity parameter multiplied by the aggregate traffic flow $f(x)$ arriving at a location x along the road. The magnitude of β is widely discussed in the literature (Small, 1992; Arnott *et al.*, 2005) but no consensus has emerged. Arnott (2007) notes that empirical estimates are close to 1.0 when long roads are considered. This travel time function yields a specific traffic congestion at the segment x . The travel demand of drivers living before x is not included in this function. Nevertheless, we must consider the traffic slowdown when they take the road. Furthermore, each commuter living in x imposes a travel delay on other road users living before and beyond x . In turn, these road users cause congestion externalities incurred by each commuter living in x . Thus, we integrate this travel time from the workplace location (the destination) to the trip origin (the residential place) to consider an aggregate congestion externality. We obtain the total commuting time of an individual living at distance x , which is expressed as follows:

$$T(x) = \begin{cases} \int_0^x [\tau_0 + \tau_1 \int_x^{\widehat{z}} \frac{a}{h(1-a)} dz] dx, & \text{when } 0 < x < \widehat{z} \\ \int_{z_S}^x [\tau_0 + \tau_1 \int_x^y \frac{a}{h(1-a)} dz] dx, & \text{when } z_S < x < y \\ - \int_{z_S}^x -[\tau_0 + \tau_1 \int_x^{\widehat{z}} \frac{a}{h(1-a)} dz] dx, & \text{when } \widehat{z} < x < z_S. \end{cases} \quad (2.8)$$

It allows us to obtain the travel time per unit of distance near the resident's location. Then, we can quantify the total travel time to her workplace. Incurred congestion is measured at x , which leads to a travel delay along a worker's journey to her business district. As

⁵see Small *et al.* (2007), Arnott (2007) and Tikoudis *et al.* (2015)

there exists spatial symmetry around the SBD, the second term of the equation can be used to measure congestion along the road section from $\hat{z}$ to z_S . Then, we insert the total commuting time (2.8) and the time constraint (2.2) into the budget constraint (2.3) to obtain the indirect utility of a worker:

$$V_C(x) = \omega_C - \omega_C \left[x(\tau_0 + t_0) + \frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \left[\hat{z}x - \frac{x^2}{2} \right] \right] - \frac{R(x)h}{a} + \tau_k(x) + \bar{G} + \bar{R}. \quad (2.9)$$

when she lives in and commutes to the CBD and:

$$V_S(x) = \omega_S - \omega_S \left[(x - z_S)(\tau_0 + t_0) + \frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \left[y(x - z_S) + \frac{z_S^2 - x^2}{2} \right] \right] - \frac{R(x)h}{a} + \tau_k(x) + \bar{G} + \bar{R}. \quad (2.10)$$

when she lives in and commutes to the SBD. Accordingly, in a competitive market framework, the household that places the highest bid obtains housing at x , which is in line with Alonso (1964) and urban economic models. Households spend their income, net of the opportunity cost of commuting and the monetary costs of transport, on housing and a composite good. This allows us to capture a basic trade-off between land rents and commuting costs.

2.4 Urban toll

We examine three sets of policies in order to tackle the congestion externality caused by travel demand: a *Pigouvian tax*, a *flat kilometer tax* and a *cordon toll*. As congestion delays increase the travel time per unit of distance, this externality may be priced in our model and enter the budget constraint of each household. In the budget constraint, the component $\tau_k(x)$ reflects the level of tax (τ_k) each commuter pays during her home-to-work journey. First, we implement a *Pigouvian tax* ($\tau_k(x) = \tau_P(x)$) that prices the marginal external cost of congestion. A commuter at x imposes travel time delays on other commuters living before and after her location x . It concerns commuters using the same road segment towards a common destination. Accordingly, we price this externality by multiplying the additional travel time per unit of distance by the opportunity cost of working time $\left[\frac{\omega_i}{T_L + T(x)|x - z_i|} \right]$. The labor supply is inelastic within the city, and each worker can place a higher bid to move closer to her workplace with this gross value of time to avoid a travel time delay. The wage rate is divided by the total time endowment

normalized to 1 uniformly. Hence, the toll is expressed as follows⁶:

$$\tau_P(x) = \begin{cases} \int_0^{\widehat{z}} \left[\frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \int_x^{\widehat{z}} \omega_C \, dz \right] dx, & \text{when } 0 < x < \widehat{z} \\ \int_{\widehat{z}}^x \left[\frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \int_x^y \omega_C \, dz \right] dx, & \text{when } \widehat{z} < x < y. \end{cases} \quad (2.11)$$

This is a location-constrained first-best policy, as workers are free to choose their residential location according to their bid rent. In addition, this tax does not correct its capitalization in aggregate land rents. Second, we analyze another second-best policy that aims to reduce congestion externalities. A *flat kilometer tax* is levied with no differentiation among commuters. This tax does not vary over space or time. It is only proportional to the traveled distance. Each worker commutes to her workplace within the city:

$$\tau_F(x) = t_F x \quad \text{with } t_F > 0 \quad (2.12)$$

A *cordon toll* is then the other road pricing scheme we consider. Commuters living beyond the location $\alpha\widehat{z}$ ($0 < \alpha < 1$) of the toll are charged, while those living at $x < \alpha\widehat{z}$ face no toll⁷. The charging function is given by:

$$\tau_C(x) = \begin{cases} c & \text{if } \alpha\widehat{z} \leq x \leq \widehat{z} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.13)$$

All roads charge tolls to prevent traffic from being reallocated to other roads.

2.5 Wages

In line with the models of Fujita and Ogawa (1982) and Lucas and Rossi-Hansberg (2002), firms produce a composite good. Their only production factor is labor. Each firm makes a profit denoted Π_i whether it produces in the CBD ($i = C$) or in a SBD ($i = S$):

$$\Pi_i = pq_i - \omega_i T_{Li} \quad (2.14)$$

⁶The details of calculations are reported in Appendix B.

⁷ α is purely exogenous in this case and does not represent a location of the cordon, which would maximize the indirect utility as in Verhoef's (2005) numerical simulations. We have left aside the debate about the optimal location of the cordon discussed in the literature (Mun *et al.*, 2005; Verhoef, 2005). Our main interest is analyzing the pecuniary and job relocation effects due to this pricing scheme. However, we indirectly find an optimal location of the cordon ($\alpha\widehat{z}^O$) through the endogenously determined optimal size of the CBD ($\widehat{z}^O$).

where p is the output price, q_i is the output size with $q_i = \mathbf{A}_i T_{Li}^\gamma$, $\mathbf{A}_i \geq 1$ and $\gamma \leq 1$, and T_{Li} is the total labor time units⁸. $\mathbf{A}_i$ is a positive agglomeration externality depending on the business centers (CBD and SBDs). This term affects productivity as a positive multiplier. Firms clustered in the CBD take advantage of a more efficient environment that takes concrete form as a productivity drop $\mathbf{A}_C > \mathbf{A}_S = 1$ ⁹. $\mathbf{A}_C$ is increasing with positive agglomeration economies in the CBD. We assume that wages are fixed by firms. The maximization of (2.14) with respect to labor time T_{Li} implies the following labor demand:

$$p\mathbf{A}_i\gamma T_{Li}^{\gamma-1} = \omega_i \quad (2.15)$$

so that $\Pi_i = (1 - \gamma)p\mathbf{A}_i T_{Li}^\gamma = (1 - \gamma)[p\mathbf{A}_i]^{\frac{1}{1-\gamma}}[\gamma/\omega_C]^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$, where we have inserted (2.15) into (2.14). In equilibrium, $\Pi_C = \Pi_S$ leads to:

$$\omega_C = \mathbf{A}_C^{\frac{1}{\gamma}} \omega_S$$

Hence, $\mu = \omega_S/\omega_C = \mathbf{A}_C^{-1/\gamma}$. As a consequence, the wage gap between business centers depends on the magnitude of agglomeration economies $\mathbf{A}_C$ and diseconomies of scale γ .

2.6 Welfare

Finally, we can derive the Welfare that represents the aggregate indirect utility within the closed city¹⁰. The sum of the indirect utilities of tenant workers, the land rent incomes of absentee landlords are an integral part of this welfare. Under a no-toll equilibrium, welfare is expressed as follows:

$$\begin{aligned} W^* &= \frac{ma}{h} \left[\int_0^y \omega_i (1 - T(x)) dx - \int_0^y t_0 x dx \right] - ALR_j \\ &+ \left[ALR_j - m \int_0^y R_A dx \right] + m \int_0^y R_A dx \end{aligned}$$

with:

$$ALR_j = m \int_0^y R(x) dx$$

Land rent incomes are the aggregate land rents paid by tenant workers minus agricultural land rents R_A redistributed to landlords living outside the city. Finally, agricultural

⁸We suppose that the marginal productivity of labor is non-increasing in line with Lucas and Rossi-Hansberg (2002).

⁹Agglomeration economies exist in CBDs, but thanks to new information and communication technologies, decentralization of jobs occurs within the city (Baum-Snow and Pavan, 2012).

¹⁰The first part of the aggregate welfare is the difference between aggregate incomes and aggregate congestion, commuting and housing costs in a city (Wheaton, 2004). The second part is the distribution of rents to absentee landlords.

landowners benefit from agricultural land rent incomes. The purpose of this chapter is to analyze the impacts of the road pricing schemes on welfare and on the city structure. Furthermore, one of the main goals is to determine the conditions under which aggregate welfare is maximized within the closed city.

3 The monocentric city

A standard monocentric spatial configuration is used to determine how our policy interventions (i) are capitalized in land rents and (ii) affect welfare. The welfare of the closed city is evaluated under an unpriced congestion framework and three different tax implementations (*Pigouvian tax*, *flat tax* and *cordon toll*). Finally, we compare the policies' impacts.

One single business district (the CBD) gathers all of the city's jobs. Each worker lives in the residential areas within the city. The city border y solves the total population constraint given by:

$$L = m \int_0^y l dx \quad (2.16)$$

in which l is the population density at each residential location x with $l = a/h$. Solving (2.16) by using $l = a/h$ yields the city radius size in equilibrium:

$$y_M = \frac{Lh}{ma} \quad (2.17)$$

when all jobs are located in the CBD (see Appendix A). We observe that the city border decreases with respect to both the number m of built-up areas and the proportion a of residential areas at each unit of distance. The city fringe increases with the total population. Note also that a decrease in housing floor space ($\delta < 1$) per unit of land leads to urban sprawl. In this closed city, the travel time function $\tau(x) = \tau_0 + \tau_1 f_M(x)$ depends on the cumulative flow of users at x given by:

$$f_M(x) = \begin{cases} \int_x^{y_M} \frac{a}{h(1-a)} dz \\ 0 & \text{if } x = y_M \end{cases}$$

The total commuting time of an individual living at distance x from the CBD is expressed as follows:

$$T_M(x) = \int_0^x \left[\tau_0 + \tau_1 \int_x^{y_M} \frac{a}{h(1-a)} dz \right] dx$$

leading to:

$$T_M(x) = x\tau_0 + \tau_1 \frac{a}{h(1-a)} \left[y_M x - \frac{x^2}{2} \right] \geq x\tau_0 \quad (2.18)$$

The free-flow travel time $x\tau_0$ and the congestion delay $\tau_1 \frac{a}{h(1-a)} \left[y_M x - \frac{x^2}{2} \right]$ are monotonic curves ($x \leq y_M$) and can be represented as follows:

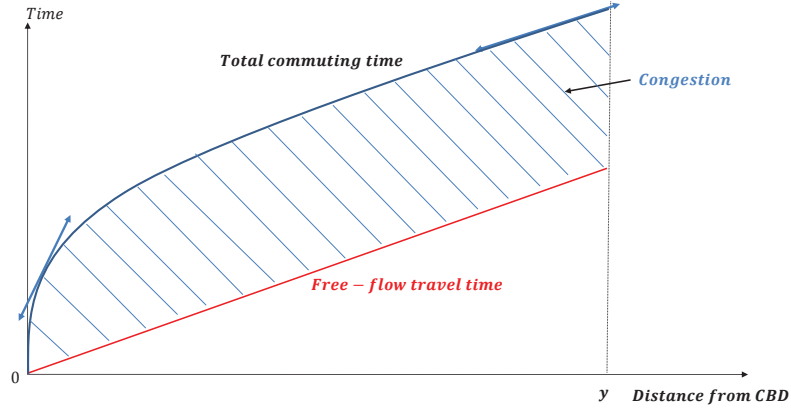


Figure 2.1: Evolution of the components of the total commuting time function with respect to the distance to the CBD in a monocentric city configuration.

Note that our congestion delay cost function is increasing at a decreasing rate. The marginal travel time cost is higher towards the CBD than outwards from the CBD. Accordingly, the opportunity cost of the commuting time is higher near the city center than in the outskirts. An individual living near the CBD will have a lower commuting time due to an infinitesimal move $(x - dx)$ than that of an individual living near the city border. Living near the border implies high transportation costs. Congestion delay costs increase with x , but land rents are cheaper in the outskirts. The effect of a on the congestion externality is unclear. Indeed, when a increases, the city limits shrink, which implies a decrease in traveled distances. However, the road's capacity $(1 - a)$ falls, leading to an ambiguous result for a given population density.

Homogeneous workers choose their living places with respect to their budget constraints. Housing rents and commuting costs vary with the distance from the CBD. They maximize their indirect utility. R_A is the agricultural value of land at the city limits. In equilibrium, the bid rent at each location is given by $R(x) = \max \{\Psi_M(x), R_A\}$. The bid rent $\Psi(x)$ must solve $\partial V(x)/\partial x = 0$. All households share the same indirect utility. In equilibrium, the distribution of urban dwellers is such that $V(x) = V(y)$ regardless of x . Hence, there are no incentives to relocate in a no-toll spatial equilibrium. Then, we plug (2.18) into the indirect utility using (2.17); hence, we obtain the individual welfare in equilibrium:

$$V_M = \omega_C - \frac{Lh}{ma} \left[\omega_C \tau_0 + t_0 + \frac{\omega_C \tau_1 L}{2m(1-a)} \right] - \frac{R_A h}{a} \quad (2.19)$$

Using (2.18) and indirect utility (2.19), we obtain the bid rent function in equilibrium¹¹:

$$\Psi_M(x) = \frac{a [2h(1-a)(\omega_C\tau_0 + t_0)(y_M - x) + \omega_C\tau_1 a(y_M - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A \quad (2.20)$$

At each unit of distance, the land rent capitalizes the opportunity cost of commuting time, the monetary transports costs and the external costs imposed on all commuters. The land rent decreases with respect to the distance x from the CBD. The bid rent equals the agricultural land rent R_A when an individual lives at the city border ($x = y_M$). When a increases marginally, the effects are unclear, as demonstrated for the congestion externality. On the one hand, land rents are lower due to the greater housing floor space per unit of distance, but on the other hand, the road's capacity decreases, leading mechanically to more congestion. Hence, longer congestion delays raise land rents due to the lack of road capacity.

The indirect utility includes income net of pecuniary transport costs (free-flow travel) and land rents ($\omega_C - y_M(\omega_C\tau_0 + t_0) - \frac{R_A h}{a}$). This latter term is called *private welfare*, as it represents the consumption of private goods. The second one refers to the congestion externality related to the number of commuters on the road and the road's width $\left[\frac{\omega_C\tau_1 a y_M^2}{2h(1-a)} \right]$. Standard calculations reveal that the indirect utility is increasing at a decreasing rate with the number of roads m connected to the CBD, as well as with the total capacity of the transportation network $m(1-a)$. Note that a smaller city (i.e., y_M diminishes) reduces the total commuting cost as long as the population density does not adjust. It is clear that a marginal increase in commuting costs and land rents diminishes utility regardless of whether the population density or the number of roads m is given. A growing population has a negative effect on welfare, as it raises the number of commuters and, therefore, the opportunity cost of commuting time through a rise in congestion delay costs. Urban sprawl (i.e., the marginal expansion of y_M) diminishes individual welfare as well, since the maximum traveled distance to the CBD increases.

Welfare and road pricing schemes In a monocentric city, different urban policies do not affect the total congestion level as we consider individuals that have inelastic demand for transport. They do not affect welfare because taxes are redistributed, but they affect each economic agent as a transfer of income¹². The no-toll equilibrium is used as a reference point to discuss our results. Aggregate welfare W_M is calculated under each configuration: (i) the no-toll equilibrium with congestion, (ii) the *Pigouvian tax* and (iii)

¹¹The rent gradient (i.e., the partial derivative of (2.20) with respect to x) is negative, which is in line with other monocentric models (Tikoudis *et al.*, 2015; Verhoef, 2005). In equilibrium, there are no incentives to relocate within the city.

¹²The calculations are reported in Appendix C.

the outcome with a *flat tax* and a *cordon toll*¹³. A tax increases welfare within the city, as the aggregate land rent and toll revenues are returned as a lump sum and remain in the urban economy. The *Pigouvian tax*, a *flat kilometer tax* and a *cordon toll* yield a same welfare level as a no-toll equilibrium. For given city limits and housing size, the three road pricing schemes differ only in their revenue distribution. In the absence of a lump-sum redistribution of land rents, tenant workers are worse off than in an unpriced congestion context. Indeed, land rents capitalize both congestion externalities and tax levels, leading bids rent to rise at all locations as long as the city limits do not change. Landlords would benefit more from a pricing scheme that yields the highest land value. The second-best policies yield higher bids rent than those in the no-toll equilibrium at all locations as long as housing size and city limits remain fixed (Appendix C). With the *flat tax*, workers who live at the outskirts pay higher prices due to a longer travel distance than those living close to the CBD. Accordingly, workers living close to the CBD benefit more from the revenue return scheme than do those living near the city limits. Thus, they can bid more to live closer to the CBD, explaining why second-best bids are higher than in equilibrium. Regarding the *cordon toll* implementation, households living in the cordon zone face lower prices given the congestion externality they impose on other road users, while those living outside the central zone face higher prices. A *cordon toll* leads bids rent to increase even in presence of a revenue return scheme. To avoid the toll, households may locate closer to their workplaces when housing demand adjusts. In conclusion, we can say that congestion externality pricing does not reduce travel time due to the inelastic demand for commutes. However, the road pricing schemes differ according to the distribution of the tax burden and the overall beneficiaries. In the next section, we will analyze how the location of jobs affects congestion and demand for commuting via a wage differential between CBD and SBDs within the polycentric city.

¹³A *cordon toll* is set at location αy_M within the monocentric city before entering the CBD. Only workers living beyond αy_M incur this fixed charge to commute to their workplace.

4 Decentralization of jobs and welfare

Traffic congestion and road pricing schemes are now analyzed under a polycentric setting. Jobs are able to relocate in an SBD within the city and wages are fixed. Our main objective is to understand the evolution of urban congestion and welfare by relocating jobs and introducing different taxes.

4.1 The polycentric city

A worker deciding to locate close to the CBD earns a gross wage rate ω_C above the wage ω_S offered by firms in the SBDs. Each business district is surrounded by road infrastructure and residential areas. No worker has an incentive to move from her workplace or residence in the spatial equilibrium. All households live at each location x such that $dV(x)/dx = 0$. In this spatial organization, $\hat{z}$ is the right limit of the area formed by workers commuting to the CBD (i.e., the left limit of the built-up area constituted by individuals working in the SBD). The location of SBDs is determined endogenously through the location of $\hat{z}$. Individuals locate around each SBD symmetrically. Hence, the endogenous location of the SBD z_S is the midpoint of the area between $\hat{z}$ and the city limit y . Therefore:

$$z_S = \frac{y + \hat{z}}{2} \quad (2.21)$$

Notice that the bids rent at y and $\hat{z}$ are equal to the opportunity costs of land R_A . The equilibrium border when the city is polycentric reaches¹⁴:

$$y = \frac{Lh}{am} \quad (2.22)$$

The city limits are identical to the monocentric structure when jobs relocate to the SBDs ($y = y_M$). As housing demand remains fixed, the structural density is the same, and y is unchanged. When jobs relocate to an SBD, the size of the CBD decreases from y_M to $\hat{z}$; hence, workers incur lower transport costs (in terms of both time and money).

Congestion delay and traffic flow. The total commuting time of an individual living at x between the CBD and the limit $\hat{z}$ is derived in the same way as in the previous urban structure. Here, the CBD limit substitutes y_M for $\hat{z}$. Regarding traffic flows toward the

¹⁴The details of these calculations are reported in Appendix D1.

SBDs, the commuting time between the SBD z_S and the border y is expressed as follows:

$$T(x) = \int_{z_S}^x [\tau_0 + \tau_1 \int_x^y \frac{a}{h(1-a)} dz] dx \quad \text{when } x > z_S$$

leading to:

$$T(x) = (x - z_S)\tau_0 + \frac{\tau_1 a}{h(1-a)} [y(x - z_S) + \frac{z_S^2 - x^2}{2}] \geq (x - z_S)\tau_0 \quad (2.23)$$

Notice that whether z_S rises, the total commuting time to this location decreases because the CBD limit expands leading to shrinkage of the SBD area. As there is symmetry around an SBD, a worker living at location x between $\hat{z}$ and z_S or between z_S and y incurs the same travel distance and congestion delay (see equation 2.23). Therefore, the subsequent analytical properties focus on workers living at the right side of the SBD. Commuters use one single mode of transport to travel, and they obtain the same level of utility within the city. A worker living in the area between the CBD and $\hat{z}$ has no economic incentives to work in a SBD. No wasteful commuting occurs in equilibrium. Each traffic flow towards the SBD starts from $\hat{z}$ and y . This means that congestion costs at these points may be lower than in the monocentric configuration. Indeed, a commuter incurs a maximum time delay $\frac{\tau_1 a y_M^2}{2h(1-a)}$ at y_M when one single business center exists. Each worker enters a road where the maximum time delay falls to $\frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)}$ ($\hat{z} < y_M$). Trivial calculations show that the congestion externality decreases for each commuter (see Appendix E). The maximum traveled distance diminishes, and the traffic flow is split between the business districts. Therefore, for a given density, each worker is better off when firms relocate. *Ceteris paribus*, congestion costs will rise for inhabitants working in the CBD regardless of whether $\hat{z}$ or y increases. The following proposition summarizes.

Proposition 1. *When a share of jobs relocates to a SBD at the edge of a city, the congestion externality level decreases for each commuter.*

SBD Size. As there are two business districts, a wage gap exists between them in accordance with empirical evidence (see White, 1999; Timothy and Wheaton, 2001). Hence, we define $\omega_S = \mu\omega_C$ ¹⁵ with $0 < \mu < 1$ corresponding to the spread between the two business districts. Furthermore, a worker commuting to the SBD may incur a lower transport cost than one commuting to the CBD. This gives the worker an incentive to work in that subcenter of the city. The size of the CBD $\hat{z}$ is determined by an indifference condition.

¹⁵ $\mu = A_C^{-\frac{1}{\gamma}} = \frac{\omega_S}{\omega_C}$

For a worker living at $\hat{z}$, the traveled distance to the workplace is equivalent: she is indifferent between commuting to the CBD and commuting to the SBD, yielding the following expression:

$$\omega_C \left[1 - (\hat{z}\tau_0 + \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)}) \right] - t_0 \hat{z} = \omega_S \left[1 - (z_S - \hat{z})\tau_0 - \frac{\tau_1 a (z_S - \hat{z})^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 (z_S - \hat{z}) \quad (2.24)$$

The size of the CBD $\hat{z}$ is smaller than the city limits y in this model. Individuals accept work from firms in SBDs when the gross wage ω_S offered is strictly above the CBD's wage net of total transport costs (i.e., the opportunity cost of commuting, congestion delays and pecuniary costs) in a monocentric city. Employers benefit from this relocation of jobs within a city because they pay lower wages. Workers face shorter commutes and pay lower land rents. Whatever the gross wage ω_C offered by firms in the CBD, the decentralization of jobs holds for a certain level of ω_S . As a consequence, the free market equilibrium yields a non-linear expression of the CBD border $\hat{z}(\mu)$. For greater clarity, τ_0 is assumed to be equal to zero¹⁶. Hence:

$$\hat{z}^*(\mu) = \frac{-3t_0(1-a) - \frac{\mu\omega_C\tau_1 L}{2m} + 2(1-a)\sqrt{\Delta}}{\omega_C(2 - \mu/2)\tau_1 a} \quad (2.25)$$

with:

$$\Delta \equiv \left[\frac{3t_0}{2} + \frac{\mu\omega_C\tau_1 L}{4m(1-a)} \right]^2 + \frac{\omega_C(4-\mu)\tau_1 L}{2m(1-a)} \left[\frac{\omega_C(1-\mu)ma}{L} + \frac{t_0}{2} + \frac{\mu\omega_C\tau_1 L}{8m(1-a)} \right] > 0$$

in which (2.21) and (2.22) have been inserted. $\hat{z}$ is implicitly defined by the indifference condition (2.24). The influence area of the SBD (the number of individuals working in the SBD) rises with μ and reaches a maximum when $\mu = 1$ ($\frac{y - \hat{z}^*(\mu)}{2} = \frac{2y}{3}$). The attractiveness of a peripheral business district depends on the average gross wage observed within this SBD. Each worker considers her wage net of total transport and residential costs. For a given city size, a polycentric structure with a prominent business center enables shorter home-to-work distances and reduces pressure on land rents at and close to the CBD. Therefore, transport and rent costs decrease for each commuter. Urban traffic is divided into three flows, and no cross-border commuting between the business districts occurs in equilibrium. As a consequence, all commuters in the city face fewer congestion delays than they would in a monocentric one, but they do not benefit from the most efficient travel time.

The equilibrium land rent at each location is given by: $R(x) = \max\{\Psi_0(x), \Psi_P(x), R_A\}$.

¹⁶Calculations for $\hat{z}(\mu)$ without this assumption are reported in Appendix D2.

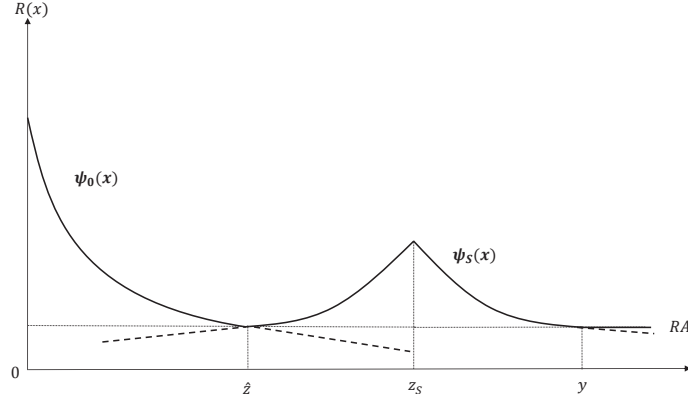


Figure 2.2: Bids rent in equilibrium near each business district and the locations of the CBD ($x = 0$) and the SBD ($x = z_S$) within a polycentric city configuration.

$\Psi_0(x)$ (resp., $\Psi_P(x)$) is the bid rent of individuals working in the CBD (resp., SBD). $\partial V(x)/\partial x = 0$ implies:

$$\Psi_0(x) = \frac{a [2h(1-a)(\omega_C \tau_0 + t_0)(\hat{z}^*(\mu) - x) + a\omega_C \tau_1(\hat{z}^*(\mu) - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A$$

and:

$$\Psi_P(x) = \frac{a \left[2h(1-a)(\omega_C \tau_0 + t_0) \left(\frac{y - \hat{z}^*(\mu)}{2} - |z_S - x| \right) + a\omega_C \tau_1 \left(\frac{y - \hat{z}^*(\mu)}{2} - |z_S - x| \right)^2 \right]}{2h^2(1-a)} + R_A$$

Bids rent decrease with the distance to the business districts (see Figure 2.2). Furthermore, the bids rent remain identical for all $x \in [z_S, y]$ when an SBD is created. Consequently, the average land rent decreases, but the city limits are unchanged when jobs relocate to the edge of the city.

4.2 Equilibrium allocation and optimal location of jobs

The no-toll equilibrium is used as a reference to compare optimal and equilibrium locations of the SBD. In equilibrium, the welfare (i.e., the aggregate indirect utilities) of the polycentric city is expressed as follows:

$$W_S(\hat{z}^*) = \frac{ma}{h} \left[\omega_C \hat{z}^*(1-\mu) + \mu\omega_C y - \frac{(\mu\omega_C \tau_0 + t_0)(y^2 - \hat{z}^{*2})}{2} - \frac{(\omega_C \tau_0 + t_0)\hat{z}^{*2}}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a [4\hat{z}^{*3} + \mu(y - \hat{z}^*)^3]}{12h(1-a)} \right]$$

Hence, inserting equation (2.25) gives us the welfare in equilibrium (Appendix D3). Notice that when $\hat{z}^*(\mu) = y$, the urban economy recaptures the monocentric setting, as $y = y_M$ and $W_S(\mu) = W_M$. Because the size of the SBD depends on the wage gap between the business districts, it is crucial to analyze the effects of jobs decentralization on welfare

according to the level of (μ) . Indeed, we have:

$$W_S(\widehat{z}^*) - W_M = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\widehat{z}^*} V_C \, dx + 2 \int_{z_S}^y V_S \, dx - \int_0^{y_M} V_M \, dx \right] + ALR_P - ALR_M$$

Job relocation to a SBD has an ambiguous effect on welfare. The effect depends strongly on the magnitude of the wage differential between business districts. Note that in equilibrium without taxation, the welfare of inhabitants working in the CBD improves when the urban economy shifts from a monocentric to a polycentric configuration. The relationship is more complex for inhabitants living near the SBD. On the one hand, they face both shorter travel distances and less congestion. Thus, their opportunity costs of commuting decrease because their income ω_S is smaller than ω_C . On the other hand, they pay the same rent R_A , and the difference in individual utility depends strongly on the wage gap. Indeed, the wage gap is positive for polycentric city's inhabitants. However, the economic shift has no incentive if the wage discrepancy offsets the opportunity costs of commuting and congestion delays. To understand how the wage gap and commuting time costs affect aggregate welfare, the analysis considers the case where the wage rates observed in the CBD and the SBDs are equal. Then, we consider a more realistic case where workers earn a higher hourly wage in the CBD than in the SBDs. For each case, a free market equilibrium is solved, and aggregate welfare is maximized by a benevolent planner who sets the optimal size of the SBD.

Specific case with no wage gap between the CBD and the SBDs. First, a simple way to disentangle the different effects at work is to equalize the wage rates of the business centers: $\omega_C = \omega_S (\mu = 1)$. Workers living near the CBD (resp., the SBD) face a maximum distance equal to $\widehat{z}$ (resp., $\frac{y-\widehat{z}}{2}$), and traffic is divided into three flows. Hence, there is lower congestion on the roads when jobs relocate to an SBD within a closed city. In equilibrium, inserting $\mu = 1$ into (2.25) leads to $\widehat{z}^* = \frac{y}{3}$, so the free market size of the residential zone near the SBD is equal to $(y - \widehat{z}^*) = \frac{2y}{3}$. This result is identical to the optimal size of the left endpoint of the SBD ($\widehat{z}^{**}$) when welfare is maximized by a benevolent planner¹⁷. As a result, we have:

$$\widehat{z}^* = \widehat{z}^O = \frac{y}{3} \quad (2.26)$$

The free market solution is identical to the optimal location of the CBD limit when the congestion externality is not internalized, provided that no wage gap exists between the business districts. Furthermore, it is straightforward to check that welfare in a polycentric

¹⁷ $\frac{\partial W_S(\widehat{z})}{\partial \widehat{z}} = 0$ leads to a single maximum for $W_S(\widehat{z})$ when $\widehat{z} \in [0, y]$, which reaches $\widehat{z}^O = \frac{y}{3}$. The details of these calculations are reported in Appendix D4.

city ($W_S(\hat{z}^O)$) with an equal wage rate is higher than that in a monocentric setting (W_M) (Appendix D4). It follows that each parameter that marginally increases the population density (m, a) yields a higher differential in favor of the polycentric city, all things being equal. The free market equilibrium and optimal solution of $\hat{z}$ yield similar welfare, which is better than that for the monocentric city. Note that welfare in a polycentric city is decreasing when $\frac{y}{3} < \hat{z} \leq y$ ¹⁸. In other words, welfare is increasing as the size of the CBD decreases in favor of the SBD until $\hat{z}$ reaches $\frac{y}{3}$.

Proposition 2. *Assume that there is no wage gap ($A_C = 1$) and that welfare in equilibrium is maximized when $\hat{z}^* = \frac{y}{3}$ when a share of firms relocates to an SBD. In this case, the free market size is equal to the optimal size.*

Proof. See Appendix D4.

As a consequence, jobs relocation within a closed city makes workers better off than they would be in a monocentric city. It is straightforward to check that $\Delta_W > 0$:

$$\Delta_W \equiv W_S(\hat{z}) - W_M = \frac{m\omega_C\tau_1^2a^2(y - \hat{z})(y + \hat{z})^2}{4h^2(1 - a)} > 0 \quad (2.27)$$

For all $\hat{z} < y$, the polycentric city is welfare improving, since the maximum distance for home-to-work commutes is shorter than y_M ¹⁹. In addition, workers incur a lower level of congestion for each commuting trip when the city size y is unchanged. Thus, the efficient commuting pattern (the minimum home-to-work distance) is achieved when $\omega_C = \omega_S$ in comparison with the monocentric pattern²⁰.

General case with positive agglomeration externalities. We now return to the case where $\omega_S = \mu\omega_C$ with ($0 < \mu < 1$). The expression of the free market CBD limit $\hat{z}^*$ is highly non-linear and implicitly defined by the indifference condition for a worker living

¹⁸We have $W_S(\hat{z} = 0) > W_S(\hat{z} = y)$ and $\frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}}|_{\hat{z}=0} > 0 > \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}}|_{\hat{z}=y}$. In addition, $\frac{\partial W_S(\hat{z})}{\partial \hat{z}}$ has a single extremum when $\hat{z} \in [0, y]$, which is a maximum.

¹⁹Note that when no CBD exists (i.e., $\hat{z} = 0$), the SBD is located in the middle of the total residential area (i.e., $\frac{y}{2}$), as our model is symmetric around the CBD located at $x = 0$. This case is a duocentric city where welfare is higher than in a monocentric city, even when the location of the left endpoint of the SBD does not yield an equilibrium or optimal solution. A particular polycentric pattern leads to the same level of welfare when $\hat{z} = y\frac{\sqrt{5}-1}{2}$ over $[0, y]$. However, traffic is split into two flows, which insufficiently decreases the congestion delay for each commuter. Indeed, only one solution assures that each commuter can minimize her extra travel time (see Proposition 2).

²⁰Note that the city is divided into three equal parts when $\omega_C = \omega_S$ with $\hat{z} = \frac{y}{3}$, and the SBD's size ($y - \hat{z}$) equals $\frac{2y}{3}$.

at an equidistant point between the two business centers. $\hat{z}^*$ is expressed as follows:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 \hat{z} = \omega_S \left[1 - (y - z_S)\tau_0 - \frac{\tau_1 a (y - z_S)^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 (y - z_S) \quad (2.28)$$

The size of the residential zone from which workers commute to the SBD ($y - \hat{z}^*$) depends mainly on the wage gap between the business centers. A wage rate growth in the CBD leads to its expansion at the expense of the size of the SBDs. Standard calculations show that the CBD's size is smaller with free-flow travel time τ_0 , under the three congestion pricing schemes and when the border y decreases. Workers favor commuting to the SBD when the free-flow travel speed $1/\tau_0$ diminishes. Similarly, the CBD's size decreases when the slope (τ_1) of the congestion curve increases (see Appendix D6 for the details of the calculations). When the available floor space ($\delta > 1$) per land unit grows, the CBD's size $\hat{z}^*$ diminishes, and y decreases with the fraction of residential area a . Conversely, city size grows when the lot size h increases. Note that a marginal increase in a leads to a more compact city but lowers the road's capacity, yielding higher congestion delay costs for a given population density.

The determination of an optimal solution by a benevolent planner considers the maximization of aggregate welfare so that $\frac{\partial W_S(\hat{z})}{\partial \hat{z}} = 0$ yields a non-linear $\hat{z}^O$ (see Appendix D7). In this case, the optimal solution and the free market equilibrium are not similar. When $\mu = 1$, we revert to the previous case where the optimal and free market sizes are equal ($\hat{z}^O = \hat{z}^*$). Then, we determine whether the free market size of the area where individuals live near the CBD is too small or too large. Welfare in the polycentric city can be written as follows²¹:

$$W_S = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} V_C \, dx + 2 \int_{z_S}^y V_S \, dx \right] + ALR_P \quad (2.29)$$

At the optimum, $\frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \Big|_{\hat{z}=\hat{z}^O} = 0$ because welfare has reached its maximum. Furthermore, welfare W_S is a concave curve on the interval $[0, y]$ since $\frac{\partial^2 W_S}{\partial^2 \hat{z}} < 0$ (see Figure 2.3 and Appendix D6).

Hence, to find the location of the CBD limit in equilibrium relative to the optimum, we derive welfare with respect to $\hat{z}$ conditional on $\hat{z} = \hat{z}^*$:

$$\frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \Big|_{\hat{z}=\hat{z}^*} = \left[\frac{ma}{h} \left((y - \hat{z}^*) \frac{\partial V_S}{\partial \hat{z}} + \hat{z}^* \frac{\partial V_C}{\partial \hat{z}} \right) + \frac{\partial ALR_P}{\partial \hat{z}} \Big|_{\hat{z}=\hat{z}^*} \right] < 0 \quad (2.30)$$

²¹When we derive W_S with respect to $\hat{z}$, there are no price effect at the aggregate level since all land rents paid by tenant workers are received by absentee landlords.

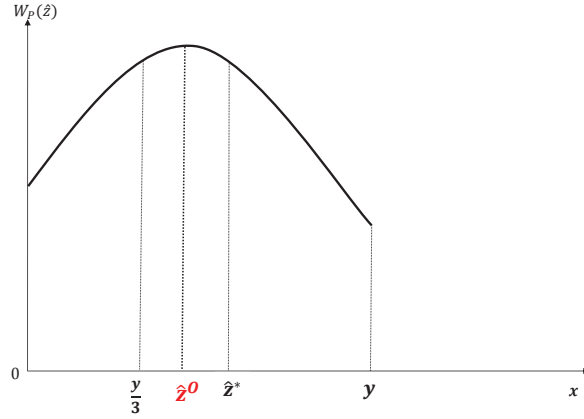


Figure 2.3: The evolution of welfare with respect to $\hat{z}$ within a polycentric city configuration (from the CBD $x = 0$ to the city limits y).

As a result, the free market size of the CBD is greater than optimal. In other words, the free market SBD area is smaller than the optimum under positive agglomeration and congestion externalities²². The intuition is as follows. When the decentralization of jobs occurs, land rents and congestion delays decrease, on average, as a share of workers relocates closer to the new SBD. As a consequence, workers who earned wage rate ω_C have an incentive to remain in the residential zone close to the CBD because their net wage has increased. Then, for a marginal increase of $\hat{z}$, the total commuting time for a worker living near the limit of the residential zone is similar when she moves from x to $x + dx$ ²³. Hence, with a higher wage rate offered in the CBD, most inhabitants commute to the CBD instead of the SBD without taking into account the marginal social costs they impose on other commuters. Accordingly, the size of residential zone near the CBD is larger than the optimum. Regarding the optimal size, it is straightforward to check that $\frac{y}{3} < \hat{z}^O < \hat{z}^*$ as:

$$\left. \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \right|_{\hat{z}=\frac{y}{3}} > 0 \quad (2.31)$$

Briefly, the optimal size of the CBD is larger than $\hat{z} = \frac{y}{3}$ and smaller than $\hat{z}^*$.

Proposition 3. *A free market equilibrium yields a **CBD that is too large** when there is a market failure and a positive agglomeration externality.*

Proof See Appendix D6.

²²Note that we have $\left. \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \right|_{\hat{z}=\hat{z}^*} = 0$ when there are no market failures in our urban model. The size of the CBD in equilibrium is identical to the optimum.

²³In our previous calculations, note that $\hat{z}^*$ is larger than $(y - \hat{z}^*)$, and for a longer distance traveled between the CBD and $\hat{z}^*$, workers experience a marginal negative effect on their indirect utility, which has a larger magnitude than the positive effect experienced by those working in the small SBD. Hence, $\hat{z}^* \frac{\partial V_C}{\partial \hat{z}} > (y - \hat{z}^*) \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}}$.

In the next section, we focus on the spatial and economic impacts of internalizing the external costs of congestion according to three different road pricing schemes. We evaluate their efficiency by comparing the tax-induced size of the CBD and the optimal CBD size.

5 Polycentric city and road pricing schemes

The free market equilibrium under a wage gap yields an inefficient outcome for a polycentric city. Here, our objective is to achieve the optimally sized SBD or to bring $\hat{z}$ closer to that optimal size. Three road pricing schemes are evaluated separately. Each worker pays a tax that affects her income, internalizing the congestion externality imposed on other road users. The tax $\tau_k(x)$ is inserted into the budget constraint of each household, as well as into the revenue return scheme and aggregate land rent redistributions, leading to the following individual welfare:

$$V_S(x) = \omega_i(1 - T(x)) - \tau_k(x) + \bar{G}_S + \frac{ALR_P}{L} - \frac{R(x)h}{a} - t_0x \quad \text{with } i \in [C, S] \quad (2.32)$$

Land rent is given by $R(x) = \max\{\Psi_0(x), \Psi_P(x), R_A\}$. $\Psi_0(x)$ (resp., $\Psi_P(x)$) is the bid rent of individuals working in the CBD (resp., SBD). $\partial V(x)/\partial x = 0$ implies that:

$$\Psi_0(x) = \frac{a[2h(1-a)[(\omega_C\tau_0 + t_0)(\hat{z} - x) + \tau_k(\hat{z}) - \tau_k(x)] + a\omega_C\tau_1(\hat{z} - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A,$$

and:

$$\Psi_P(x) = \frac{a[2h(1-a)[(\omega_S\tau_0 + t_0)(\frac{y-\hat{z}}{2} - |z_S - x|) + \tau_k(y) - \tau_k(|z_S - x|)] + a\omega_S\tau_1(\frac{y-\hat{z}}{2} - |z_S - x|)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A$$

Note that each pricing scheme affects the endogenous CBD size $\hat{z}$, which is recalculated to fit the model. Welfare in the polycentric city with taxes can now be defined as follows:

$$\begin{aligned} W_S &= \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} V_C \, dx + 2 \int_{z_S}^y V_S \, dx \right] + G_k \\ &+ \left[ALR_P - m \int_0^y R_A \, dx \right] + m \int_0^y R_A \, dx \end{aligned}$$

Each commuter pays a charge for using her car but benefits from the redistribution of tax revenues and aggregate land rents, since road pricing schemes are capitalized in land rents. Absentee and agricultural landlords continue to receive their revenues. The impacts of these second-best pricing schemes are examined and the results presented.

The *Pigouvian tax* First, a *Pigouvian tax* is implemented as a location-constrained first-best policy²⁴. Indeed, a benevolent planner decides to fix the location of the SBDs in optimum while we implement this tax when $\hat{z}$ is determined endogenously. This tax must adjust to correctly internalize the behavior of workers who are free to choose their residential locations. A priori, these free decisions would prevent this road pricing scheme from achieving the optimum. Each road user is priced at the exact marginal social cost she imposes on others for a given location and a given workplace. The toll level is expressed as follows:

$$\tau_P(x) = \begin{cases} \int_0^x \frac{\omega_C \tau_1 a}{h(1-a)} (\hat{z} - x), & \text{when } 0 < x \leq \hat{z} \\ \int_{z_S}^x \frac{\omega_S \tau_1 a}{h(1-a)} (y - x), & \text{when } z_S < x \leq y \end{cases} \quad (2.33)$$

Hence, the tax level for a commuter living in x and commuting to the CBD is $\frac{\omega_C \tau_1 a}{h(1-a)} [\hat{z}x - x^2/2]$. Between $\hat{z}$ and z_S , urban dwellers pay the same tax as those living between z_S and y because jobs located in z_S are in the middle of the residential area. Hence, using the tax level in the indifference condition for the location of the CBD limit $\hat{z}$ yields²⁵:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{h(1-a)} \right] - t_0 \hat{z} = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) \tau_0 - \frac{\tau_1 a \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2}{h(1-a)} \right] - t_0 \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) \quad (2.34)$$

Then, we have the following welfare level:

$$W_P(\tau_P) = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0(x) dx + 2 \int_{z_S}^y \omega_S [1 - T(x)] - t_0(x - z_S) dx \right]$$

To find the location of the CBD limit $\hat{z}_P$, we derive (2.26) with respect to $\hat{z}$ knowing that $\hat{z} = \hat{z}_P$, leading to:

$$\frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \Big|_{\hat{z}=\hat{z}_P} = \frac{ma}{h} \left[(\omega_S \tau_0 + t_0) \left(\frac{3\hat{z} - y}{2} \right) \right] > 0, \quad (2.35)$$

as $\hat{z} > \frac{y}{3}$. Hence, the *Pigouvian tax* fails to clear the market due to the free location decisions of workers²⁶. They earn higher wages in the CBD, yielding an equilibrium CBD size that is too large to correctly manage traffic congestion. Including an extra marginal external cost reduces their net wage. They relocate near the SBD, overweighting the marginal loss of remaining near the CBD. As a consequence, the limit of the residential area from which inhabitants commute to the CBD is lower than the optimal location $\hat{z}^O$.

²⁴A first-best policy would fix the residential location of each household and the location of the SBD simultaneously.

²⁵see Appendix F1 for details of calculations.

²⁶There is no reason why $\hat{z}$ should be lower than or equal to $\frac{y}{3}$. When this *Pigouvian tax* is implemented, there is only one solution yielding $\hat{z} = \frac{y}{3}$, namely, when $A_C = 1$.

The CBD limit under this kind of tax is lower than both the equilibrium and the optimal location. The hierarchy is as follows:

$$\hat{z}_P < \hat{z}^O < \hat{z}^* \quad (2.36)$$

As a result, a location-constrained first-best policy excessively internalizes the congestion externality by encouraging SBD overextension within the polycentric city.

Proposition 4. *A Pigouvian tax fails to reach the optimum, yielding a **CBD that is too small** when there is a market failure and a positive agglomeration externality.*

Proof See Appendix F.

The flat tax The following toll is imposed simultaneously on each driver and depends only on the traveled distance:

$$\tau_F(x) = t_F x \quad (2.37)$$

The CBD limit $\hat{z}$ is now implicitly defined by the following expression including the *flat tax* incurred by each individual:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)} \right] - (t_0 + t_F)\hat{z} = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) \tau_0 - \frac{\tau_1 a \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2}{2h(1-a)} \right] - (t_0 + t_F) \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)$$

All commuters face the same tax; hence, workers living near the left endpoint of the SBD may be underpriced and those living near the SBD or the CBD may be overpriced. In addition, workers benefit from the revenue return scheme and receive the same lump-sum payment from the collected taxes. At the aggregate level, we have the following welfare:

$$W_F(\tau_F) = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0(x) dx + 2 \int_{z_S}^y \omega_S [1 - T(x)] - t_0(x - z_S) dx \right]$$

Deriving W_S with respect to $\hat{z}$ conditional on $\hat{z} = \hat{z}_F$ to find the location of $\hat{z}_F$ yields:

$$\left. \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \right|_{\hat{z}=\hat{z}_F} \leq 0 \quad (2.38)$$

Thus, the location of the CBD limit when each commuter pays a *flat tax* could be greater or lower than the optimal location of $\hat{z}^O$. The location depends mainly on the wage gap between the business centers before the implementation of the *flat tax*. As a consequence, the size of the SBD matters, but the optimum will never be achieved unless the wage rates

are equal in both business centers.

The cordon toll A *cordon toll* is set at location $\alpha\hat{z}$ within the CBD area where some inhabitants work. Each commuter living between $\alpha\hat{z}$ and $\hat{z}$ pays a fixed fee to pass the cordon. Workers living inside the cordon are not charged; therefore, they do not pay for the congestion externality they impose on other commuters. The fixed fee to enter the cordon is captured in the rents of those living near the CBD. Hence, there exists a discontinuity in the rent bid at the tollgate location. Moreover, inhabitants living in the SBD area do not pay road taxes and benefit from both tax and aggregate land rent redistribution. The CBD limit is implicitly defined by the following expression:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 \hat{z} - c = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) \tau_0 - \frac{\tau_1 a \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)$$

A priori, in this case, the implementation of a *cordon toll* induces a decrease in the CBD size due to the fee incurred by a few workers living between $\alpha\hat{z}_{CT}$ and $\hat{z}_{CT}$. Commuters living near the cordon will relocate closer to the SBD until it becomes more expensive than living close to the CBD. The welfare function $W_{CT}(\tau_{CT})$ is expressed as follows²⁷:

$$W_{CT}(\tau_{CT}) = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0(x) dx + 2 \int_{z_S}^y \omega_S [1 - T(x)] - t_0(x - z_S) dx \right]$$

Deriving W_S with respect to $\hat{z}$ conditional on $\hat{z} = \hat{z}_{CT}$ to find the location of $\hat{z}_{CT}$ yields:

$$\left. \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \right|_{\hat{z}=\hat{z}_{CT}} = \frac{ma}{h} \left[c + (\omega_S \tau_0 + t_0) \left(\frac{3\hat{z} - y}{2} \right) + \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^2}{8h(1-a)} \right] \leq 0 \quad (2.39)$$

As a result, the *cordon toll* does not achieve the optimal location of the SBD. The location of the CBD limit may be lower or greater than the optimal location according to the initial wage gap between the subcenters and the transport costs incurred by individuals (see Appendix F3). Since the location of the cordon is exogenous, the fixed fee (c) may be too small or too high as well. Indeed, a fee that overprices commuters yield a small CBD and a fee that underprices them leads to a too large CBD. It is straightforward that an increase in the available land for housing lowers the road capacity leading to a small CBD. Conversely, an increase in the lot size spreads out the CBD for a given road capacity.

Proposition 5. *The flat tax and the cordon toll do not perform better than the Pigouvian tax. They yield a CBD that is either too low or too large depending on initial wage gap*

²⁷The details of the calculations are reported in Appendix F3.

between the business districts and the amount of the respective pricing scheme.

Proof *See Appendix F.*

Finally, we need to compare the results of the policies with the help of numerical simulations because it is difficult to find convenient analytical solutions.

6 Comparisons between road pricing schemes

This section simulates a closed city with a fixed limit $y = 2$, where the total population is fixed at $L = 2$ and the agricultural land rent is $R_A = \frac{1}{4}$ for a given wage gap $\frac{1}{\mu} = 2$. This wage gap is chosen since the polycentric city exists under that condition for all case studies. Table 1 shows the different parameter values used for the scenario²⁸. Parameter calibration is in accordance with the transport costs hierarchy used in other numerical simulations in the literature (Tikoudis *et al.*, 2015; Zhang and Kockelman, 2016a) (*i.e.*, $\tau_0 > \tau_1$).

Table 2.1: Calibrated parameters

L	R_A	m	h	δ	a	τ_0	τ_1	t_0	ω_S	$\frac{1}{\mu}$
2	$\frac{1}{4}$	2	1	1	0.5	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	0	2	2

The following parts present the results of simulations conducted for the polycentric city. The numerical settings here guarantee that all individuals benefit from the same amount of toll and rent revenues and share the same indirect utility $\bar{V}$ at all locations under each road pricing scheme.

CBD limit Analytically, this model has demonstrated that a small increase in the wage gap between the CBD and the SBD expands the CBD's area, as measured by $\hat{z}$, in equilibrium. However, the simulations show that the CBD limit under each road pricing scheme is always lower than in equilibrium without taxation. Therefore, they never reach the $\hat{z}^O$ where welfare reaches an extremum. Land use patterns are affected by second-best policies when each business center offers different wage rates. The endogenous left endpoint of the SBD has changed under a *Pigouvian tax*(PT), a *flat tax*(F) and a *cordon toll*(C). For any $\frac{1}{\mu} > 1$, the polycentric city becomes monocentric, reaching the level $\frac{1}{\mu}$ with second-best pricing policies, except for the *Pigouvian tax*. In this case, the polycentric city always exists even if the CBD is the most attractive workplace. When $\frac{1}{\mu}$ approaches infinity, the CBD's size reaches a limit lower than y in the simulations. With a *flat tax* and a *cordon toll*, a polycentric city prevails provided that $\frac{1}{\mu}$ is lower than approximately 4.31 and 4.03, respectively.

Table 2.2: Simulated results of CBD size within a polycentric city according to each road pricing scheme. ($1/\mu = 2$).

	No toll	Optimum	τ_P	τ_F	τ_{CT}
CBD's size, $\hat{z}$	1.577	1.467	1.305	1.489	1.506

²⁸The calibration of all parameters is consistent with the analytical model such that indirect utilities and aggregate welfare are strictly positive.

In other terms, a subcenter no longer has economic interests, as the gross wage offered ω_S is almost 5 times smaller than ω_C under a *flat tax*. Internalizing the congestion externality at any given location mitigates the desirability of traveling to a unique business center. In a way, these findings are in accordance with the non-monocentric model of Zhang and Kockelman (2016b), although our model does not consider endogenous city size. Congestion costs yield higher land rents near the CBD, as each worker wants to reduce her commuting costs (Solow, 1972; Wheaton, 1998). When jobs relocate endogenously, land rents diminish near the CBD. However, marginal congestion pricing for each commuter strengthens their willingness to pay the higher land rents associated with a wage gap between the two business centers. Finally, the optimal size of the residential area for individuals commuting to the CBD is never reached by these road pricing schemes. For $\frac{1}{\mu} = 2$, a *Pigouvian tax* leads to a CBD limit lower than the optimum, and vice versa for the *cordon toll* and *flat tax*. Note that we consider each worker priced at her exact marginal cost under the *Pigouvian tax*. The *flat tax* and the fixed fee to pass through the cordon are similar ($\tau_F = c = 0.148$). This amount of tax represents the marginal cost that pays a worker living at $\frac{y}{3}$. The CBD limit under *Pigouvian taxation* is always lower than the optimal location, as demonstrated analytically.

6.1 Efficiency of the three road pricing schemes in the polycentric city

This part examines the welfare and land use effects of second-best policies, comparing them to the no-toll equilibrium within a polycentric city. First, the implementation of three different instruments is investigated when there is a wage gap between the CBD and the SBDs. Table 2 illustrates relevant characteristics of the no-toll equilibrium, *Pigouvian tax*, *flat tax* and *cordon toll* with equivalent tax rates, except for the location-constrained first-best policy. A welfare improvement at an aggregate level is significant under the second-best instruments mainly due to the redistribution of both tax and land rent revenues. Under a *Pigouvian tax*, the welfare level increases from 5.267 to 5.630, that is, 2% higher than the welfare of the no-toll equilibrium. Indeed, the toll and the aggregate land rents are returned as lump sums to each worker who does not own their housing. When the congestion externality is internalized at each given location, the total travel costs (in terms of time and money) falls from 2.091 to 1.611 for a worker living in $\hat{z}$ and working in the CBD. Total welfare covers all inhabitants, landowners, agricultural landlords and makes them better off with second-best instruments compared to the no-toll equilibrium. Indeed,

Table 2.3: Simulated results of policy instruments within a polycentric city. ($1/\mu = 2$).

	No toll	Optimum	τ_P	τ_F	τ_{CT}
City limit, y	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Total travel time costs at $\hat{z}$	2.091	1.89	1.611	1.930	1.960
Total travel congestion costs at $\hat{z}$	0.00	0.72	0.567	0.148	0.148
Welfare, $W_P(\hat{z})$	5.267	5.34	5.37	5.33	5.32
Percentage change					
against no-toll equilibrium					
City limits (%)		0	0	0	0
Total travel time costs (%)		-9.6	-22.9	-7.70	-6.26
Welfare (%)		2.00	2.00	1.20	1.00

regarding a *flat tax* and a *cordon toll*, welfare is higher by 1.20% and 1.00%, respectively, for a worker. A *Pigouvian tax* and the optimum lead to an increase in the welfare level of 2%. The CBD area where workers live is too small under the *Pigouvian tax*. That is why households living in $\hat{z}$ benefit from the shortest maximum traveled distance between the CBD and their residence.

Travel demand is unaffected, as each worker must commute every day. The rent bids capitalize the tax effects, increasing strongly near each business center. For a given city limit, aggregate welfare is maximized when the CBD limit $\hat{z} = \hat{z}^O$, and the numerical simulations demonstrate that this size is not achieved with a location-constrained first-best policy where congestion is priced and taxes and land rents are returned as lump sums to workers with a wage gap between the business centers (2.2). When $\frac{1}{\mu} = 2$, aggregate welfare is compared across road pricing schemes, which yields:

$$\Delta W_{P\tau} = \begin{cases} W_P(\tau_P) > W_P(\tau_F) \\ W_P(\tau_F) > W_P(\tau_{CT}) \\ W_P(\tau_P) > W_P(\tau_{CT}) \end{cases} \quad (2.40)$$

With these different instruments internalizing the congestion externality, welfare in the polycentric city is always above that in the no-toll equilibrium. Workers are better off under each pricing scheme when they live in a polycentric city until $\frac{1}{\mu}$ reaches $\frac{1}{\mu}$ according to the simulations. Hence, an increasing pecuniary cost of transport through each road pricing scheme leads to a decrease in the CBD size compared to the equilibrium location, which is in accordance with the results of Zhang and Kockelman (2016b) for a given wage gap. The derived analytical solutions are non-linear; hence, the numerical simulations

help us to confirm that $\hat{z}^*$ is always superior to $\widehat{z_{toll}}$ when $1 < \frac{1}{\mu} < \frac{1}{\underline{\mu}}$ ²⁹. Note that for two business centers offering the same wage rate, the CBD size $\hat{z} = y/3$ is similar under the no-toll equilibrium, the optimum, *Pigouvian taxation*, and *flat tax* schemes. These results are in accordance with the literature, as any taxation leads to an increase in the city's compactness (Zhang and Kockelman, 2016a). Road pricing schemes force workers to relocate closer to the CBD in accordance with the findings of Anas (2013). A *Pigouvian tax* decreases CBD size more than the other pricing schemes. The optimal location of $\hat{z}$ is higher than that of $\hat{z}_P$ and lower than $\hat{z}_F$ and $\hat{C}$ according to our simulations.

²⁹The following values have been selected: $L = 2, \omega_S = 2, \omega_C = \frac{1}{\mu}\omega_S, m = 2, \delta = 1, a = 0.5, \tau_0 = \frac{1}{5}, \tau_1 = \frac{1}{6}, h = 1, t_0 = 0,$.

7 Discussion

This section addresses the implementation of a mass transit service close to the CBD and considers the possible impacts on congestion and land rents. The two spatial configurations are compared according to their welfare, congestion levels and wage rates over the long run. Finally, the implementation of a parking policy instead of a pricing congestion policy is discussed.

7.1 Incidence of modal choice on congestion and urban structure

Over 60 million passenger-kms were covered by mass transit in the Ile-de-France region of France in 2014. This transit activity has grown by more than 30% since 2000 (CGDD, 2016). Therefore, to remain realistic, assume that another mode of transit is introduced in the city, public transport (bus). This mode uses a transportation infrastructure assumed to be provided by a public planner (municipal government) at no cost. The market area of this mass transit mode is between the CBD ($x = 0$) and x_B . As there exists mixed land use for transport modes, workers prefer using mass transit over their car when they live close to the CBD (Limtanakool *et al.*, 2006). Furthermore, car ownership levels increase with the distance from the city center (Dasgupta *et al.*, 1985). Assume that each worker in this area lives close to a bus stop, so they face no costs of access. Hence, between the CBD and the outer border of the public transport area x_B , the road's capacity $(1 - a)$ is equally divided between car and bus lanes on the single road. Beyond x_B to y , each worker uses exclusively her car. A mass transit user faces only a commuting time cost that is higher than the free-flow travel time of car users. This cost depends on the waiting times at bus stops and the travel time to the destination³⁰. In other words, $T_B(x) > T_A(x)$ without a congestion externality, but passengers pay a fare t_B , which is lower than average capital cost t_0 of car ownership. To sum up, transport pecuniary costs are given as follows:

$$t_A(x) = t_0x \quad \text{and} \quad t_B(x) = t_B \quad (2.41)$$

A share of the population uses now public transport³¹, and each car user incurs congestion linked to the number of commuter on the road between x_B and $\hat{z}$, as well as reduced road capacity between the CBD's edge and x_B . Each car user incurs a total commuting time

³⁰Each user faces an exogenous commuting time cost. Waiting times at bus stops depend on the bus fleet size and on the frequency at which the buses run (Small, 2004).

³¹Creutzig (2014) sets up a model including public transport close to the CBD and imposes this mode of travel on the residents living in its market area. We simplify by abstracting from providing public transit and public transit infrastructure at a cost.

expressed as follows:

$$T_A(x) = \begin{cases} \int_0^x [\tau_0 + 3\tau_1 \int_{x_B}^x \int_x^{\hat{z}} \frac{l}{(1-a)} dz] dx, & \text{when } 0 < x_B < x < \hat{z} \\ \int_{z_S}^x [\tau_0 + \tau_1 \int_x^y \frac{l}{(1-a)} dz] dx, & \text{when } z_S < x < y \end{cases} \quad (2.42)$$

Note that the congestion parameter increases due to the decrease in road capacity near the business center of each worker. The total congestion delay now depends on the size of the residential area where car users live (i.e., $\hat{z} - x_B$).

The polycentric city: In a polycentric city in equilibrium, the individual welfare of a worker is similar at all locations. An individual living between 0 and x_B has the following indirect utility:

$$V(x)_B = \omega_C(1 - T_B(x)) - \frac{R(x)h}{a} - t_B \quad (2.43)$$

Between x_B and $\hat{z}$:

$$V(x)_A = \omega_C(1 - T_A(x)) - \frac{R_A h}{a} - t_0 x \quad (2.44)$$

The market size for mass transit is specified by the following indifference condition linked to the time and pecuniary costs of each mode:

$$T_B(x_B) + t_B = T(x_B) + t_0 x_B \quad (2.45)$$

Initially, the residential area where workers live and from which they commute to the CBD is larger than that of the SBD. The introduction of a bus lane on the existing road infrastructure provides a disincentive for residents living close to the CBD to use their car. Workers living near the border $\hat{z}$ will see a rise in their transportation costs (both pecuniary and time costs). Therefore, the equilibrium size of the CBD will decrease until the reduction in car users offsets the higher congestion delay in the zone shared with the bus lane. The size of the SBD will increase; hence, congestion near this business district will increase. From an economic point of view, the introduction of two transport modes may reduce the size of the CBD to achieve the optimal size, which has the same effect as a road pricing scheme³². In the case of a road pricing scheme targeting drivers, ($t_A(x) = t_0 x + \tau_k(x)$), the effect would be similar to our results in section 6, namely, a decrease in the equilibrium size of the CBD and an increase in the number of workers commuting to the SBD. A second transport mode would reinforce the effects of the different taxes as second-best policies. The intuition is as follows: when a second mode of transport is

³²However, from an environmental point of view, the size of the road network used by drivers does not necessarily decrease. This is why CO_2 emissions may remain equivalent for cities of a given size.

used without improving the road infrastructure for motorists, they face (i) lower transport costs (user effect) and (ii) lower road capacity (time cost effect). When the *user effect* is marginally predominant, the CBD grows, attracting workers from the SBD until there is no incentive to relocate. When the *time cost effect* dominates, CBD size decreases.

Parking policy Urban tolls are designed to restrain travel demand and alleviate congestion within cities. While economists have largely studied the impact of congestion pricing schemes on land use and traffic patterns, urban tolls have been scarcely implemented within cities around the world (Brueckner, 2011). In the model, workers are assured that they can find a parking place at their employment site. Therefore, there is no cruising and no additional congestion. Arnott (2011) points out that parking policy in cities fails to take economic analysis into account. Indeed, Shoup (2005) highlights the huge number of hours lost to cruising for parking in his empirical study. Car parking is a serious issue, as a large urban space is used, each worker incurs extra travel time, and fees do not differentiate between peak and off-peak hours (Albert and Mahalel, 2006). When a fixed cost to park is added to the budget constraint of a worker, her transport costs increase. However, travel demand is inelastic at x and remains unaffected by parking fees in the model. Therefore, implementing different road pricing schemes would not change the nature of our previous results for a given city size and road's capacity.

8 Conclusion

This chapter develops and explores economic and land use tools in order to tackle the congestion externality in monocentric and polycentric settings. For a given city size, the optimal response is consistent with the development of SBDs, clustering firms that can offer the same wage rate as in the CBD. With unpriced congestion, this urban structure minimizes the negative externality incurred by each road user and maximizes welfare within the city. When the economy in the polycentric city is consistent with empirical findings, the equilibrium size of the CBD is larger than optimum one. The CBD is more attractive due to a higher wage rate and a higher wage net of transport costs in comparison with the monocentric structure for a given city size. Three main results are noteworthy.

First, the implementation of a *Pigouvian tax* on commuters is only a location-constrained first-best policy because the optimal location of the SBDs is not achieved. This tax yields a residential area that is too small and close to a CBD. Welfare is definitely greatest compared with the other road pricing schemes regarding the revenue return schemes. However, at the aggregate level, this tax does not internalize the decentralization of jobs in SBDs, preventing it from achieving the optimum. This *Pigouvian tax* remind us to internalize the congestion externality that road users impose to each other not only at their residential location but also during their daily commute to their workplace. We need also to tax firms that do not internalize effects on congestion when jobs are decentralized.

Second, a *flat tax* and a *cordon toll* are second-best policies that do not yield an optimal location of the SBDs. On the one hand, a *flat tax* is homogeneous across road users; hence, they are not distinguished according to the marginal damage they impose on other commuters. Indeed, workers living near a business center (CBD or SBDs) are underpriced in relation to the congestion delay they impose on other road users and the proportionality of the tax with respect to the traveled distances. On the other hand, a *cordon toll* clearly differentiates among commuters, similar to the *Pigouvian tax*, but the tax burden is asymmetric. The residential area where individuals live and from which they commute to the CBD is larger than that near the SBDs; hence, the *cordon toll* is settled in the former area. Only workers living between the *cordon toll* location and the CBD limit pay a fixed fee to commute to the CBD. Simultaneously, individuals living in other residential areas near the SBDs do not incur higher transport costs because the marginal congestion delays they impose on other users are much lower than those imposed by individuals living close to the CBD. To sum up, the efficiency of these road pricing schemes depends mainly on the wage gap between business centers within the polycentric city before the implementation of this road pricing scheme³³. According to the initial

³³Accordingly, the travel time and pecuniary costs incurred by each worker depend on the wage gap,

location of the SBDs (too small or too large), a *flat tax* may be less (resp., more) harmful than a *cordon toll*.

Finally, we demonstrate that a polycentric city in an unpriced congestion context yields a suboptimal location of the CBD limit, which is too large compared to the optimal size. According to the magnitude of the transport costs, the CBD may be too small or too large. The location is suboptimal since the indifferent worker living at the CBD limit (the left endpoint of the SBD area) decides to commute to the CBD without taking into account the marginal benefits obtained by individuals living near a SBD. She does not take into account the marginal damage costs incurred by road users commuting to the CBD as well. Conversely, this indifferent worker does not pay attention to the marginal damage costs incurred by workers living near a SBD when she decides to drive towards it. In addition, marginal benefits obtained by individuals working in the CBD are not taken into account as well. Her marginal move due to a change in the wage gap will not induce large differences in her transport costs (time and money) compared to her previous location under the suboptimal equilibrium.

Developing subcenters may alleviate the congestion cost for each road user provided that no distortions exist for the labor or housing markets when congestion is unpriced. However, we know that a transport improvement yields direct benefits and indirect costs, as noted by Arnott (1979) in the same context. As long as growth of traffic flows and urban sprawl costs do not substantially decrease the direct benefits from jobs relocations, urban planning remains a key policy for addressing urban transport issues compared to pricing schemes. Indeed, road pricing schemes benefit all landlords regardless of the closed-city structure. Hence, pricing congestion implies political concerns regarding the redistribution of tax revenues when negative externality is internalized. In addition, the desirability of multiple business centers may decrease due to an increase in the average traveled distance; hence, the congestion externality may worsen when housing size adjusts in the long run.

which determines the size of the influence area of each business center.

References

- Albert, G., and Mahalel, D. (2006). Congestion tolls and parking fees: A comparison of the potential effect on travel behavior. *Transport policy*. 13(6), 496–502.
- Alonso, W. (1964). Location and land use. Toward a general theory of land rent. Cambridge University Press. 204 p.
- Anas, A. (2013). The Location Effects of Alternative Road-Pricing Policies, Chapter 6 in *Infrastructure and Land Policies*, eds. Ingram, Gregory K. and Karin L. Brandt. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.
- Anas, A., and Kim, I. (1996). General equilibrium models of polycentric urban land use with endogenous congestion and job agglomeration. *Journal of Urban Economics* 40: 232–256.
- Arnott, R., Rave, T., and Schöb, R. (2005). *Alleviating urban traffic congestion*. MIT Press Books, 1. 240 p.
- Arnott, R. J. (1979). Unpriced transport congestion. *Journal of Economic Theory* 21: 294–316.
- Arnott, R. (2007). Congestion tolling with agglomeration externalities. *Journal of Urban Economics* 62: 187–203.
- Arnott, R. (2011). Parking economics. De Palma, A., Lindsey, R., Quinet, E., and Vickerman, R. (Eds.). A handbook of transport economics. Edward Elgar Publishing.
- Baum-Snow, N., and Pavan, R. (2012). Understanding the city size wage gap. *The Review of Economic Studies*. 79(1): 88–127.
- Brueckner, J. K. (2011). Lectures on urban economics. Cambridge: The MIT Press.
- Brueckner, J. K. (2007). Urban growth boundaries: An effective second-best remedy for unpriced traffic congestion?. *Journal of Housing Economics*. 16(3): 263–273.
- Brueckner, J. K. (1987). The structure of urban equilibria: A unified treatment of the Muth-Mills model. *Handbook of regional and urban economics*. 2: 821–845.
- Cavaillès, J., Gaigné C., Tabuchi T. and Thisse J. F. (2007). Trade and the structure of cities. *Journal of Urban Economics*. 62: 383–404.
- Commissariat général au développement durable. (2016). *Repères: Chiffres clés du transport, mars 2016*. Located at <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2548/874/chiffres-cles-transport-edition-2016.html>
- Cookson G. and Pishue B. (2017). INRIX Global Traffic Scorecard. 44 p.
- Creutzig, F. (2014). How fuel prices determine public transport infrastructure, modal shares and urban form. *Urban Climate*. 10: 63–76.
- Dasgupta, M., Frost, M., and Spence, N. (1985). Interaction between urban form and mode choice for the work journey: Manchester/Sheffield 1971–1981. *Regional Studies*.

19(4): 315–328.

Denant-Boèmont L., Gaigné C. et Gaté R. (2018). Urban spatial structure, transport-related emissions and welfare. *Journal of Environmental Economics and Management*. 89: 29–45.

Fujita, M., and Thisse, J. F. (2013). Economics of agglomeration: cities, industrial location, and globalization. Cambridge university press.

Fujita M. and Ogawa H. (1982). Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Regional science and urban economics* 12(2): 161–196.

Gaigné C., Riou S., and Thisse J. F. (2012). Are Compact Cities Environmentally Friendly? *Journal of Urban Economics*. 72(2–3): 123–136.

Gaigné, C., Riou, S., and Thisse, J. F. (2016). How to make the metropolitan area work? Neither big government, nor laissez-faire. *Journal of Public Economics*. 134: 100–113.

Larson, W., and Yezer, A. (2015). The energy implications of city size and density. *Journal of Urban Economics*. 90: 35–49.

Limtanakool, N., Dijst, M., and Schwanen, T. (2006). The influence of socioeconomic characteristics, land use and travel time considerations on mode choice for medium-and longer-distance trips. *Journal of transport geography*. 14(5): 327–341.

Lucas Jr, R. E., and Rossi-Hansberg, E. (2002). On the internal structure of cities. *Econometrica*. 1445–1476.

Mun, S. I., Konishi, K. J., and Yoshikawa, K. (2005). Optimal cordon pricing in a non-monocentric city. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 39(7-9): 723–736.

Parry, I. W., and Bento, A. (2001). Revenue recycling and the welfare effects of road pricing. *The Scandinavian Journal of Economics*. 103(4): 645–671.

Santos, G., (2005). Urban congestion charging: a comparison between London and Singapore. *Transport Reviews*. 25(5): 511–534.

Shoup, D. (2005). The high cost of free parking. American Planning Association.

Small, K. A., Verhoef, E. T., and Lindsey, R. (2007). The economics of urban transportation. Routledge.

Small, K. A. (2004). Road pricing and public transport. Road pricing: Theory and evidence. 9, 133–58.

Small, K. A., and Gómez-Ibáñez, J. A. (1997). Road pricing for congestion management: the transition from theory to policy. *Transport Economics*, 373-403.

Small, K. A. (1992). Urban Transportation Economics. Harwood Academic. Reading. 185 p.

Solow, R. M. (1973). Congestion cost and the use of land for streets. *The Bell Journal*

of *Economics and Management Science* 602–618.

Solow, R. M. (1972). Congestion, density and the use of land in transportation. *The Swedish journal of economics*, 161–173.

Solow, R. M., and Vickrey, W. S. (1971). Land use in a long narrow city. *Journal of Economic Theory*. 3(4): 430–447.

Strotz, R. H. (1965). Urban transportation parables. *The public economy of urban communities*. 127–169.

Tikoudis, I., Verhoef, E. T. and van Ommeren, J. (2015), On revenue recycling and the welfare effects of second-best congestion pricing in a monocentric city. *Journal of Urban Economics* 89: 32–47.

Timothy, D. and W.C. Wheaton (2001) Intra-urban wage variation, employment location and commuting times. *J Urban Econ* 50: 338–366.

Verhoef, E. T. (2005). Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city. *Journal of Urban Economics*. 58(3): 367–388.

Wheaton, W. C. (2004). Commuting, congestion, and employment dispersal in cities with mixed land use. *Journal of Urban Economics*. 55: 417–438.

Wheaton, W. C. (1998). Land use and density in cities with congestion. *Journal of urban economics*. 43: 258–272.

White, M. J. (1999). Urban areas with decentralized employment: Theory and empirical work. *Handbook of regional and urban economics*. 3: 1375–1412.

Zhang, W., and Kockelman, K. M. (2016a). Congestion pricing effects on firm and household location choices in monocentric and polycentric cities. *Regional Science and Urban Economics*. 58: 1–12.

Zhang, W., and Kockelman, K. M. (2016b). Optimal policies in cities with congestion and agglomeration externalities: Congestion tolls, labor subsidies, and place-based strategies. *Journal of Urban Economics*. 95: 64–86.

Appendix

A. The equilibrium border with a monocentric city.

The population constraint is given by:

$$m \int_0^y \frac{a}{h} dx = L$$

so that:

$$y_M = \frac{Lh}{ma}$$

B. The total commuting time of an individual living at distance x from the CBD

Assume that each worker uses a car for home-to-work commutes. The travel time per unit of distance depends on the free-flow travel time and the congestion delay due to commuters living beyond x along the road:

$$\tau(x) = \tau_0 + \tau_1 \left(\int_x^y \frac{a}{h(1-a)} dz \right)^\beta$$

We integrate this travel time over the interval $[0, y]$ to determine the total commuting time of the worker located at the city limits. Hence, we obtain:

$$T_M(y) = \int_0^y [\tau_0 + \tau_1 \int_z^y \frac{a}{h(1-a)} dz] dx$$

yielding:

$$T_M(y) = y\tau_0 + \tau_1 \frac{a}{h(1-a)} (y^2/2).$$

C. The monocentric city: First- and second-best policies versus no-toll equilibrium

The aggregate welfare under a no-toll equilibrium is expressed as follows:

$$W_M^* = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{y_M} \omega_C(1 - T(x)) dx - \int_0^{y_M} t_0 x dx \right] - ALR_M + \left[ALR_M - m \int_0^{y_M} R_A dx \right] + m \int_0^{y_M} R_A dx$$

with:

$$ALR_M = m \int_0^{y_M} \Psi_M(x) dx.$$

When a road pricing scheme is implemented, the aggregate welfare becomes:

$$\begin{aligned} W_M^{**} &= \frac{ma}{h} \left[\int_0^{y_M} \omega_C(1 - T_M(x)) dx - \int_0^{y_M} t_0 x dx - \int_0^{y_M} \tau_k(x) dx + G_k \right] - ALR_M \\ &+ \left[ALR_M - m \int_0^{y_M} R_A dx \right] + m \int_0^{y_M} R_A dx \end{aligned}$$

with:

$$G_k = \int_0^{y_M} \tau_k(x) dx$$

Pigouvian tax Each road user is charged a toll at the exact marginal social cost she imposes on others for a given residential location and a given workplace:

$$\tau_P(x) = \int_0^x \frac{\omega_C \tau_1 a}{h(1-a)} (y_M - x) dx$$

Then, the total revenue from the *Pigouvian tax* is written as follows:

$$\begin{aligned} G_P &= \int_0^{y_M} \tau_P(x) dx \\ &= \frac{m\omega_C \tau_1 a^2}{h^2(1-a)} \int_0^{y_M} \left[y_M x - \frac{x^2}{2} \right] dx \\ &= \frac{m\omega_C \tau_1 a^2 y_M^3}{3h^2(1-a)} \end{aligned}$$

The indirect utility V_M includes the *Pigouvian tax* as well as the lump-sum transfer ($\frac{G_k}{L}$) leading to:

$$V_P(y_M) = \omega_C - y_M \left[\omega_C \tau_0 + t_0 - \frac{\omega_C \tau_1 a y_M}{2h(1-a)} \right] - \frac{R_A h}{a} - \tau_k(y_M) + \frac{G_P}{L} + \frac{ALR_P}{L}$$

Note that the *Pigouvian tax* is capitalized in bids rent yielding:

$$\Psi_P(x) = \frac{a [h(\omega_C \tau_0 + t_0)(1-a)(y_M - x) + \omega_C \tau_1 a (y_M - x)^2]}{h^2(1-a)} + R_A,$$

Flat kilometer tax The public authority decides to implement a *flat tax* per mile traveled instead of a *Pigouvian tax*. The uniform tax is the following:

$$\tau_F(x) = t_F x$$

The benefits from this tax are returned as lump sums to the residents and given by:

$$\begin{aligned} G_F &= \frac{ma}{h} \int_0^{y_M} t_F x dx \\ &= \frac{mat_F y_M^2}{2h} \end{aligned}$$

Hence, inserting the *flat tax*, $(\frac{G_F}{L})$ and the aggregate land rent lump sum $(\frac{ALR_M}{L})$ yields:

$$V_F(y_M) = \omega_C - y_M \left[\omega_C \tau_0 + t_0 + t_F + \frac{\omega_C \tau_1 a y_M}{2h(1-a)} \right] - \frac{R_A h}{a} + \frac{ALR_M}{L} + \frac{G_F}{L} \quad (2.46)$$

The *flat tax* is capitalized in the suboptimal bid rent yielding:

$$\Psi_F(x) = \frac{a[2h(\omega_C \tau_0 + t_0 + t_F)(y_M - x)(1-a) + \omega_C \tau_1 a(y_M - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A, \quad (2.47)$$

Cordon toll Instead of a *Pigouvian tax* or a *flat tax*, the public authority decides to set a *cordon toll* at the location αy_M ($0 < \alpha \leq 1$). Traffic flow is assumed to be uninterrupted when passing the cordon. The commuters are charged according to the following toll scheme:

$$\tau_{CT} = \begin{cases} c & \text{if } x \geq \alpha y \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.48)$$

The revenue return scheme is now given by:

$$G_{CT} = \frac{m a y_M (1 - \alpha)^2 c}{2h} \quad (2.49)$$

Hence, the individual welfare near the CBD is given by:

$$V_{CT}(x > \alpha y_M) = \omega_C \left[1 - x \tau_0 - \frac{\tau_1 a (2y_M x - x^2)}{2h(1-a)} \right] - t_0 x - \frac{\Psi_C h}{a} + \frac{ALR_M}{L} + \frac{G_k}{L} \quad (2.50)$$

and at the city limits by:

$$V_{CT}(y_M) = \omega_C - y_M \left[\omega_C \tau_0 + t_0 + \frac{\omega_C \tau_1 a y_M}{2h(1-a)} \right] - c - \frac{R_A h}{a} + \frac{ALR_M}{L} + \frac{G_k}{L} \quad (2.51)$$

Near the CBD, the suboptimal bid rent is expressed as follows:

$$\Psi_0(x < \alpha y_M) = a [\omega_C [T_M(y_M) - T_M(x)] + t_0(y - x)] + \left[R_A + \frac{ca}{h} \right] \quad (2.52)$$

The product of the lump-sum tax (c) and the population density is now capitalized in the rent between the *cordon toll* and the city limit. The rent between the location αy_M and

y_M is given by:

$$\Psi_0(x > \alpha y_M) = a[\omega_C(T_M(y_M) - T_M(x)) + t_0(y_M - \alpha y_M) + R_A] \quad (2.53)$$

There is a rent discontinuity at the *cordon toll* location.

D. The polycentric city

D1. Equilibrium border

The population constraint is given by:

$$\int_0^{\hat{z}} \frac{a}{h} dx + \int_{\hat{z}}^y \frac{a}{h} dx = \frac{L}{m}$$

so that:

$$\begin{aligned} \int_0^{\hat{z}} \frac{a}{h} dx + \int_{\hat{z}}^y \frac{a}{h} dx &= \frac{L}{m} \\ \int_0^{\hat{z}} \frac{a}{h} dx + 2 \int_{z_p}^y \frac{a}{h} dx &= \frac{L}{m} \\ \frac{a}{h} \hat{z} + 2 \frac{a}{h} \frac{y - \hat{z}}{2} &= \frac{L}{m} \end{aligned}$$

leading to:

$$y = \frac{Lh}{ma}$$

D2. CBD limit in equilibrium with a wage gap

A worker living at $\hat{z}$ is indifferent between traveling to the CBD or the SBD. Therefore, we have:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 \hat{z} = \omega_S \left[1 - \tau_0 \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) - \frac{\tau_1 a (y - \hat{z})^2}{8h(1-a)} \right] - t_0 \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)$$

Inserting $\mu\omega_C = \omega_S$ due to the wage gap between the business districts yields:

$$\hat{z}^*(\mu) = \frac{-2h(1-a) [\omega_C(2+\mu)\tau_0 + 3t_0] - \mu\omega_C\tau_1 ay + 2\sqrt{\mu\omega_C^2\tau_1^2 a^2 y^2 + \Delta^*}}{\omega_C(4-\mu)\tau_1 a}$$

with:

$$\Delta^* = h^2(-1+a)^2 [\omega_C(2+\mu)\tau_0 + 3t_0]^2 + 2h(1-a) [(4+\mu^2)\omega_C^2 - 5\mu\omega_C^2 + \omega_C(2+\mu)\tau_0 y + 3\mu\omega_C^2\tau_0 y] \tau_1 a$$

leading to:

$$\Gamma = \omega_C \left[1 - \mu + \tau_0 \left(\frac{\widehat{z}(-2-\mu) + \mu y}{2} \right) + \frac{\tau_1 a [\mu(y - \widehat{z})^2 - 4\widehat{z}^2]}{8h(1-a)} \right] + t_0 \left(\frac{y - 3\widehat{z}}{2} \right),$$

with $\Gamma \equiv 0$. According to the implicit function theorem, we have:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial k} + \frac{\partial \Gamma}{\partial \widehat{z}} \frac{\partial \widehat{z}}{\partial k} = 0$$

where k is an exogenous variable from the model. Equivalently, we have:

$$\frac{\partial \widehat{z}}{\partial k} = - \frac{\partial \Gamma / \partial k}{\partial \Gamma / \partial \widehat{z}}$$

Trivial calculations yield:

$$\begin{aligned} \text{sign} \frac{\partial \widehat{z}}{\partial \tau_0} &= \text{sign} \frac{\partial \widehat{z}}{\partial \mu} < 0, \quad \text{sign} \frac{\partial \widehat{z}}{\partial y} > 0 \\ \text{sign} \frac{\partial \Gamma}{\partial t_0} &= \text{sign} \left[\frac{y - 3\widehat{z}}{2} \right] < 0 \end{aligned}$$

where the term in brackets is equal to $\frac{y}{2}$ when $\widehat{z} = 0$ and decreases when $\widehat{z}$ increases. In addition we have:

$$\text{sign} \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau_1} = \text{sign} \frac{\partial \Gamma}{\partial h} = \text{sign} \frac{\partial \Gamma}{\partial a} = \text{sign} [\mu(y - \widehat{z})^2 - 4\widehat{z}^2] < 0 \quad (0 < \mu < 1)$$

where the term in brackets is equal to μy^2 when $\widehat{z} = 0$ and decreases when $\widehat{z}$ increases.

D3. Welfare Welfare within the polycentric city is now defined as follows:

$$\begin{aligned} W_S(\widehat{z}^*(\mu)) &= \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\widehat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0 x dx + 2 \int_{z_p}^y \omega_S [1 - T(x)] - t_0 (x - z_S) dx \right] - ALR_P \\ &+ \left[ALR_P - m \int_0^y R_A dx \right] + m \int_0^y R_A dx \\ W_S(\widehat{z}^*(\mu)) &= \frac{ma}{h} \left[\omega_C \widehat{z}^* (1 - \mu) + \mu \omega_C y - \frac{(\mu \omega_C \tau_0 + t_0) (y^2 - \widehat{z}^{*2})}{2} - \frac{(\omega_C \tau_0 + t_0) \widehat{z}^{*2}}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a [4\widehat{z}^{*3} + \mu(y - \widehat{z})^3]}{12h(1-a)} \right] \end{aligned}$$

D4. Proof of proposition 2

The aggregate welfare in the no-toll equilibrium can be defined as follows:

$$W_S^* = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0 x dx + 2 \int_{z_p}^y \omega_C [1 - T(x)] - t_0 (x - z_S) dx \right] - ALR_P \\ + \left[ALR_P - m \int_0^y R_A dx \right] + m \int_0^y R_A dx$$

Free-market and optimal sizes of the CBD limit when $\mu = 1$

The indifference function of $\hat{z}$ is expressed as follows:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 \hat{z} = \omega_C \left[1 - (y - z_S)\tau_0 - \frac{\tau_1 a (y - z_S)^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 (y - z_S)$$

yielding:

$$\hat{z}^2 \left[\frac{3\omega_C \tau_1 a}{8h(1-a)} \right] + \hat{z} \left[\frac{3\omega_C \tau_0}{2} + \frac{3t_0}{2} + \frac{\omega_C \tau_1 a}{4h(1-a)} \right] - \left[\frac{\omega_C \tau_0 y}{2} + \frac{t_0 y}{2} + \frac{\omega_C \tau_1 a y^2}{8h(1-a)} \right] = 0$$

leading to:

$$\hat{z}^* = \frac{y}{3}$$

Then, the size of the CBD in which workers live is determined by a benevolent planner in order to maximize welfare $W_P(\hat{z})$ subject to:

$$\begin{cases} V_C(\hat{z}) = \omega_C(1 - x\tau_0 - \frac{\tau_1 a}{h(1-a)}[\hat{z}x - x^2/2]) - \frac{\Psi_P(x)h}{a} - t_0 x > 0 \\ V_S(\hat{z}) = \omega_C(1 - (x - z_S)\tau_0 - \frac{\tau_1 a}{h(1-a)}[y(x - z_S) + \frac{z_S^2 - x^2}{2}]) - \frac{\Psi_P(x)h}{a} - t_0(x - z_S) > 0 \end{cases}$$

We have:

$$\frac{\partial W_S(\hat{z})}{\partial \hat{z}} = 0$$

Hence:

$$\frac{m\omega_C \tau_1^2 a^2 (y + \hat{z})(y - 3\hat{z})}{4h^2(1-a)} = 0$$

leading to:

$$\hat{z}^O = \frac{y}{3}$$

Hence, $\hat{z}^* = \hat{z}^O$ and their expression has been inserted in the aggregate welfare function (??) yielding:

$$W_S(\hat{z}^O) = L \left[\omega_C - \frac{(\omega_C \tau_0 + t_0)y}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a y^2}{27h(1-a)} \right]$$

As a result, we have:

$$W_S(\widehat{z}^O) - W_M^* = \frac{m\omega_C\tau_1a^2(y - \widehat{z})(y + \widehat{z})^2}{4h^2(1 - a)} > 0 \quad (2.54)$$

D5. Proof of proposition 3

Aggregate welfare, including a wage gap within the city, can be defined as follows:

$$\begin{aligned} W_S &= \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\widehat{z}} [1 - T(x)] - t_0 x dx + 2 \int_{\widehat{z}_S}^y \omega_S [1 - T(x)] - t_0(x - z_S) dx \right] - ALR_P \\ &+ [ALR_P - m \int_0^y R_A dx] + m \int_0^y R_A dx \end{aligned}$$

with:

$$ALR_P = m \int_0^{\widehat{z}} \Psi_0(x) dx + 2m \int_{z_S}^y \Psi_P(x) dx$$

yielding:

$$W_P = \omega_C \widehat{z} + \omega_S(y - \widehat{z}) - \omega_C \tau_0 \widehat{z} - \omega_S \tau_0(y - \widehat{z}) - \frac{\omega_C \tau_1 a \widehat{z}^3}{3h(1 - a)} - \frac{2\omega_S \tau_1 a (\frac{y - \widehat{z}}{2})^3}{3h(1 - a)} - t_0 \frac{y^2}{2}$$

Then, the left endpoint of the SBD $\widehat{z}^O$ is determined when there exists a wage gap between the business centers. The maximization of aggregate welfare $W_P(\widehat{z})$ is subject to:

$$V_S(\widehat{z}) \begin{cases} \omega_C(1 - x\tau_0 - \frac{\tau_1 a}{h(1-a)}[\widehat{z}x - x^2/2]) - \frac{\Psi_0(x)h}{a} - t_0 x > 0 \\ \omega_P(1 - (x - z_S)\tau_0 - \frac{\tau_1 a}{h(1-a)}[y(x - z_S) + \frac{z_S^2 - x^2}{2}]) - \frac{\Psi_P(x)h}{a} - (x - z_S)t_0 > 0 \\ \widehat{z} < y \end{cases}$$

Then, we obtain:

$$\frac{\partial W_S(\widehat{z})}{\partial \widehat{z}} = \omega_C - \omega_S + \omega_S \tau_0 - \omega_C \tau_0 - \frac{\omega_C \tau_1 a \widehat{z}^2}{h(1 - a)} + \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \widehat{z})^2}{4h(1 - a)}$$

Thus, $\frac{\partial W_S(\widehat{z})}{\partial \widehat{z}} = 0$ leads to a single maximum for $W_S(\widehat{z})$ when $\widehat{z} \in [0, y]$, which reaches:

$$\widehat{z}^O(\mu) = \frac{-2h(1 - a)\omega_C(1 - \mu)\tau_0 - \mu\omega_C\tau_1 a y + 2\sqrt{\mu\omega_C^2\tau_1^2 a^2 y^2 + \Delta^O}}{\omega_C(4 - \mu)\tau_1 a}$$

with:

$$\Delta^O = h^2(-1 + a)^2 [\omega_C(1 - \mu)]^2 \tau_0^2 + h(1 - a) [(4 + \mu^2)\omega_C^2 + \mu\omega_C^2\tau_0 y - \mu^2\omega_C^2\tau_0 y] \tau_1 a$$

Furthermore, $W_S(\hat{z})$ is a concave curve since $\frac{\partial^2 W_S}{\partial^2 \hat{z}}$ yields the following result:

$$\frac{\partial^2 W_S}{\partial^2 \hat{z}} = \frac{ma}{h} \left[(\omega_S - \omega_C)\tau_0 - \frac{[24\omega_C\hat{z} + 6\omega_S(y - \hat{z})]\tau_1 a}{12h(1-a)} \right] < 0 \quad (2.55)$$

This optimal CBD size varies positively with the wage rate discrepancy between the business centers within the polycentric setting:

$$\frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}^O} > 0, \quad \text{when} \quad 1 < \frac{1}{\mu} < \frac{1}{\underline{\mu}}$$

E. Monocentric city versus Polycentric city

Congestion level

Note that the differential in the total commuting time cost between the two cities is given by $\Delta T(y)$, with:

$$\begin{aligned} \Delta T(y) &= T_M(y_M) - T(y) \\ &= \tau_0 z_S + \frac{\tau_1 a [y^2 - (\frac{y-\hat{z}}{2})^2]}{2h(1-a)} \end{aligned}$$

In addition, we have $\Delta T(\hat{z})$, with:

$$\begin{aligned} \Delta T(\hat{z}) &= T_M(y_M) - T(\hat{z}_P) \\ &= \tau_0(y - \hat{z}) + \frac{\tau_1 a (y^2 - \hat{z}^2)}{2h(1-a)} \end{aligned}$$

Thus, $\Delta T(y) > 0$ and $\Delta T(\hat{z}) > 0$, with an average congestion delay that is higher in the monocentric setting.

Welfare comparison. When we assume there is no wage gap within the polycentric city, the welfare is given by:

$$W_S(\hat{z}^*) = \frac{ma}{h} \left[\omega_C y - \frac{(\omega_C \tau_0 + t_0)y^2}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a (4\hat{z}^{3*} + (y - \hat{z}^*)^3)}{12h(1-a)} \right]$$

and in the monocentric city:

$$W_M = L \left[\omega_C - \frac{y_M(\omega_C \tau_0 + t_0)}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a y^2}{3h(1-a)} \right]$$

Therefore, the comparison with the monocentric city yields $\Delta_V = W_M - W_S$, with:

$$\begin{aligned}\Delta_V &= \omega_C(1-\mu)(y - \widehat{z_{toll}}) + \omega_C\tau_0(1-\mu)(\widehat{z_{toll}} - y) \\ &+ \frac{\omega_C\tau_1a(\widehat{z_{toll}}^3 - y^3)}{3h(1-a)} + \frac{\omega_S\tau_1a(\frac{y-\widehat{z_{toll}}}{2})^3}{3h(1-a)}\end{aligned}$$

Regarding the evolution of the welfare between the monocentric and the polycentric city, we obtain the following expression:

$$\Delta_W(\mu) = \frac{ma(y - \widehat{z}) [h(1-a)(12(\omega_S - \omega_C) + 6\omega_C\tau_0(y + \widehat{z}) - 3\omega_S\tau_0(y - \widehat{z}) + 3t_0(y + 3\widehat{z})) + 4\omega_C\tau_1a(y^2 + y\widehat{z} + \widehat{z}^2)]}{12h^2(1-a)} \quad (2.56)$$

It is straightforward to check that the aggregate welfare levels are equal when $\widehat{z}(\underline{\mu}) = y$. In other words, when $\underline{\mu} = 1 - (\tau_0 + \frac{t_0}{\omega_C})y - \frac{\tau_1ay^2}{2h(1-a)}$. Here, the difference in welfare depends heavily on the magnitude of the wage gap between the business centers within the polycentric city.

F. Road pricing schemes in the polycentric city:

F1. Quasi-first-best vs. equilibrium

The city limits remain identical to the benchmark equilibrium, as housing size is exogenous. Thus, we obtain the bid rent in a suboptimal equilibrium:

$$\Psi_0(x) = \frac{a[h(1-a)(\omega_C\tau_0 + t_0)(\widehat{z}_S - x) + \omega_C\tau_1a(\widehat{z}_S - x)^2]}{h^2(1-a)} + R_A$$

and when $z_S < x < y$:

$$\Psi_P(x) = \frac{a[h(1-a)(\omega_S\tau_0 + t_0)(y - x) + \omega_S\tau_1a(y - x)^2]}{h^2(1-a)} + R_A$$

The "Pigouvian" tax is determined as follows:

$$\tau_P(x) = \int_0^x \left[\frac{\tau_1a}{h(1-a)} \int_x^{\widehat{z}} \omega_C \, dz \right] dx \quad \text{and} \quad \tau_{PT}(x) = \int_{\widehat{z}}^x \left[\frac{\tau_1a}{h(1-a)} \int_x^y \omega_S \, dz \right] dx,$$

with:

$$\begin{aligned}
 \tau_P(x) &= \int_0^x \left[\frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \int_x^{\hat{z}} \omega_C \, dz \right] dx \\
 &= \frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \int_0^x \omega_C(\hat{z} - x) \, dx \\
 &= \frac{\omega_C \tau_1 a (\hat{z}x - x^2/2)}{h(1-a)}
 \end{aligned}$$

when $0 < x < \hat{z}$. Because of symmetry around the SBD, we have:

$$\begin{aligned}
 \int_{\hat{z}}^x \left[\frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \int_x^y \omega_S dz \right] dx &= \int_{z_S}^x \left[\frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \int_x^y \omega_S dz \right] dx \\
 &= \frac{\tau_1 a}{h(1-a)} \int_{z_S}^x \omega_S(y - x) dx \\
 &= \frac{\omega_S \tau_1 a \left[y(x - z_S) - \frac{x^2 - z_S^2}{2} \right]}{h(1-a)}
 \end{aligned}$$

when $\hat{z} < x < y$. Using the *Pigouvian tax* and the indifference condition of a worker living in $\hat{z}$ yields:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{h(1-a)} \right] - t_0 \hat{z} = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) \tau_0 - \frac{\tau_1 a \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2}{h(1-a)} \right] - t_0 \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)$$

in which $\omega_S = \mu \omega_C$ and (2.21) have been inserted, leading to:

$$\hat{z}_P(\mu) = \frac{h(-1+a) [\omega_C(2+\mu)\tau_0 + 3t_0] - \omega_S \tau_1 a y + \sqrt{4\mu\omega_C^2 \tau_1^2 a^2 y^2 + \Delta_P}}{\omega_C(4-\mu)\tau_1 a}$$

with:

$$\begin{aligned}
 \Delta_P &= h^2(-1+a)^2 [\omega_C(2+\mu)\tau_0 + 3t_0]^2 \\
 &+ 4h(1-a) [(4+\mu^2)\omega_C^2 - 5\mu\omega_C^2 + \omega_C(2+\mu)\tau_0 y + 3\mu\omega_C^2 \tau_0 y] \tau_1 a
 \end{aligned}$$

Welfare is now given by:

$$W_P = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} V_0 dx + 2 \int_{z_S}^y V_P \right] + G_P$$

$$+ \left[ALR_P - \int_0^y R_A dx \right] + \int_0^y R_A dx$$

where aggregate land rents and toll revenues returned as lump sums:

$$ALR_P = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \frac{\Psi_0 h}{a} dx + 2 \int_{z_S}^y \frac{\Psi_P h}{a} dx \right] \quad \text{and} \quad G_P = \frac{ma}{h} \int_0^y \tau_k(x) dx$$

Thus, we find the following welfare:

$$\begin{aligned} W_P &= \frac{ma}{h} \left[\omega_C \hat{z} - \frac{(\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z}^2}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^3}{3h(1-a)} + \omega_S (y - \hat{z}) - \frac{(\omega_S \tau_0 + t_0)(y - \hat{z})^2}{4} - \frac{(\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^3)}{12h(1-a)} \right] \\ &+ \frac{ma}{h} \left[\frac{(\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z}^2}{2} + \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^3}{3h(1-a)} + \frac{(\omega_S \tau_0 + t_0)(y - \hat{z})^2}{4} + \frac{(\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^3)}{12h(1-a)} \right] + mR_A y \end{aligned}$$

Then, we derive W_P with respect to $\hat{z}$ leading to:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} &= \frac{ma}{h} \left[\omega_C - (\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z} - \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^2}{h(1-a)} - \omega_S + \frac{(\omega_S \tau_0 + t_0)(y - \hat{z})}{2} + \frac{(\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^2)}{4h(1-a)} \right] \\ &+ \frac{ma}{h} \left[(\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z} + \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^2}{h(1-a)} - \frac{(\omega_S \tau_0 + t_0)(y - \hat{z})}{2} - \frac{(\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^2)}{4h(1-a)} \right] \end{aligned}$$

When $\hat{z} = \hat{z}_P$:

$$\left. \frac{\partial W_P}{\partial \hat{z}} \right|_{\hat{z}=\hat{z}_P} = \frac{ma}{h} [\omega_C - \omega_S] > 0$$

F2. The polycentric city: Second-best vs. equilibrium

The flat tax The bids rent including the *flat tax* are given by:

$$\Psi_0(x) = \frac{a [2h(1-a)(\omega_C \tau_0 + t_0 + \tau_k)(\hat{z}_F - x) + \omega_C \tau_1 a (\hat{z}_F - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A$$

and:

$$\Psi_P(x) = \frac{a [2h(1-a)(\omega_S \tau_0 + t_0 + t_F)(y - x) + \omega_S \tau_1 a (y - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A$$

when $z_S < x < y$. Using the indirect utility formula with the *flat tax* and (2.37) yields the indirect utility given by:

$$V_S = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) \tau_0 - \frac{a \tau_1 \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2}{2h(1-a)} \right] + \bar{G}_T + \frac{ALR}{L} - (t_0 + t_F) \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) - \frac{R_A h}{a}$$

The indifference condition of a worker living in $\hat{z}$ yields:

$$\omega_C \left[1 - \hat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1 a \hat{z}^2}{2h(1-a)} \right] - (t_0 + t_F)\hat{z} = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) \tau_0 - \frac{\tau_1 a \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2}{2h(1-a)} \right] - (t_0 + t_F) \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)$$

yielding:

$$z_F = \frac{-2h(1-a) [\tau_0(2\omega_C + \omega_S) + 3(t_0 + t_F)] - \omega_S \tau_1 a y + 2\sqrt{\Delta_F}}{(4\omega_C - \omega_S)\tau_1 a}$$

with:

$$\begin{aligned} \Delta_F &= h^2(-1+a)^2 [\tau_0(2\omega_C + \omega_S) + 3(t_0 + t_F)]^2 \\ &+ 2h(1-a)\tau_1 a [4\omega_C^2 + \omega_S^2 + 3\omega_C\omega_S\tau_0 y - 5\omega_C\omega_S + (2\omega_C + \omega_S)(t_0 + t_F)y] + \omega_C\omega_S\tau_1^2 a^2 \end{aligned}$$

Welfare is given by:

$$W_F(t_F) = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0(x) dx + 2 \int_{z_S}^y \omega_S [1 - T(x)] - t_0(x - z_S) dx \right]$$

with:

$$ALR_F = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \frac{\Psi_0 h}{a} dx + 2 \int_{z_S}^y \frac{\Psi_P h}{a} dx \right]$$

Hence, the following welfare is:

$$W_F(t_F) = \frac{ma}{h} \left[\omega_C \hat{z} - \frac{(\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z}^2}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^3}{3h(1-a)} + \omega_S (y - \hat{z}) - (\omega_S \tau_0 + t_0) \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2 - \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^3}{12h(1-a)} \right]$$

Then, we derive W_S with respect to $\hat{z}$ yielding:

$$\frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} = \frac{ma}{h} \left[\omega_C - (\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z} - \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^2}{h(1-a)} - \omega_S + (\omega_S \tau_0 + t_0) \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) - \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^2}{4h(1-a)} \right]$$

When $\hat{z} = \hat{z}_F$:

$$\left. \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \right|_{\hat{z}=\hat{z}_F} = \frac{ma}{h} \left[\omega_C - \omega_S - \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}_F^2}{2h(1-a)} + \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z}_F)^2}{8h(1-a)} - t_F \left(\frac{y - 3\hat{z}_F}{2} \right) \right] \leq 0$$

F3. The polycentric city: Second-best vs. equilibrium

Cordon toll The amount of collected tax is redistributed to each household and expressed as follows:

$$G_{CT} = \int_{\beta \hat{z}_C}^{\hat{z}_C} \tau_k(x) dx$$

leading to:

$$\bar{G}_{CT} = \frac{ma(\widehat{z}_C - \beta\widehat{z}_C)^2c}{2hL}$$

The bid rent including the *cordon toll* is given by:

$$\Psi_0(x) = \frac{a[2h(1-a)(\omega_C\tau_0 + t_0)(\widehat{z}_C - x) + \omega_C\tau_1a(\widehat{z}_C - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A + \frac{ca}{h}$$

When $\alpha\widehat{z}_C < x < \widehat{z}_C$:

$$\Psi_0(x) = \frac{a[2h(1-a)(\omega_C\tau_0 + t_0)(\widehat{z}_C - x) + a\omega_C\tau_1(\widehat{z}_C - x)^2]}{2h^2(1-a)} + R_A$$

The indirect utility of the inhabitant who lives at $\widehat{z}_C$ and works in the CBD is now given by:

$$V_{CT}(\widehat{z}_C) = \omega_C \left[1 - \widehat{z}_C\tau_0 - \frac{a\tau_1\widehat{z}_C^2}{2h(1-a)} \right] + \bar{G}_{CT} + \frac{ALR_{CT}}{L} - t_0\widehat{z}_C - c - \frac{R_Ah}{a}$$

When $z_S < x < y$:

$$V_{CT}(y) = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \widehat{z}_C}{2} \right) \tau_0 - \frac{a\omega_S\tau_1 \left(\frac{y - \widehat{z}_C}{2} \right)^2}{2h(1-a)} \right] + \bar{G}_{CT} + \frac{ALR_{CT}}{L} - t_0 \left(\frac{y - \widehat{z}_C}{2} \right) - \frac{RAh}{a}$$

The limit of the CBD $\widehat{z}$ is implicitly defined by:

$$\omega_C \left[1 - \widehat{z}\tau_0 - \frac{\tau_1a\widehat{z}^2}{2h(1-a)} \right] - t_0\widehat{z} - c = \omega_S \left[1 - \left(\frac{y - \widehat{z}}{2} \right) \tau_0 - \frac{\tau_1a \left(\frac{y - \widehat{z}}{2} \right)^2}{2h(1-a)} \right] - t_0 \left(\frac{y - \widehat{z}}{2} \right)$$

yielding:

$$z_C = \frac{-2h(1-a)[\tau_0(2\omega_C + \omega_S) + 3t_0] - \omega_S\tau_1ay + 2\sqrt{\Delta_C}}{(4\omega_C - \omega_S)\tau_1a}$$

with:

$$\begin{aligned} \Delta_C &= h^2(-1+a)^2[\tau_0(2\omega_C + \omega_S) + 3t_0]^2 \\ &+ 2h(1-a)\tau_1a[4\omega_C^2 + \omega_S^2 + 3\omega_C\omega_S\tau_0y - 5\omega_C\omega_S + (2\omega_C + \omega_S)t_0y - (4\omega_C - \omega_S)c] + \omega_C\omega_S\tau_1^2a^2y^2 \end{aligned}$$

Welfare is given by:

$$W_{CT} = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\alpha\widehat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0(x) dx + \int_{\alpha\widehat{z}}^{\widehat{z}} \omega_C [1 - T(x)] - t_0(x) dx + 2 \int_{z_S}^y \omega_S [1 - T(x)] - t_0(x - z_S) dx \right]$$

with:

$$ALR_{CT} = \frac{ma}{h} \left[\int_0^{\hat{z}} \frac{\Psi_0 h}{a} dx + 2 \int_{z_S}^y \frac{\Psi_P h}{a} dx \right]$$

Hence, the following welfare is:

$$W_{CT} = \frac{ma}{h} \left[\omega_C \hat{z} - \frac{(\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z}^2}{2} - \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^3}{3h(1-a)} + \omega_S (y - \hat{z}) - (\omega_S \tau_0 + t_0) \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right)^2 - \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^3}{12h(1-a)} \right]$$

Then, we derive W_{CT} with respect to $\hat{z}$ yielding:

$$\frac{\partial W_{CT}}{\partial \hat{z}} = \frac{ma}{h} \left[\omega_C - (\omega_C \tau_0 + t_0) \hat{z} - \frac{\omega_C \tau_1 a \hat{z}^2}{h(1-a)} - \omega_S + (\omega_S \tau_0 + t_0) \left(\frac{y - \hat{z}}{2} \right) + \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^2}{4h(1-a)} \right]$$

When we derive W_S with respect to $\hat{z}$ conditional on $\hat{z} = \hat{z}_C$, it yields:

$$\left. \frac{\partial W_S}{\partial \hat{z}} \right|_{\hat{z}=\hat{z}_C} = \frac{ma}{h} \left[c + \frac{\omega_S \tau_1 a (y - \hat{z})^2}{8h(1-a)} + \frac{(\omega_S \tau_0 + t_0)(3\hat{z} - y)}{2} \right] \leq 0$$

Chapter 3

Mobilités pendulaires et formes urbaines: cas des aires urbaines françaises métropolitaines.

1 Introduction

Près de 17 millions d'actifs en France (deux tiers des actifs) ont quitté quotidiennement leur commune de résidence pour se rendre sur leur lieu de travail en 2014. En outre, les distances parcourues domicile-travail ont augmenté de 1990 à 2014 traduisant une différenciation croissante entre lieu de vie et lieu d'emploi (Coudène et Levy, 2016). Quel que soit leur lieu de résidence, les actifs se déplacent quotidiennement soit vers la commune centre du pôle urbain, soit vers un centre secondaire d'emplois au sein de l'aire urbaine (Aguiléra, 2005). Ces tendances à la hausse des distances domicile-travail sont également observées dans les pays d'Amérique du Nord et d'autres pays européens (Kahn, 2010 ; Garcia-Palomares, 2010 ; Aguiléra *et al.*, 2009; Glaeser *et al.*, 2001). L'accroissement des distances moyennes parcourues a contrebalancé les efforts technologiques déployés pour réduire les émissions de CO_2 des véhicules privés (Levy et Le Jeannic, 2011). De fait, le secteur des transports reste le secteur le plus émetteur de GES avec 39% des émissions de CO_2 en France en 2016 (CITEPA, 2016). Aménager différemment les aires urbaines françaises par l'intermédiaire de l'organisation spatiale des emplois et de la population constitue une des solutions qui permettrait de gérer ces problèmes. L'objectif principal de ce chapitre est de savoir si la répartition des emplois et de la population joue un rôle dans l'évolution des distances parcourues domicile-travail. Afin de donner des éléments de réponse à cette question, notre analyse s'appuie sur les données du Recensement de la Population de 1999, 2007 et 2014. Ces données nous permettent de classer et de caractériser spatialement et socio-économiquement les aires urbaines décrites en section 2 de ce chapitre. Afin d'expliquer les distances moyennes domicile-travail, nous construisons plusieurs indicateurs de formes urbaines pour chaque aire urbaine en tant que variables explicatives ; (i) un ratio du nombre d'emplois dans une commune centre rapporté au nombre d'emplois total de l'aire urbaine, (ii) un indice de concentration des emplois de type Herfindahl-Hirschmann, (iii) un indice de répartition spatiale de la population et des emplois dans les communes centres et (iv) un indice de répartition des emplois et la population au sein de chaque aire urbaine.

Dans la section 3, nous effectuons une analyse en coupe en disposant de trois périodes (1999, 2007 et 2014) afin de déterminer une relation entre les mesures de formes urbaines et les distances moyennes domicile-travail parcourues par les navetteurs. Nos statistiques descriptives montrent une faible variation de nos indicateurs au niveau agrégé de 1999 à 2014 par classe d'aires urbaines. L'hétérogénéité entre aires urbaines apporte de l'information dans cette analyse par l'intermédiaire d'effets fixes. En outre, des variables spatiales et socio-économiques sont utilisées comme contrôles conformément à la littérature (popu-

lation, superficie, âge moyen des actifs, part des femmes actives, nombre de communes et part des flux de transport collectif). Nos estimations nous donnent une élasticité de la distance moyenne domicile-travail par rapport à la concentration des emplois dans les communes centres de 0,22 et une élasticité de la distance moyenne domicile-travail par rapport à la concentration du nombre d'emplois au sein des aires urbaines de 0,26 pour l'analyse en coupe sur trois périodes (1999, 2007 et 2014). Ensuite, une analyse contre-factuelle simple est menée afin de prédire les variations des distances domicile-travail si la répartition des emplois est identique à celle de la population au sein des aires urbaines. Sur les trois périodes (1999, 2007 et 2014), les distances domicile-travail peuvent être réduites de 28% en moyenne dans le cas d'une distribution identique des emplois et de la population. Dans le cas d'une estimation incluant l'indice de concentration de la population par aire urbaine, les distances prédites sont réduites de seulement 9% en moyenne. L'écart est important en absolu entre les diminutions moyennes des distances domicile-travail. La population française habitant dans les aires urbaines est répartie autour des pôles urbains. Cette population urbaine s'est progressivement dispersée et éloignée des lieux d'emplois qui sont concentrés dans les pôles urbains (Levy et Le Jeannic, 2011). Par conséquent, c'est une politique de décentralisation qui aurait un impact significatif dans la réduction des distances parcourues contrairement à un rapprochement de la population vers les centres d'emplois. Conformément à la littérature, nos résultats montrent que l'augmentation de la densité de population réduit les distances domicile-travail. Cet effet permet de faire diminuer la consommation de carburants (Blaudin de Thé *et al.*, 2018). Cependant, l'effet d'une augmentation de la densité de population reste faible avec une élasticité entre les distances parcourues, la consommation de carburant et la densité variant de -0,075 à -0,18 selon les spécifications dans la littérature (Blaudin de Thé *et al.*, 2018 ; Schwanen *et al.*, 2004a ; Duranton et Turner, 2017).

Une forte densité de population induit une demande de trajet plus forte amenant à des temps de trajet domicile-travail plus élevés et des effets ambigus sur les émissions de CO_2 (Makido *et al.*, 2012 ; Borck, 2016 ; Wiedenhofer *et al.*, 2018). À titre d'exemple, à Paris, les navetteurs ont perdu en moyenne 55 heures dans les embouteillages en 2013 (CEBR, 2014). La congestion du réseau routier due à une forte demande se traduit par un temps de trajet moyen vers un lieu d'emploi plus long en heure de pointe qu'en heure creuse. De plus, les temps de trajet moyens (aller simple ou aller-retour) lors des déplacements pendulaires augmentent avec la distance à la commune centre du pôle urbain et peuvent également avoir une forme non monotone dans le cas d'aires urbaines possédant de multiples centres d'emploi attractifs (Kahn, 2010). Pour des raisons similaires à la pollution liée au trafic urbain, redensifier les villes ne suffit pas car il faut également s'intéresser à

l'organisation spatiale des emplois (Muñiz et Galindo, 2005). L'accent doit donc être mis sur la réduction de la congestion urbaine par une meilleure répartition de la demande sur l'ensemble du réseau et une amélioration de l'accessibilité aux lieux d'emplois. En outre, l'aménagement de l'espace urbain dépend de la structuration du réseau de transport décidé par les métropoles. Ce faisant, il expliquerait les caractéristiques liées à la mobilité au sein des aires urbaines. Par conséquent, nous réalisons plusieurs analyses dans la section 4 où nous estimons les temps de trajet aux heures de pointe aux lieux d'emploi en 2014 afin de tester la viabilité de nos quatre indicateurs de formes urbaines.

L'objectif de cette section est de (i) déterminer si la localisation relative des emplois influence significativement les temps de déplacement et (ii) d'identifier les indicateurs les plus pertinents permettant d'expliquer les temps de trajet moyens en heure de pointe. Dans un premier temps, nous estimons les temps de trajet moyens domicile-travail en heure de pointe et les distances domicile-travail en prenant uniquement en compte les communes appartenant aux aires urbaines. Nous contrôlons les estimations par des variables caractérisant chaque commune (part des femmes actives, âge moyen des actifs, distance kilométrique au centre) et les variables utilisés en section 3 caractérisant les aires urbaines dans lesquelles les communes sont situées. Nous caractérisons également les communes en fonction de la classe d'aire urbaine à laquelle elles appartiennent et leur statut de commune centre. Il en ressort que l'élasticité entre les temps de trajets en heure de pointe ou les distances domicile-travail avec la part des emplois dans une commune centre et l'indice de concentration des emplois dans une aire urbaine est respectivement de 0,07 et 0,05. Cela implique que les distances domicile-travail augmentent mécaniquement les temps de trajet moyens en heure de pointe à vitesse inchangée. En ce qui concerne les temps de trajet moyens en heure de pointe au pôle urbain le plus près, le fait de concentrer les emplois dans les pôles est associé à une légère augmentation du temps de trajet. Cependant, le fait d'augmenter la dissimilarité entre lieux d'emplois et lieux de résidence est associé à une diminution des temps de trajet moyens vers les pôles car tous les motifs de déplacement sont considérés (domicile-travail, loisirs, shopping...).

Dans un second temps, nous estimons les variables dépendantes utilisées précédemment avec pour objectif de montrer qu'une décentralisation des emplois a un impact non négligeable. Ainsi, nous construisons deux mesures de distribution spatiale des emplois au niveau communal: (i) un ratio du nombre d'emploi rapporté à la population active par commune et (ii) la part du nombre d'emplois par commune par rapport à l'aire urbaine. Nos résultats nous donnent des élasticités négatives entre les distances, temps de trajet domicile-travail et au pôle urbain en heure de pointe et nos indicateurs de concentration des emplois.

Enfin, nous terminons l'analyse transversale en 2014 par une analyse contrefactuelle simple afin de prédire l'évolution des temps de trajet en heure de pointe et des distances domicile-travail si la répartition est identique entre les emplois et la population au sein des communes des différentes aires urbaines françaises en 2014. En moyenne, nous montrons que les temps de trajet et les distances domicile-travail peuvent être réduits de 10%.

Le chapitre est organisé de la manière suivante. Nous présentons les données utilisées issues du Recensement de la Population française de 1999, 2007 et 2014. Nous examinons les évolutions des distances parcourues aux lieux d'emploi, du temps de trajet en heure de pointe aux lieux d'emploi selon les trois types d'aires urbaines de 1990 à 2014. Nous décrivons également les quatre indicateurs clés que nous construisons afin de caractériser les formes urbaines. La section 3 présente les résultats des estimations des distances domicile-travail sur trois périodes. La section 4 donne les résultats de nos analyses concernant notamment les estimations des temps de trajet en heure de pointe et nous concluons.

2 Données sur les déplacements domicile-travail et les aires urbaines

Cette partie présente les données utilisées pour mesurer l'impact des formes urbaines sur la distance moyenne (pondérée par l'ensemble des flux de transport) parcourue par chaque navetteur pour se rendre à un lieu d'emploi au sein de chaque aire urbaine. Nous construisons plusieurs indicateurs de forme urbaine liés aux densités résidentielles, d'emplois et à la distance aux lieux d'emplois.

2.1 Déplacements domicile-travail

Cette analyse utilise les données issues du recensement de la population française (dénommé par la suite RP) réalisé par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) tous les dix ans de manière exhaustive avant 2004. Depuis 2004, des enquêtes annuelles sont menées tous les ans, ce qui permet d'obtenir des données actualisées tous les cinq ans pour l'ensemble du territoire français. Les communes de moins de 10 000 habitants sont sondées une fois tous les cinq ans et pour celles de plus de 10 000 habitants, au moins 8% des logements sont sondés tous les ans, soient au moins 40% de la population tous les cinq ans¹. Nous utilisons uniquement les données des communes métropolitaines situées dans chaque aire urbaine et nous excluons les communes multi-

¹L'INSEE sonde également tous les logements neufs occupés.

polarisées² et celles situées hors aires urbaines³. Le RP de 1999 a concerné l'ensemble de la population française enquêtée. La date de référence est le 8 mars 1999. Le RP de 2007 actualisé est obtenu à partir des enquêtes tournantes effectuées de 2004 à 2009 et celui de 2014 à partir des enquêtes suivantes de 2009 à 2014. Ainsi, nous disposons des données socio-démographiques des ménages vivant en France au niveau individuel : lieu de travail, emploi, commune de résidence, âge et genre des membres du ménage. À partir des données individuelles, des données communales ont été constituées permettant de dénombrer les emplois au lieu de travail et les actifs occupés au lieu de résidence. Les communes de résidence sont classées par aire urbaine. Les aires urbaines françaises sont codifiées selon la nomenclature de 2010 pour les trois années d'étude choisies (1999, 2007 et 2014). Aucune aire urbaine n'est constituée d'enclaves. Chaque aire urbaine regroupe un ensemble de communes constitué par une commune centre d'un pôle urbain ainsi que de communes situées dans une couronne péri-urbaine dont plus de 40% des actifs ayant un emploi ont leur lieu de travail au sein du pôle urbain ou des communes attenantes (voir Annexe A).

Mesure des déplacements Les données issues des RP de 1999, 2007 et 2014 nous donnent les lieux de résidence et les lieux d'emploi des ménages. Ces indications sont utilisées pour mesurer les distances parcourues domicile-travail avec un distancier appelé "Odomatrix" qui est un véritable outil de mesure des accessibilités routières sur l'ensemble du réseau français jusqu'aux niveaux communal et infracommunal (Hilal, 2010). Odomatrix comprend une base de données routières issue de la base de données ROUTE 500® de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) incluant des informations précises sur le réseau routier français (longueur et largeur des tronçons, arcs, noeuds, chefs-lieux de communes, sens de circulation). Chaque tronçon de route subit une correction altimétrique et planimétrique de sa géométrie. Une vitesse de circulation est appliquée à chaque tronçon en fonction du type de route (autoroute, route nationale, départementale, locale) et de la géographie des lieux traversés (ex: nomenclature des aires urbaines de 2010 fourni par l'INSEE), ce qui permet de calculer un temps de trajet par arc du réseau⁴. Avec cet outil, nous disposons des superficies des aires urbaines pour chaque année. Nous avons calculé pour chaque commune d'une aire urbaine la distance routière parcourue vers la commune centre du pôle urbain, le temps de trajet en heure creuse pour

²Selon la définition de l'INSEE, "les communes multipolarisées sont les communes dont au moins 40% des actifs occupés résidents travaillent dans plusieurs grandes aires urbaines, sans atteindre ce seuil pour une seule d'entre elles, et qui forment avec elles un ensemble d'un seul tenant." <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1648> (consulté le 27/09/2018).

³Les communes influencées par plusieurs pôles ainsi que les communes rurales hors zone d'influence ne sont pas prises en compte dans cette étude ainsi que les communes frontalières à des pays étrangers.

⁴Un arc comprend plusieurs tronçons routiers.

se rendre à la commune centre du pôle urbain, la distance routière à la commune centre du pôle urbain le plus près d'une commune de résidence, le temps de trajet à la commune centre du pôle urbain le plus près en heure creuse et en heure de pointe, le nombre de flux de voitures particulières et de transports collectifs par commune, la distance routière et le temps de trajet en heure creuse aux lieux d'emploi (pondérée par tous les flux selon le mode de transport). En outre, nous disposons du temps de trajet aux lieux d'emploi en heure de pointe mais uniquement pour l'année 2014. Nous ne disposons pas des adresses exactes de chaque individu. Ainsi, les distances et les temps de trajet sont mesurés entre chefs-lieux de communes⁵.

Variables dépendantes Le tableau 3.1 présente les statistiques descriptives des variables dépendantes issues du RP de 1999, 2007 et 2014, variables construites avec Odomatrix : (i) la distance moyenne domicile-travail, (ii) le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe, (iii) la distance moyenne au pôle urbain et (iv) le temps de trajet moyen du lieu de résidence au pôle urbain le plus près. Les aires urbaines sont classées selon le nombre d'emplois correspondant aux critères utilisées par l'INSEE (Van Puymbroeck et Reynard, 2010; Brutel, 2011). Nous avons décidé d'isoler l'agglomération parisienne au vu de son poids en termes d'emplois et de population vis-à-vis de l'ensemble des aires urbaines françaises. La deuxième classe regroupe les aires urbaines métropolitaines concentrant à la fois plus de 200 000 emplois et plus de 500 000 habitants (hors Paris)⁶. La troisième catégorie englobe les grandes aires urbaines de 50 000 à 200 000 emplois et la dernière est composée des autres aires urbaines ayant respectivement 1 500 à 5000 emplois et 5 000 à 10 000 emplois au sein de leur pôle urbain⁷.

Pour chaque année, nous avons restreint notre champ d'études aux aires urbaines comptant au moins deux communes en leur sein afin d'observer des déplacements vers une commune centre. En outre, nous nous restreignons aux aires urbaines dans lesquelles les distances moyennes domicile-travail sont inférieures ou égales à 50 kilomètres⁸. Ainsi, les données de 597 aires urbaines en 1999, 594 en 2007 et 602 en 2014 sont conservées pour

⁵Les distances et les temps de trajet domicile-travail/commune centre correspondent à une distance et un temps de trajet moyen pour un aller-retour.

⁶L'INSEE ajoute également un critère lié à la présence de plus de 20 000 cadres ayant des fonctions métropolitaines mais nous ne disposons pas de cette information dans nos bases de données (Brutel, 2011).

⁷Le pôle urbain d'une aire est dénommé également "unité urbaine". Un pôle regroupe la commune centre et les communes limitrophes respectant le critère de répartition d'emploi des aires urbaines. Ce pôle est ensuite entouré d'une couronne péri-urbaine regroupant des communes urbaines et rurales où résident au minimum 40% des actifs ayant un emploi au sein du pôle ou d'une commune attirée par le pôle, le tout constituant une aire urbaine (Brutel et Levy, 2011).

⁸Les aires urbaines corses donnent des valeurs aberrantes pour les années 1999 et 2007, c'est pourquoi elles ont été exclues. Concernant l'année 2014, aucune aire urbaine n'a été exclue suite à la restriction qui permet d'améliorer la qualité des estimations.

les analyses. Ces aires urbaines hébergent respectivement 47 872 278, 50 444 759 et 52 514 970 habitants, ce qui représente 79,5%, 79,3% et 79,7% de la population française. Les aires urbaines exclues du modèle à cause de valeurs aberrantes représentent seulement 0,4% de la population totale française en 1999 et en 2007. Nous pouvons déduire du tableau 3.1 que les distances domicile-travail ont augmenté en moyenne entre 1999 et 2014 avec une légère baisse entre 2007 et 2014 pour les autres aires urbaines. Notons toutefois que la variabilité des distances moyennes parcourues est faible au sein des autres aires urbaines. À titre d'exemple, les écarts-types oscillent entre 4,2 et 4,5 kilomètres alors que pour les grandes aires urbaines, les écarts-types se situent entre 2,2 et 4,3 kilomètres. Nous disposons du temps de trajet moyen domicile-travail (pondéré par les flux de transport) uniquement pour l'année 2014, ce qui ne nous permet pas de faire des comparaisons avec les autres années. Concernant les distances moyennes parcourues et les temps de trajet moyens au pôle urbain le plus près de chaque commune de résidence, elles restent stables de 1999 à 2014. Aussi, les temps de trajet moyens au pôle urbain sont très stables au sein des petites et moyennes aires urbaines sur ces trois périodes (écart-types entre 21,9 et 22,7 minutes).

Table 3.1: Statistiques descriptives des variables dépendantes : distances aux emplois, temps de trajet moyens domicile-travail et domicile-pôle urbain en fonction des classes d'aires urbaines en 1999, 2007 et 2014.

Classes d'aires urbaines	Distance domicile-travail (km)		Temps de trajet domicile-travail (minutes)		Distance au pôle urbain (km)		Temps de trajet vers le pôle urbain (minutes)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
1999 (N=597)								
Aire urbaine de Paris (n=1)	13.7				19.8		43.8	
Aire métropolitaine (n=11)	15.1	1.6			13.4	2.3	28.6	5.5
Grandes aires urbaines (n=47)	15.5	3.9			8.9	3.0	18.3	5.7
Autres aires urbaines (n=538)	14.2	3.4			2.6	2.1	32.6	22.1
2007 (N=594)								
Aire urbaine de Paris (n=1)	13.7				20.1		44.1	
Aire métropolitaine (n=14)	16.9	2.0			13.2	2.7	27.8	5.9
Grandes aires urbaines (n=51)	16.8	4.3			9.0	3.0	17.8	5.8
Autres aires urbaines (n=528)	15.9	4.5			2.7	2.1	33.1	21.9
2014 (N=602)								
Aire urbaine de Paris (n=1)	14.3		26.7		20.3		44.4	
Aire métropolitaine (n=15)	17.5	1.9	24.6	2.2	13.5	2.7	28.2	5.8
Grandes aires urbaines (n=49)	17.7	2.2	22.0	2.7	9.5	3.0	18.7	5.8
Autres aires urbaines (n=537)	17.5	4.2	18.0	4.0	2.9	2.3	33.8	22.5

Champs : Aires urbaines de 2 communes ou plus en France métropolitaine.

Note de lecture : En 2014, dans les aires métropolitaines, les distances moyennes domicile-travail sont de 17,5 km pour un temps de trajet moyen de 24,6 minutes. La distance moyenne au pôle urbain est de 13,5 km pour un temps de trajet moyen de 28,2 minutes. *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014,

UMR1041 CESAER INRA.

2.2 La mesure des formes urbaines

Dans cette analyse, les individus statistiques sont les aires urbaines françaises métropolitaines incluant deux communes au minimum afin de capter des distances domicile-travail autres que vers la commune centre. Ces trajets domicile-travail sont affectés par la configuration spatiale (réseau routier, occupation/utilisation du sol...), les fonctions urbaines (zones d'emplois, flux de transport...) et la population urbaine (densité, caractéristiques socio-économiques...). Dans notre cas, quatre indicateurs différents seront testés. Le premier indicateur de forme urbaine est spécifique aux communes centres de chaque aire urbaine. Il représente la part des emplois situés dans la commune centre par rapport aux emplois totaux au sein de l'aire urbaine:

$$PEC_{it} = \frac{EmploiCentre_{it}}{EmploiTotal_{it}} \quad (3.1)$$

où $i = 1, \dots, N$ correspond aux aires urbaines à la période t (1999, 2007 ou 2014). Les variables $EmploiCentre_{it}$ et $EmploiTotal_{it}$ sont respectivement le nombre d'emplois dans la commune centre et le nombre d'emplois total dans l'aire urbaine. Cet indicateur permet de déterminer si les emplois sont concentrés ou non au sein de la commune centre de l'aire urbaine et donc de refléter ou non le caractère monocentrique de ladite aire. Cependant, il ne donne aucune information sur la distribution spatiale des emplois au sein de la commune centre et de l'aire urbaine. Le deuxième indicateur utilisé mesure la dispersion des emplois au sein de l'aire urbaine i afin d'apprécier plus précisément son degré de polycentrisme ou de monocentrisme. C'est un indice similaire à celui d'Herfindahl-Hirschmann qui est une mesure de la concentration des entreprises au sein d'un marché. La mesure est la suivante:

$$IndiceHH_{it} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{Emploi_{kit}}{Emploi_{it}} \right)^2 \quad (3.2)$$

où $i = 1, \dots, N$ correspond aux aires urbaines à la période t (1999, 2007 ou 2014). $k = 1, \dots, n$ sont les communes au sein d'une aire urbaine i . $Emploi_{it}$ est le nombre d'emplois total au sein de l'aire urbaine i . $Emploi_{kit}$ est le nombre d'emplois au sein de la commune k de l'aire urbaine i . Ainsi, on obtient le poids que représente chaque commune quant à la localisation des emplois. Un indice proche de 0 signifie que les zones d'emplois sont dispersées au sein de l'aire urbaine et inversement s'il est proche de 1. Par rapport au premier indicateur, nous captons la distribution spatiale des emplois au sein de l'ensemble de l'aire urbaine. Par conséquent, les communes centres d'emplois principaux et secondaires sont captés par cette mesure. Cependant, il manque la distribution spatiale de la population par rapport aux zones d'emplois. C'est pourquoi, les deux derniers indicateurs utilisés sont des indices de distribution spatiale intergroupe. Nous comparons la distribution spatiale des emplois et de la population avec deux indices de dissimilarité de type Duncan and Duncan (1955). Le premier s'intéresse à la distribution au sein de la commune centre de chaque aire urbaine et est exprimé de la façon suivante:

$$ID - Centre_{it} = \left(\frac{1}{2} \left| \frac{PopulationCentre_{kit}}{Population_{it}} - \frac{Emploi_{kit}}{Emploi_{it}} \right| \right) \quad (3.3)$$

où $PopulationCentre_{kit}$ est la population ayant la commune centre de l'aire urbaine comme lieu de résidence. $Population_{it}$ est la population totale de l'aire urbaine i . Le ratio $Emploi_{kit}/Emploi_{it}$ représente le poids de la commune centre en matière d'emplois par rapport à l'aire urbaine où elle se situe. Nous captons uniquement la proportion des emplois et de la population dans la commune centre. Plus cet indice est proche de 0, plus

la population et les emplois ont une distribution égale et inversement⁹. Le second indice est plus précis et s'attache à mesurer la répartition des emplois et de la population au sein de chaque aire urbaine cette fois-ci. L'indice est le suivant:

$$ID - Aireurbaine_{it} = \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \left| \frac{Population_{kit}}{Population_{it}} - \frac{Emploi_{kit}}{Emploi_{it}} \right| \right) \quad (3.4)$$

où $k = 1, \dots, n$ correspond au nombre de communes au sein de chaque aire urbaine k . Plus cet indice est proche de 0,5, plus les emplois et la population sont inégalement répartis au sein de l'aire urbaine et inversement¹⁰. Le tableau 3.2 donne les valeurs moyennes et les écarts-types de ces indices pour chaque classe d'aire urbaine à chaque période. En ce qui concerne la proportion des emplois localisées au sein de la commune centre des aires urbaines, on remarque que plus la taille des aires décroît, plus les emplois sont concentrés. On passe d'une moyenne de 30% pour Paris à 80% pour les autres aires urbaines comme Lorient ou Brive-la-Gaillarde. Ce fait est reflété par la mesure de la concentration des emplois au sein des aires urbaines. L'indice de concentration évolue de 0,1 pour l'aire urbaine de Paris jusqu'à 0,6 pour les petites et moyennes aires urbaines. Donc les emplois sont bien plus concentrés dans ces aires qu'à Paris. Notons que les emplois sont trois fois plus concentrés spatialement dans les grandes aires urbaines qu'à Paris. Quand on s'intéresse à la répartition des emplois et de la population dans les communes centres des aires urbaines, on remarque qu'ils sont presque également répartis au vu de l'indice de dissimilarité égal à 0,1 en moyenne pour l'ensemble des aires urbaines. Pour ce qui est de la répartition au sein des aires urbaines, l'indice triple pour Paris et double pour l'ensemble des autres classes d'aires urbaines. Nous en déduisons qu'au niveau d'une aire urbaine, la répartition des emplois et des populations est plus inégale impliquant l'existence de zones d'affaires comme *La Défense* à Paris et des communes-dortoirs. Tous ces éléments sont stables en moyenne sur les trois périodes étudiées (1999, 2007 et 2014) pour chaque classe d'aire urbaine. Par conséquent, cela reflète une absence de réaménagement et de création majeurs de nouvelles zones d'activités économiques, artisanales et commerciales attractives pendant 15 ans. Une des raisons qui peut expliquer ces observations est lié au désengagement financier progressif de l'Etat depuis les années 1980-1990 dans la stratégie d'aménagement des territoires (Hervé et De Nicola, 2017).

⁹Un indice égal à 0,5 stipule que soit la commune est une commune dortoir hébergeant uniquement la population, soit elle est concentrée de lieux d'emplois uniquement. Un indice égal à 0 signifie une proportion égale entre population et nombre d'emplois dans la commune.

¹⁰Un indice égal à 0 signifie que les emplois et la population sont répartis de manière équivalente au sein de l'aire urbaine. Un indice égal à 0,5 indique qu'il existe une ségrégation entre les zones d'emplois et les lieux de résidence de la population.

Table 3.2: Statistiques descriptives des différents indicateurs de forme urbaine en fonction des classes d'aires urbaines en 1999, 2007 et 2014.

Classes d'aires urbaines	PEC		Indice HH		ID - Centre		ID - Aire urbaine	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
1999 (N=597)								
Aire urbaine de Paris (n=1)	0.32		0.11		0.07		0.26	
Aire métropolitaine (n=11)	0.41	0.09	0.19	0.08	0.05	0.02	0.19	0.04
Grandes aires urbaines (n=47)	0.52	0.16	0.31	0.15	0.08	0.03	0.23	0.04
Autres aires urbaines (n=538)	0.77	0.17	0.65	0.21	0.07	0.04	0.16	0.08
2007 (N=594)								
Aire urbaine de Paris (n=1)	0.31		0.10		0.06		0.25	
Aire métropolitaine (n=14)	0.41	0.10	0.19	0.08	0.05	0.02	0.19	0.04
Grandes aires urbaines (n=51)	0.51	0.16	0.31	0.15	0.08	0.03	0.23	0.04
Autres aires urbaines (n=528)	0.76	0.17	0.64	0.21	0.08	0.04	0.17	0.09
2014 (N=602)								
Aire urbaine de Paris (n=1)	0.31		0.10		0.07		0.26	
Aire métropolitaine (n=15)	0.41	0.09	0.19	0.07	0.05	0.02	0.20	0.05
Grandes aires urbaines (n=49)	0.50	0.16	0.29	0.14	0.08	0.03	0.23	0.04
Autres aires urbaines (n=537)	0.75	0.18	0.63	0.21	0.08	0.04	0.17	0.09

Champs : Aires urbaines de 2 communes ou plus de France métropolitaine.

Note de lecture : La part moyenne des emplois localisés dans la commune centre est de 40% dans les aires métropolitaines avec un écart-type de 10% en 1999. L'indice de concentration des emplois a une moyenne de 0,2 pour un écart-type de 0,1. L'indice de répartition de la population et des emplois dans la commune centre a une moyenne de 0,1 pour un écart-type proche de 0 et celui qui mesure la distribution spatiale des emplois et de la population au sein des aires urbaines a une moyenne de 0,2 pour un écart-type proche de 0; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine. *Source* : recensements de la population de

1999, 2007 et 2014 INSEE; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

2.3 Les variables de contrôle

Dans cette analyse, plusieurs variables de contrôle utilisées sont des sources d'informations non négligeables. Parmi ces variables, la priorité était de disposer de la densité urbaine mesurée par le ratio de la population totale rapportée à la superficie. C'est un indicateur de forme urbaine très utilisé dans la littérature et influençant l'offre de transports urbains et par conséquent le choix modal, les distances et les temps de trajet domicile-travail (CGDD, 2010). Une aire urbaine très étalée à faible densité de population induit des distances parcourues plus élevées ainsi qu'une utilisation d'un mode de transport privé et inversement. Les aires urbaines denses favorisent le rapprochement entre lieu de résidence et lieu d'emploi ainsi qu'une offre alternative de transport public par rapport au recours à un véhicule privé (Buehler, 2011 ; Schwanen *et al.*, 2004b). C'est pourquoi nous avons également classé les aires urbaines en isolant celle de Paris par rapport notamment au groupe des aires métropolitaines dont elle devrait faire partie. Les données indiquent une

spécificité de la capitale française où la moitié des navettes domicile-travail se fait au moyen d'un mode de transport collectif ou doux (vélo, marche à pieds,...), relevé également dans l'enquête transports et déplacements de 2008 (CGDD, 2010)¹¹.

Nous contrôlons par la proportion de femmes actives dans chaque aire urbaine car les femmes ont tendance à résider plus près de leur lieu de travail que les hommes. Cela implique des distances domicile-travail plus courtes quels que soient leur niveau de revenu et leur mode de transport (Pereira et Schwanen, 2015; Law, 1999; Buehler, 2011; Gordon *et al.*, 1989). Leur temps de trajet vers un lieu d'emploi est plus court que celui des hommes selon plusieurs études empiriques (Pereira et Schwanen, 2015; Carlson et Malmfors, 2018; Crane et Takahashi, 2009; Wyly, 1998). De plus, les femmes ont tendance à moins utiliser un véhicule privé dans leurs trajets quotidiens (Colley et Buliung, 2016; Schwanen *et al.*, 2001). Plusieurs explications sont relevées dans la littérature: (i) une préférence plus prononcée pour les autres moyens de transport, (ii) la présence de plusieurs trajets courts dans une journée de travail liés notamment aux trajets domicile-école pour les ménages avec enfants et (iii) des décisions de choix modaux au sein des ménages en faveur de l'utilisation du véhicule principal par les hommes (Crane et Takahashi, 2009; Colley et Buliung, 2016). Les femmes et les hommes actifs ont un intérêt commun à se localiser dans les aires urbaines afin d'être près de leur lieu d'emploi et parce que ces villes ont une demande de travail et des salaires plus élevés proposés par des entreprises plus efficaces que dans les communes rurales (De la Roca et Puga, 2017). Nous ne disposons pas des compétences et des salaires moyens comme variables de contrôle mais uniquement de l'âge moyen des actifs qui permet de capter un effet du cycle de vie sur les localisations et les distances domicile-travail. Les jeunes travailleurs ont tendance à se localiser près de la commune du centre urbain tandis que les couples mariés actifs plus âgés ont tendance à s'éloigner du centre des villes (Buisson et Lincot, 2016; Gautier *et al.*, 2010; White, 1986). Enfin, utiliser l'âge moyen des actifs permet en partie de contrôler l'évolution des localisations en fonction du statut marital.

Les aires urbaines françaises présentent des données socio-économiques similaires sur les trois périodes. L'âge moyen des actifs varie légèrement entre chaque période et est identique entre classes d'aires urbaines. Il augmente d'un an entre 1999 et 2014. La proportion moyenne de femmes actives augmente entre 1999 et 2014 atteignant presque 50%. Notons que la proportion moyenne est la plus élevée à Paris et la plus faible dans les autres aires

¹¹Les temps de trajet domicile-travail sont également plus long en moyenne en Île-de-France qu'en province. En 2008, 72 minutes par jour sont consacrées à faire la navette pour des distances moyennes similaires (CGDD, 2010).

urbaines à chaque période. À titre d'exemple, il y a une moyenne de 47,4% de femmes actives dans ces dernières en 2014, ce qui correspond à la proportion moyenne à Paris en 1999. Entre 1999 et 2014, la superficie des aires urbaines est définie selon la nomenclature de 2010. Nos aires urbaines sont constantes mais nous observons une variation de leur superficie qui est dû à (i) des fusions de communes entre deux RP entraînant une baisse du nombre de communes (observé entre 1999 et 2007) et à (ii) des évictions de communes ne comptabilisant plus aucun actif ni d'emplois (observé entre 2007 et 2014). C'est pourquoi la superficie des différentes aires urbaines évolue légèrement à la baisse en moyenne entre 1999 et 2014. En outre, au sein de chaque classe à l'exception de Paris, la variabilité du nombre de communes moyenne par aire urbaine est élevée. À titre d'exemple, les aires métropolitaines sont composées de 205 communes en moyenne en 2014 avec un écart-type de 131. La population totale à Paris diminue entre 1999 et 2014 contrairement aux autres aires urbaines. La population moyenne au sein de chaque classe d'aires urbaines oscille entre baisse et augmentation entre 1999 et 2014 avec une forte variabilité entre aires urbaines au sein de chaque classe. Enfin, les flux de transport collectif sont de très loin minoritaires dans les aires urbaines autres que Paris. À titre d'exemple, la proportion moyenne des flux de transport collectif est de seulement 15,8% dans les aires métropolitaines comparé aux 49,9% au sein de l'aire urbaine de Paris en 2014 (voir Table 3). En général, les trajets en transport collectif sont plus longs que les trajets en véhicule privé (Crane et Takahashi, 2009).

Table 3.3: Statistiques descriptives des variables de contrôle : caractéristiques spatiales et socio-démographiques en fonction des classes d’aires urbaines en 1999, 2007 et 2014.

	Superficie (<i>km</i> ²)		Population totale (milliers)		Nombre de communes		Age moyen des actifs (ans)		Femmes actives (%)		Proportion des flux de transport collectif (%)	
Classes d’aires urbaines	Moyenne	Ecart- type	Moyenne	Ecart- type	Moyenne	Ecart- type	Moyenne	Ecart- type	Moyenne	Ecart- type	Moyenne	Ecart- type
1999 (N=597)												
Aire urbaine de Paris (n=1)	17174		11 356		1798		41.1		47.4		42.3	
Aire métropolitaine (n=11)	3447	1605	997.5	431.1	238.6	138.7	41.0	0.8	45.9	0.5	10.4	2.0
Grandes aires urbaines (n=47)	1451	754	276.8	125.5	115.6	71.5	41.0	0.4	44.9	2.0	6.7	2.8
Autres aires urbaines (n=538)	196	234	23.2	27.8	14	19.2	40.5	0.8	43.6	2.3	2.9	2.5
2007 (N=594)												
Aire urbaine de Paris (n=1)	17174		12 067		1798		40.7		48.4		47.7	
Aire métropolitaine (n=14)	3140	1587	958.3	468.9	208.9	136.9	40.7	0.8	47.7	0.5	13.9	2.9
Grandes aires urbaines (n=51)	1316	730	253.2	119.0	108.8	71.8	40.5	0.5	47.0	1.4	7.8	3.0
Autres aires urbaines (n=528)	190	225	22.8	26.6	13.4	18.1	40.5	1.0	46.0	2.2	3.5	2.8
2014 (N=602)												
Aire urbaine de Paris (n=1)	17050		12 476		1769		42.1		49.0		49.9	
Aire métropolitaine (n=15)	3101	1543	976.3	501.1	205.2	131.0	42.1	0.8	48.7	0.5	15.8	3.8
Grandes aires urbaines (n=49)	1309	691	259.4	118.3	106	71.4	41.9	0.6	48.3	1.2	8.0	3.4
Autres aires urbaines (n=537)	191	227	23.6	28.0	13.4	17.9	42.5	1.2	47.4	2.2	3.8	3.2

Source : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA. recensements de la population de 1999, 2007 et 2014,

3 Évolution des distances moyennes domicile-travail parcourues et formes urbaines

Notre objectif est d'estimer la relation entre nos mesures de formes urbaines et les distances moyennes domicile-travail. L'analyse en coupe est constituée de données sur trois périodes: 1999, 2007 et 2014. Le modèle économétrique que l'on utilise pour évaluer l'impact de la distribution spatiale des lieux d'emplois et résidentiels sur les distances moyennes domicile-travail est le suivant:

$$\log y_{it} = \beta_0 + \beta \log X_{it} + \gamma Z_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (3.5)$$

où y_{it} est la distance moyenne domicile-travail parcourue par chaque navetteur au sein de l'aire urbaine i pendant l'année t . Cette distance moyenne domicile-travail est pondérée par l'ensemble des flux de transport au niveau communal (pour tous modes) et par les flux de véhicules privés et de transports collectifs au niveau de chaque aire urbaine. X_{it} est le vecteur des indicateurs caractérisant la forme urbaine de l'aire i à la date t . Les quatre indicateurs de mesure des formes urbaines précédemment définis sont utilisés séparément dans les régressions par moindres carrés ordinaires (MCO). Le vecteur des variables de contrôle Z_{it} est composé de la taille de la ville mesurée par la superficie totale de l'aire urbaine, la population totale (actifs occupés et inactifs), le nombre total de communes par aire urbaine, les caractéristiques socio-économiques (proportion de femmes actives, âge moyen des actifs) et la part que représente les flux de transport collectif dans les flux totaux par aire urbaine i à l'année t . λ_t est un effet fixe année pour prendre en compte l'évolution des distances moyennes parcourues entre 1999 et 2014, avec l'année 1999 prise comme référence.

Enfin, μ_i est un effet fixe aire urbaine. L'intégration d'effets fixes aires urbaines nous permet de capter en partie l'hétérogénéité entre ces aires pour différentes variables non observées ou non disponibles pour cette analyse. L'aire urbaine prise comme référence pour chacun des modèles est l'aire urbaine correspondant à Paris. Par conséquent, nous obtenons l'effet incrémental de chaque aire urbaine sur les distances moyennes domicile-travail parcourues par rapport à l'aire urbaine de référence. Pour nos régressions MCO, nous utilisons une spécification log-log incluant nos variables de contrôle et nos variables explicatives. Les coefficients β sont nos paramètres d'intérêt. Ils mesurent l'impact de la forme urbaine sur les distances moyennes domicile-travail toutes choses égales par ailleurs. Avec une spécification log-log, ces coefficients doivent être interprétés de la manière suivante. Prenons la part des emplois dans la commune centre de l'aire urbaine mesurée en

pourcentage. Une augmentation de 1% de la part des emplois augmente les distances moyennes domicile-travail parcourues de $\beta_1\%$, la variation étant attendue positive toutes choses étant égales par ailleurs puisque les emplois se délocalisent plus rapidement que les populations. β_1 représente une élasticité ainsi que les autres coefficients pour les autres variables explicatives et variables de contrôle.

Le tableau 3.4 reporte les résultats de la régression MCO de référence. Les colonnes (2), (3), (4) et (5) montrent que nos indicateurs de forme urbaine impliquant la localisation des lieux d'emplois et des résidents ont un impact positif significatif sur les distances moyennes domicile-travail. Logiquement, la concentration des emplois au sein d'une aire urbaine mesurée par l'indice Herfindahl-Hirschmann (indice HH) et par la part des emplois situés dans la commune centre augmentent les distances domicile-travail. Pour 10% d'augmentation de la concentration ou de la part des emplois, on obtient respectivement 2,2 et 2,4% d'augmentation des distances moyennes. L'indice de répartition des emplois et de la population au sein des aires urbaines ainsi que leur proportion dans les communes centres des aires urbaines donnent des coefficients positifs respectifs de 0,5% et de 0,6% des distances domicile-travail dans le cas d'une augmentation de 10% de la dissimilarité. Accroître la dissimilarité entre lieux de résidence et lieux d'emplois est associé à une augmentation des distances domicile-travail étant donné que les emplois sont en majorité concentrés dans les communes centres des aires urbaines tout en contrôlant par l'évolution à la hausse des distances depuis 1999 (voir annexe 6.2). L'aménagement urbain à travers l'organisation spatiale des lieux d'emplois a un rôle non négligeable vis-à-vis des distances domicile-travail. Comme il était attendu, l'augmentation de la population dans une aire urbaine est lié à une réduction des distances domicile-travail toutes choses étant égales par ailleurs. De même, une augmentation des flux de transport collectif de 10% est associé à une faible augmentation de 0,4% des distances moyennes domicile-travail.

Pour tester la stabilité de nos coefficients, nous avons retravaillé les données sur les trois périodes avec les aires urbaines à superficie constante en conservant celles ayant le même nombre de communes qu'en 1999 afin de corriger les effets liés aux variations observées des superficies entre 1999 et 2014. Dans le cas de l'année 2014, il y a eu également des fusions de communes pour certaines aires urbaines comme Paris et Lyon mais leur superficie est restée similaire. Les effets marginaux sont quasiment identiques pour nos quatre variables d'intérêt et nos variables de contrôle. L'effet d'une augmentation de la population est similaire à la première analyse. L'influence des flux de transport collectif reste faible et identique lorsque les communes de référence sont de 1999. Enfin, on relève que si l'âge moyen des actifs augmente de 1% dans une aire urbaine, les distances moyennes domicile-travail ont un coefficient de -0,31% en colonne (1), un effet particulièrement élevé

Table 3.4: Impact des formes urbaines sur les distances moyennes domicile-travail (pondérées par tous les flux de transport) sur trois périodes (1999, 2007 et 2014).

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Log (distance moyenne domicile-travail)					
Log (superficie)	0.02 (0.26)	0.02 (0.27)	0.04 (0.27)	-0.004 (0.26)	0.01 (0.27)
Log (population)	-0.32*** (0.08)	-0.31*** (0.08)	-0.30*** (0.08)	-0.29*** (0.08)	-0.29*** (0.08)
Log (âge moyen des actifs)	-0.91** (0.36)	-0.95*** (0.36)	-0.97*** (0.36)	-0.95*** (0.36)	-0.90** (0.36)
Log (part des femmes actives)	-0.21 (0.18)	-0.23 (0.18)	-0.24 (0.18)	-0.23 (0.18)	-0.21 (0.18)
Log (nombre de communes)	-0.27 (0.30)	-0.26 (0.30)	-0.26 (0.30)	-0.27 (0.30)	-0.31 (0.30)
Log (part des flux de transport collectif)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)
Log (PEC)		0.24** (0.12)			
Log (Indice HH)			0.22** (0.10)		
Log (ID - centre)				0.05*** (0.02)	
Log (ID - aires urbaines)					0.06** (0.03)
Année 1999	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Année 2007	0.11*** (0.01)	0.12*** (0.01)	0.12*** (0.01)	0.11*** (0.01)	0.11*** (0.01)
Année 2014	0.26*** (0.02)	0.27*** (0.02)	0.27*** (0.02)	0.26*** (0.02)	0.25*** (0.02)
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Observations	1 788	1 788	1 788	1 788	1 788
Adj. R^2	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écart-types sont clusterisés au niveau des aires urbaines (594 clusters) et reportés entre parenthèses; toutes les régressions contiennent des constantes ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ Source : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

mais trois fois plus faible lorsque le nombre de commune des aires urbaines est constant. En d'autres termes, être un actif jeune augmenterait les distances domicile-travail car les

Table 3.5: Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile-travail (pondérées par tous les flux de transport), Référence : Communes et superficie de 1999 par aire urbaine.

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Log (distance moyenne domicile-travail)					
Log (population)	-0.29*** (0.08)	-0.28*** (0.08)	-0.26*** (0.08)	-0.26*** (0.08)	-0.25*** (0.08)
Log (âge moyen des actifs)	-0.31*** (0.10)	-0.30*** (0.10)	-0.29*** (0.10)	-0.32*** (0.10)	-0.34*** (0.10)
Log (part des femmes actives)	-0.25 (0.18)	-0.27 (0.18)	-0.28 (0.18)	-0.27 (0.18)	-0.25 (0.18)
Log (part des flux de transport collectif)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)
Log (PEC)		0.26** (0.12)			
Log (indice HH)			0.24** (0.10)		
Log (ID - centre)				0.04*** (0.02)	
Log (ID - aires urbaines)					0.06** (0.03)
Année 1999	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Année 2007	0.11*** (0.01)	0.12*** (0.01)	0.12*** (0.01)	0.11*** (0.01)	0.11*** (0.01)
Année 2014	0.24*** (0.02)	0.24*** (0.02)	0.25*** (0.02)	0.24*** (0.02)	0.23*** (0.02)
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Observations	1 781	1 781	1 781	1 781	1 781
Adj. R-squared	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires; les écart-types sont clusterisés au niveau des aires urbaines (**594 clusters**) et reportés entre parenthèses ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1 ; *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

jeunes diplômés n'ont pas forcément la capacité d'acquérir ou de louer un bien immobilier dans les centres des aires urbaines au début de leur carrière les contraignant à se localiser loin de leur lieu d'emploi (Huber, 2014).

Ensuite, nous testons nos résultats en utilisant une variable décalée des flux de trans-

port collectif pour chaque année. Nous ne disposons que des flux de transport collectif en 1999, 2007 et 2014. L'année 1999 est prise comme référence pour l'année 2007 et la variable des flux de 2007 pour l'année 2014. Donc, nous intégrons la variable décalée de la part du transport collectif dans les flux totaux pour les années 2007 et 2014¹². Dans cette analyse, nous considérons que le réseau de transport collectif en année 1999 est plus susceptible d'avoir un impact sur les distances domicile-travail huit ans plus tard. En effet, les réseaux routiers et ferroviaires sont des infrastructures nécessitant des investissements de long terme (Small et Verhoef, 2007). La répartition de l'utilisation des deux modes de transport (moyens privés et collectifs) dépend non seulement de la forme urbaine mais aussi de la présence d'alternatives et d'un réseau de transport collectif bien développé (Priemus *et al.*, 2001). La part des transports collectifs dans les flux totaux de 2007 est utilisé en contrôle pour expliquer les distances parcourues domicile-travail en 2014. En effet, on sait qu'un ménage prenant les transports en communs allonge son temps de trajet du fait des temps d'attente et des nombreux arrêts contrairement aux trajets porte-à-porte en voiture (Small et Verhoef, 2007 ; Mirabel et Raymond, 2013).

Les tableaux 3.6 et 3.13 reportent les résultats de cette analyse avec le nombre de communes constante et variable, tout en incluant la part décalée des flux de transport collectif pour 2007 et 2014 (Annexe C). L'année 1999 n'est pas prise en compte puisque nous ne nous disposons pas de la part des flux de transports collectifs en 1990. Nous retrouvons les mêmes résultats pour les deux analyses, à savoir les effets positifs d'une augmentation de la ségrégation de la population par rapport aux lieux d'emplois sur les distances moyennes domicile-travail (élasticités de 0,07 et de 0,10). Par rapport aux deux analyses précédentes, cela donne une augmentation de 0,03 (0,04) point pour l'élasticité entre l'indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre (au sein de l'aire urbaine) et les distances moyennes domicile-travail. Une des différences remarquable est l'absence de significativité de la part des emplois dans chaque commune centre et de l'indice de concentration des emplois au sein de chaque aire urbaine. Concernant la variable de contrôle de population totale par aire urbaine, la relation est négative et stable sur les deux analyses (de -0,44% à -0,50%) avec la variable d'intérêt. Enfin, la variable décalée de la part des transports collectifs dans les flux totaux, annule l'effet positif lorsque l'on travaille à nombre de communes constante et à nombre de commune variable. Lorsque l'on laisse le nombre de communes varier dans le temps, l'étalement urbain devrait rendre significatif l'allongement des distances domicile-travail mais ce n'est pas le cas avec les variables décalées du transport collectif. Cela démontre que les infrastructures liées aux transports collectifs n'ont pas subi de changements majeurs entre 1999 et 2014. Puis nous

¹²Pour une année t , on utilise la part des flux de transport collectif de l'année $t - x$ avec x égal à 7 quand $t = 2014$ et $x = 8$ quand $t = 2007$.

Table 3.6: Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile-travail (pondérées par tous les flux de transport), Référence : Communes et superficie de 1999.

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Log (distance moyenne domicile-travail)					
Log (population)	-0.50*** (0.17)	-0.50*** (0.17)	-0.50*** (0.17)	-0.46*** (0.17)	-0.44** (0.18)
Log (âge moyen des actifs)	-0.60 (0.08)	-0.61 (0.08)	-0.62 (0.08)	-0.76 (0.08)	-0.71 (0.09)
Log (part des femmes actives)	-0.24 (0.29)	-0.25 (0.29)	-0.25 (0.28)	-0.26 (0.28)	-0.24 (0.28)
Log (part des flux de transport public $t-x$)	0.02 (0.03)	0.02 (0.03)	0.02 (0.03)	0.01 (0.02)	0.01 (0.02)
Log (PEC)		0.13 (0.18)			
Log (Indice HH)			0.15 (0.14)		
Log (ID - centres)				0.07** (0.03)	
Log (ID - aires urbaines)					0.10** (0.05)
Année 2007	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Année 2014	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)	0.15*** (0.03)	0.14*** (0.03)
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Observations	1 175	1 175	1 175	1 175	1 175
Adj. R^2	0.60	0.60	0.60	0.61	0.61

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires; toutes les régressions comprennent des constantes ; les écart-types sont clusterisés au niveau des aires urbaines (594 clusters) et reportés entre parenthèses ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. Source : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ;

Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

nous intéressons au cas où l'on laisse les variations observées du nombre de communes depuis 1999 au sein des aires urbaines tout en conservant la variable décalée de la part des flux de transport collectif en tableau 3.8 (Annexe D).

Les colonnes (4) et (5) des tableaux 3.6, 3.13 et 3.14 sont révélatrices de l'importance de nos indices de dissimilarité emplois-population pour lesquels on attendait un effet positif et significatif (voir annexes C et D). En effet, intuitivement, plus la commune centre et les aires urbaines sont dissimilaires en ce qui concerne la répartition des lieux d'emplois

et de résidences, plus la distance domicile-travail augmenterait toutes choses égales par ailleurs. Les élasticités sont comprises entre 0,04 et 0,07 pour la relation entre l'indice de dissimilarité emplois-population pour les communes centres avec la variable d'intérêt. Concernant l'indice au sein des aires urbaines, les élasticités sont comprises entre 0,06 et 0,10. Notons la forte stabilité de ces élasticités pour les trois dernières analyses lorsque l'année 1999 est absente mais que le périmètre et le nombre de communes des aires urbaines est constant. La dernière analyse nous sert à tester la stabilité des coefficients avec un nombre de communes variable et la part des flux de transports collectifs à chaque date t . Nous retrouvons une élasticité positive de 0,06 entre la part des flux de transport collectifs et les distances moyennes parcourues domicile-travail. Nos résultats viennent confirmer le rôle de la densité de population communément admise dans la littérature (Duranton et Turner, 2017 ; Baudin de Thé *et al.*, 2018). Ils mettent en lumière également la nécessité de prendre en compte l'organisation spatiale de la ville par la répartition des zones d'activité économique et résidentielle.

Analyse contrefactuelle simple de l'évolution des distances moyennes domicile-travail. Dans cette dernière analyse, nous estimons dans un premier temps les distances moyennes domicile-travail au niveau de chaque aire urbaine en reprenant la régression comprenant un indicateur de concentration des emplois de type Herfindahl-Hirschmann:

$$\log D_{it} = \beta_0 + \beta_1 \log \text{IndiceHH}_{it} + \gamma \log Z_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it}. \quad (3.6)$$

Les distances prédites sont donc écrites sous la forme suivante:

$$\widehat{D}_{it} = \epsilon^{\widehat{\beta}_0} \text{IndiceHH}_{it}^{\widehat{\beta}_1} Z_{it}^{\widehat{\gamma}} \quad (3.7)$$

Ensuite, l'indice de concentration des emplois est remplacé par un indice de concentration de la population au sein des aires urbaines. Les coefficients de la régression précédente sont repris afin d'obtenir une nouvelle prédiction des distances parcourues domicile-travail:

$$\widehat{D}_{it}(\text{IndiceHH}_{\text{population}}) = \epsilon^{\widehat{\beta}_0} (\text{IndiceHH}_{\text{population}})^{\widehat{\beta}_1} Z_{it}^{\widehat{\gamma}}. \quad (3.8)$$

Cette nouvelle prédiction des distances dépendant de la concentration de la population nous permet de comparer avec celle dépendant de la concentration des emplois:

$$\Delta D = \frac{\widehat{\text{Distances}}_{it}(\text{IndiceHH}_{\text{population}}) - \widehat{\text{Distances}}_{it}}{\widehat{\text{Distances}}_{it}} \quad (3.9)$$

Graphiquement, nous représentons l'évolution de la variation des distances moyennes prédites en fonction de chaque aire urbaine. Sur les trois périodes, les distances prédites sont plus faibles avec l'indice de concentration de la population. En moyenne, la variation est de -0,09 et la médiane de -0,08 pour l'ensemble des aires urbaines (écart-type de 0,06). Ainsi, cela montre que la population est plus dispersée que les emplois au sein des aires urbaines à l'exception des petites aires urbaines dont le code d'identification est compris entre 600 et 800. À titre d'exemples, on retrouve Sancerre, Fessenheim et La Gacilly parmi ces petites aires urbaines composées de deux communes. Lorsque la

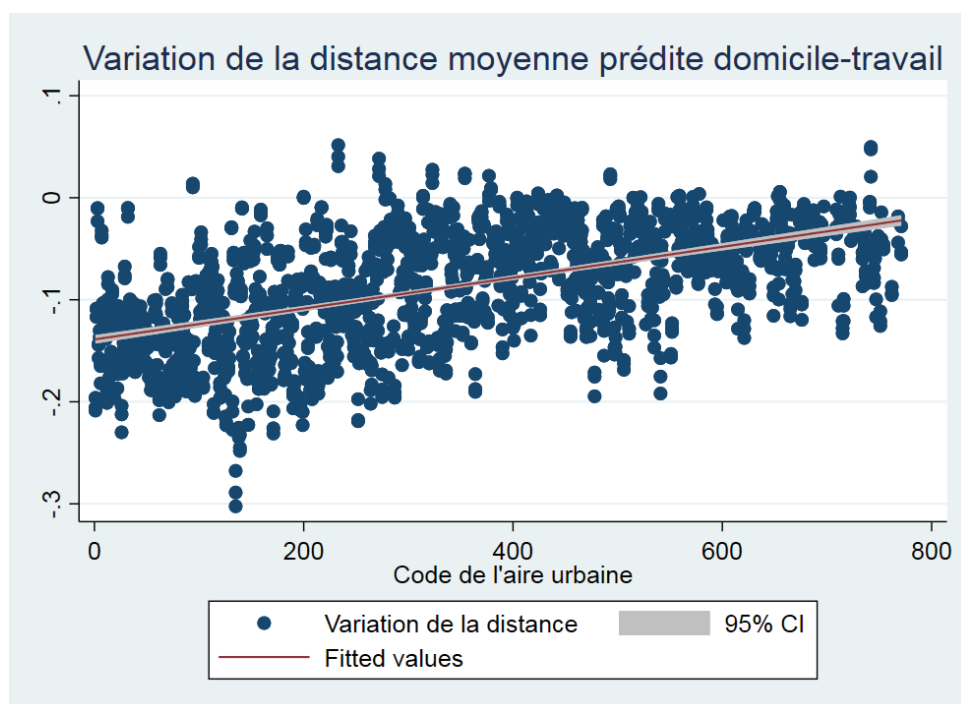


Figure 3.1: Variation des distances moyennes parcourues domicile-travail prédites par aires urbaines sur trois périodes (1999, 2007 et 2014).

population est concentrée, les distances domicile-travail devraient diminuer, ce qui est confirmé dans le cas de nos petites aires urbaines. La concentration des emplois augmente les distances moyennes domicile-travail au sein d'une aire urbaine alors que la dispersion de la population permet de les diminuer. En effet, les principaux pôles urbains en France métropolitaine concentrent en majorité les emplois (voir Annexe B). La population active se localise autour de ces pôles. Par conséquent, utiliser l'indice de concentration de la population de type Herfindahl-Hirschmann induit des distances moyennes domicile-travail prédites plus faibles en moyenne que dans l'estimation principale. Dans un deuxième temps, nous nous focalisons sur la variation des distances domicile-travail prédites lorsque l'indice de dissimilarité au sein des aires urbaines est proche de 0 signifiant une répartition

égalitaire entre le nombre d'emplois et la population de l'aire urbaine. Nous reprenons la même méthode utilisée précédemment et avons l'estimation suivante:

$$\widehat{D}_{it}(ID - Aireurbaine \approx 0) = \epsilon^{\widehat{\beta}_0}(ID - Aireurbaine \approx 0)^{\widehat{\beta}_1} Z_{it}^{\widehat{\gamma}}. \quad (3.10)$$

La comparaison avec les valeurs prédites lorsque l'indice de dissimilarité des aires urbaines varie est calculé de la manière suivante:

$$\Delta D = \frac{\widehat{Distances}_{it}(ID - Aireurbaine \approx 0) - \widehat{Distances}_{it}}{\widehat{Distances}_{it}}. \quad (3.11)$$

Nous étudions la variation entre une situation où l'ensemble des aires urbaines présente un indice de dissimilarité fixé à 0,0005924 proche de 0. Cette valeur correspond à l'indice le plus faible observé dans notre échantillon. Nos résultats se présentent sous la forme d'un graphique présentant la variation des distances moyennes domicile-travail prédites par aires urbaines. Nos résultats indiquent clairement qu'une répartition quasiment égalitaire

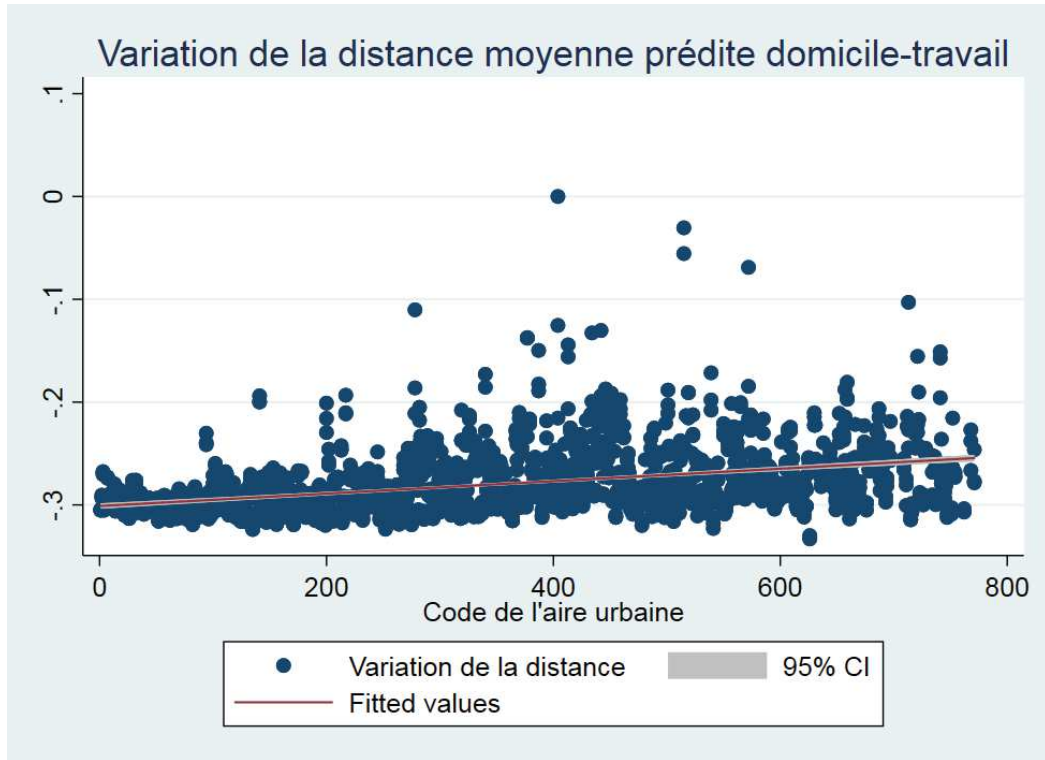


Figure 3.2: Variation des distances moyennes parcourues domicile-travail prédites par aires urbaines sur trois périodes (1999, 2007 et 2014).

des emplois et de la population est bénéfique dans la réduction des distances moyennes parcourues domicile-travail. La variation moyenne des distances prédites est de -0,28 et

la médiane de -0,29. Les données obtenues montrent que les variations des distances prédites sont en moyenne de -0,30 pour les seize premières aires urbaines correspondant aux aires métropolitaines incluant Paris. En conclusion, nous pouvons reconnaître que l'organisation spatiale des emplois et de la population a un impact non négligeable sur les distances domicile-travail. La répartition égalitaire des lieux d'emplois et des lieux résidentiels aurait un impact substantiel dans la réduction des distances domicile-travail. Ces éléments justifieraient la mise en place de politiques de décentralisation des emplois au sein des aires urbaines françaises.

4 Temps de trajet à l'heure de pointe et formes urbaines en 2014

Dans cette section, nous nous intéressons à trois variables clés : le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe, la distance moyenne domicile-travail, ainsi que le temps de trajet en heure de pointe vers la commune centre du pôle urbain le plus près de chaque commune de résidence. Nous commençons par une analyse prenant en compte les aires urbaines françaises métropolitaines de plus de deux communes en 2014. Puis nous nous focalisons sur l'explication de ces trois variables en considérant les communes françaises appartenant aux aires urbaines de la première analyse. L'analyse au niveau des aires urbaines n'apporte pas d'informations exploitables et pertinentes, c'est pourquoi nous nous concentrons surtout sur l'impact des formes urbaines sur nos trois variables d'intérêt par commune de résidence.

4.1 Influence de l'aire urbaine

Les trois premières analyses se focalisent sur l'influence de la distribution spatiale des emplois et des ménages afin d'expliquer les distances et temps de trajet domicile-travail lors des heures de pointe ainsi que le temps de trajet moyen du lieu de résidence des ménages au pôle urbain le plus près en heure de pointe. Chaque variable dépendante est pondérée par les flux totaux de transport (véhicules privés et transports collectifs) par commune et par aire urbaine. Nous disposons de 11 830 communes appartenant aux aires urbaines de plus de deux communes (79% de la population française). Le modèle utilisé pour évaluer les effets des indicateurs de formes urbaines pour les trois régressions se présente sous une spécification log-log :

$$\log y_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \log X_{ik} + \gamma Z_{ik} + \lambda Z'_{ik} + \mu_I + \epsilon_{ik} \quad (3.12)$$

où y_{ik} est soit le temps de trajet moyen (en minutes) domicile-travail en heure de pointe, soit la distance moyenne domicile-travail, soit le temps de trajet moyen domicile-pôle urbain le plus près de la commune de résidence k au sein de chaque aire urbaine i . X_{ik} représente le vecteur de nos indicateurs caractérisant la forme urbaine de l'aire i utilisés précédemment. Le vecteur des variables de contrôle Z_{ik} concerne l'échelle communal (part de femmes actives, part des flux de transport collectif, âge moyen des actifs et distance au pôle urbain de mon aire urbaine). Le vecteur des autres variables de contrôle Z'_{ik} concerne l'échelle de l'aire urbaine (superficie totale de l'aire urbaine, population, nombre de communes, âge moyen des actifs et part des flux de transport collectif). Enfin, I est

le vecteur des variables discrètes de classes d'aire urbaine (aire urbaine de Paris, aires urbaines métropolitaines, grandes aires urbaines et autres aires urbaines). Les petites et moyennes aires urbaines sont prises comme référence dans nos trois analyses subséquentes et ϵ_{ik} sont les termes d'erreur.

Le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe. Dans la première analyse, nous nous intéressons à l'impact des formes urbaines sur le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe observé par commune de résidence: Il est important de retenir que ce temps de trajet est obtenu en prenant en compte les caractéristiques du réseau de transport de chaque commune et donc de chaque aire urbaine: longueur des routes, tronçons et arcs. Le lieu de résidence et le lieu d'emploi sont connus d'après le recensement de la population de 2014. X_{ik} est le vecteur de nos quatre formes urbaines : part des emplois dans la commune centre de l'aire urbaine, concentration des emplois mesuré par l'indice Herfindahl-Hirschmann au sein de l'aire urbaine, indices de dissimilarité emplois-population au sein de la commune centre et de l'ensemble de chaque aire urbaine. Z_{ik} est le vecteur de quatre variables de contrôle observées au niveau de chaque commune de résidence. Nous utilisons la part des femmes actives ayant un emploi et résidant dans la commune k de l'aire urbaine i , la part des flux de transport collectif que nous considérons comme un substitut dans chaque commune k qui dépend de l'offre disponible en 2014, l'âge moyen des actifs habitant dans chaque commune k , la distance kilométrique à la commune centre de l'aire urbaine qui peut héberger la majorité des emplois de l'aire urbaine i et une variable discrète caractérisant la commune centre en tant que lieu de résidence.

Les coefficients γ mesurent l'impact des formes urbaines sur les temps de trajet moyen domicile-travail par commune toutes choses égales par ailleurs, notamment l'appartenance à une classe d'aire urbaine spécifique. Nos résultats sont reportés dans la table 8. En ce qui concerne nos variables explicatives, les résultats obtenus sont cohérents. Le fait d'avoir des lieux de travail concentrés au sein de l'aire urbaine implique des temps de trajet plus longs car les actifs vont se diriger vers le ou les principaux lieux d'emplois créant plus de congestion sur le réseau de transport. Augmenter de 10% la concentration des emplois au sein d'une aire urbaine est associé à un temps de trajet moyen en heure de pointe 0,5% plus longs (colonne 3). L'influence de la part de l'emploi dans la commune centre d'une aire urbaine mène au même résultat. En effet, une augmentation de 10% de la part des emplois situés dans le centre de l'aire urbaine donne un coefficient positif de 0,7% du temps de trajet moyen en heure de pointe par commune (colonne 2). Avoir un nombre plus

important d'emplois par rapport à la population dans cette commune centre amènerait à des temps de trajet moyens domicile-travail en heure de pointe plus longs également. L'impact est néanmoins plus faible car une dissimilarité plus importante de 10% ne donne qu'une élévation du temps de trajet avec une élasticité faible de 0,2% (colonne 4).

L'augmentation de la concentration des emplois au sein d'une aire urbaine implique bien des temps de trajet en heure de pointe plus importants. L'effet est positif mais plus faible concernant une augmentation de la proportion d'emplois par rapport à la population dans la commune centre d'une aire urbaine. La ségrégation des emplois et des populations au niveau de l'aire urbaine ne révèle pas d'effets permettant de diminuer ou d'augmenter de manière significative le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe des habitants de chaque commune. L'absence d'impact peut être expliquée par deux effets contraires. Un problème de non appariement est possible entre le lieu de résidence et le lieu d'emploi de nombreux résidents (c.-à-d. résider près de son emploi) au sein d'une aire urbaine en 2014 qui augmenterait leur temps de trajet moyen (Aguiléra, 2005). Cet effet peut être également contrebalancé par une ségrégation plus forte entre les bassins d'emploi et de vie qui aurait pour conséquence de rapprocher les lieux d'emplois des actifs qui en étaient très éloignés initialement. Les coefficients λ mesurent les effets des variables de contrôle. On retrouve l'impact positif des flux de transport collectif au niveau communal car cela implique un trajet plus long dépendant du réseau et de la qualité du service. Si les flux de transport collectif augmentent de 10% par commune, le coefficient est de 0,3% pour toutes les spécifications (colonnes 1 à 5). Quand on contrôle par la même variable au niveau de l'aire urbaine, on retrouve le même effet positif attendu ; une augmentation des flux de 10% est liée à un temps de trajet domicile-travail plus long de 0,2%. Mais quand on introduit la variable discrète indiquant si l'on se situe dans une commune centre d'une aire urbaine ou non, l'effet n'est plus significatif dans le cas des spécifications (2) et (3) avec les indicateurs de concentration des lieux d'emplois au sein de la commune centre et de l'aire urbaine. Au niveau communal, les transports collectifs sont des substituts des autres modes de transport et induisent une augmentation du temps de trajet domicile-travail alors qu'au niveau agrégé, les modes sont complémentaires. Une augmentation des flux de transport collectif n'induit pas d'augmentation des temps de trajet domicile-travail. Le fait de concentrer les emplois dans la commune centre de l'aire urbaine révèle une meilleure accessibilité aux pôles urbains par un meilleur réseau de transport (CGDD, 2010). Toutes choses égales par ailleurs, nous montrons que plus un actif réside loin de la commune centre de l'aire urbaine, plus le temps de trajet domicile-travail est long. En effet, pour l'ensemble des spécifications, une augmentation de 10% de la distance kilométrique au centre est associée à un allongement du temps de trajet moyen domicile-travail de 1,8%.

Table 3.7: Impact des formes urbaines sur le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe (pondéré par tous les flux de transport) : Estimations MCO.

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Log (Temps de trajet domicile-travail)					
Variables de contrôle communales					
Log (part des femmes actives)	-0.08*** (0.04)	-0.09*** (0.04)	-0.09*** (0.04)	-0.08*** (0.04)	-0.08*** (0.04)
Log (âge moyen des actifs)	0.62*** (0.06)	0.61*** (0.06)	0.60*** (0.06)	0.62*** (0.06)	0.63*** (0.06)
Log (part des flux de transports collectifs)	0.03** (0.004)	0.03*** (0.004)	0.03*** (0.004)	0.03** (0.004)	0.03** (0.004)
Log (distance kilométrique au centre)	0.18*** (0.01)	0.18*** (0.005)	0.18*** (0.005)	0.18*** (0.005)	0.18*** (0.005)
Commune Centre	0.80*** (0.04)	0.80*** (0.04)	0.80*** (0.04)	0.81*** (0.04)	0.80*** (0.04)
Variables de contrôle aire urbaine					
Log (superficie)	0.01* (0.01)	-0.004 (0.01)	-0.003 (0.01)	0.01 (0.01)	0.01* (0.01)
Log (population)	0.05*** (0.01)	0.07*** (0.01)	0.07*** (0.01)	0.06*** (0.01)	0.05*** (0.01)
Log (nombre de communes)	-0.06*** (0.01)	-0.06*** (0.01)	-0.06*** (0.01)	-0.07*** (0.01)	-0.06*** (0.01)
Log (âge moyen des actifs)	-0.27 (0.26)	-0.27 (0.26)	-0.26 (0.26)	-0.18 (0.26)	-0.29 (0.26)
Log (part des flux de transports collectifs)	0.02** (0.01)	0.01 (0.01)	0.01 (0.01)	0.02*** (0.01)	0.02* (0.01)
Autres aires urbaines	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Grandes aires urbaines	0.03*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.03*** (0.01)	0.03*** (0.01)
Aires urbaines métropolitaines	0.03** (0.02)	0.04** (0.02)	0.04** (0.02)	0.03** (0.02)	0.03* (0.02)
Aire urbaine de Paris	-0.06** (0.03)	-0.07** (0.03)	-0.06** (0.03)	-0.07** (0.03)	-0.06** (0.03)
Log (PEC)		0.07*** (0.01)			
Log (Indice HH)			0.05*** (0.007)		
Log (ID - centre)				0.02*** (0.005)	
Log (ID - aires urbaines)					-0.02 (0.01)
Observations	11 830	11 830	11 830	11 830	11 830
Adj. R^2	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43

Notes : les écart-types sont clusterisés au niveau des communes (11 830 clusters) et reportés entre parenthèses ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

Les caractéristiques socio-économiques ont également un rôle non négligeable. Dans la table 8, nous pouvons remarquer que plus les actifs sont âgés, plus ils résident loin de leur lieu d'emploi. Une augmentation de l'âge moyen des actifs au niveau communal de 1% est associé à une augmentation du temps de trajet moyen de 0,60% (colonne 2) à 0,63% (colonne 4). Le statut marital et la composition d'un ménage évolue avec le temps avec le besoin de choisir un logement plus grand quand la famille s'agrandit. Le patrimoine

s'accumule progressivement avec le temps. Les moyens financiers sont plus importants et permettent d'acheter ou de louer un bien de grande taille et plus éloigné du centre de l'aire urbaine même si les coûts de transport s'accroissent (Gautier *et al.*, 2010). En outre, les femmes actives se localisent plus près de leur lieu d'emploi que les hommes. Une augmentation de 10% de la part de femmes actives résidant dans une commune est associée à une diminution de -0,8% (colonne 1) à -0,9% (colonne 3) du temps de trajet moyen domicile-travail.

Au niveau des structures spatiales des aires urbaines, les estimations montrent que plus la superficie et la population augmente, plus le temps de trajet est rallongé. L'aire urbaine est plus étendue et une augmentation de la densité implique un plus grand nombre de personnes empruntant les réseaux de transport. L'augmentation du nombre de communes dans une aire urbaine induit contre-intuitivement une diminution des temps de trajet moyens domicile-travail. Une explication possible est qu'une commune implique des emplois publics et privés présents. À titre d'exemples, on retrouve notamment les services publics non délocalisables liés au système éducatif et la création de zones résidentielles. Autant l'étalement urbain induit logiquement une augmentation des distances et des temps de trajet domicile-travail en heure de pointe, autant une augmentation du nombre de communes n'implique pas que la seule extension de superficie. Par ailleurs, il est possible aussi que l'effet soit capté par la population et/ou la superficie. Le type de commune et l'aire urbaine dans lesquelles les ménages résident ont un rôle significatif. Résider au sein de grandes aires urbaines et d'aires métropolitaines est synonyme d'un temps de trajet plus élevé.

Distance moyenne domicile-travail. Dans la seconde analyse, nous nous focalisons sur l'explication des distances moyennes parcourues domicile-travail par commune. Ces distances sont pondérées par tous les flux de transport au niveau communal. Les caractéristiques du réseau de transport sont prises en compte dans le calcul de ces distances. L'objectif est de retrouver les mêmes influences de nos mesures de formes urbaines observées sur trois périodes dans la section 3. Nos indicateurs de forme urbaine ont le même

Table 3.8: Impact des formes urbaines sur la distance moyenne domicile-travail : Estimations MCO.

Variable dépendante Log(Distance domicile-travail)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Variabiles de contrôle communales					
Log (part des femmes actives)	-0.05 (0.05)	-0.05 (0.05)	-0.05 (0.05)	-0.05 (0.05)	-0.05 (0.05)
Log (âge moyen des actifs)	0.51*** (0.08)	0.49*** (0.08)	0.49*** (0.08)	0.52*** (0.08)	0.53*** (0.08)
Log (part des flux de transports collectifs)	0.03*** (0.01)	0.03*** (0.01)	0.03*** (0.01)	0.03*** (0.01)	0.03*** (0.01)
Log (distance kilométrique au centre)	0.30*** (0.00)	0.30*** (0.00)	0.30*** (0.00)	0.30*** (0.00)	0.30*** (0.00)
Commune Centre	1.59*** (0.04)	1.59*** (0.04)	1.59*** (0.04)	1.63*** (0.04)	1.62*** (0.04)
Variabiles de contrôle aires urbaines					
Superficie	-0.04*** (0.01)	-0.05*** (0.01)	-0.06*** (0.01)	-0.04*** (0.01)	-0.03*** (0.01)
Population	-0.05*** (0.01)	-0.02** (0.01)	-0.02** (0.01)	-0.02** (0.01)	-0.04*** (0.01)
Log (nombre de communes)	-0.03*** (0.01)	-0.02** (0.01)	-0.02** (0.01)	-0.05*** (0.01)	-0.05*** (0.01)
Log (âge moyen des actifs)	-0.02 (0.31)	-0.01 (0.31)	-0.00 (0.31)	0.31 (0.32)	0.03 (0.31)
Log (part des flux de transports collectifs)	0.04*** (0.01)	0.03*** (0.01)	0.03*** (0.01)	0.05*** (0.01)	0.05*** (0.01)
Autres aires urbaines	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Grandes aires urbaines	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)	0.04*** (0.01)
Aires urbaines métropolitaines	0.06*** (0.02)	0.07*** (0.02)	0.06*** (0.02)	0.07*** (0.02)	0.07*** (0.02)
Aire urbaine de Paris	0.13*** (0.03)	0.12*** (0.03)	0.12*** (0.03)	0.09*** (0.03)	0.13*** (0.03)
Log (PEC)		0.07*** (0.01)			
Log (Indice HH)			0.04*** (0.01)		
Log (ID - centre)				0.05*** (0.01)	
Log (ID - aires urbaines)					0.06*** (0.01)
Observations	11 830	11 830	11 830	11 830	11 830
Adj. R^2	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écart-types sont clusterisés au niveau des communes (11 830 clusters) et reportés entre parenthèses ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH: concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. Source : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

impact qualitatif que dans l'analyse de 1999 à 2014. Une augmentation de la concentration des emplois et une plus forte ségrégation entre les lieux résidentiels et les lieux d'emploi

sont associées à une augmentation de la distance moyenne parcourue domicile-travail dans chaque commune. Une augmentation de 10% de la part des emplois dans la commune centre de l'aire urbaine est associé à une augmentation des distances domicile-travail de 0,7% (colonne 2). Une augmentation de la concentration des emplois de 10% dans chaque aire urbaine donne un coefficient à une augmentation de 0,5% des distances moyennes domicile-travail (colonne 3). On observe le même ordre de grandeur des effets marginaux lorsque la dissimilarité augmente entre les zones d'emplois et résidentielle. Quant on s'intéresse aux caractéristiques socio-économiques, on retrouve l'effet cycle de vie significatif, c'est-à-dire que plus l'âge moyen des actifs augmente, plus les distances domicile-travail augmentent. Dans cette table, on peut voir qu'une augmentation de 1% de l'âge moyen des actifs est associé à une élévation de 0,49% à 0,53% des distances domicile-travail.

Les variables de contrôle au niveau communal donne les mêmes résultats que dans la régression précédente concernant la distance kilométrique à la commune centre du pôle urbain. La distance moyenne domicile-travail augmente avec l'âge moyen des actifs dans une commune. La part des transports collectifs dans les flux accroît les distances moyennes domicile-travail (colonne 1 à 5). L'effet marginal du nombre de communes est négatif sur les distances moyennes domicile-travail: augmenter le nombre de communes implique également la création de zones d'activités économiques et donc une relocalisation d'emplois. De plus, cela capture également que le réseau routier est également présent dans une nouvelle commune permettant une accessibilité aux différent lieux pré-cités. On peut noter que vivre dans une commune centre augmente les distances domicile-travail de 1,6 kilomètre.

Au niveau de l'aire urbaine, un des éléments contre-intuitif est que l'effet d'une augmentation de 10% de la superficie est associé à une diminution des distances domicile-travail de -0,3% (colonne 5) à -0,6% (colonne 3). Nous constatons bien que la densification de l'aire urbaine par l'intermédiaire d'une augmentation de la population diminue également la distance parcourue (colonne 1 à 5). Pour une augmentation de 10% de la population, l'effet varie de -0,2% (colonne 4) à -0,5% (colonne 1) toutes choses égales par ailleurs. Enfin, la classe d'aire urbaine impacte toujours la variable d'intérêt. Résider dans une grande aire urbaine est lié à une augmentation de 0,04 kilomètre des distances moyennes domicile-travail, comparé à un accroissement de 0,06 (colonne 1) à 0,07 (colonne 5) kilomètre pour une commune située dans une aire urbaine métropolitaine. À Paris, l'augmentation des distances moyennes domicile-travail est de 0,10 (colonne 4) à 0,13 kilomètre (colonne 5). Résider dans l'aire urbaine de Paris implique un coefficient positif sur les distances moyennes domicile-travail trois fois plus important que dans les grandes aires urbaines.

Le temps de trajet moyen au pôle urbain le plus près d'une commune de résidence en heure de pointe. Dans la troisième analyse, nous mesurons l'impact de nos formes urbaines sur les temps de trajet moyen en heure de pointe entre les localisations résidentielles et les communes centres des pôles urbains les plus près. Nous cherchons à trouver les déterminants de la congestion urbaine dans l'accès aux centres-villes pour tous motifs de déplacement. Le temps de trajet moyen au pôle urbain le plus près de chaque commune de résidence est pondéré par tous les flux de transport au niveau communal. Nos indicateurs de formes urbaines nous donnent des résultats opposés. D'une part, nous remarquons qu'une augmentation de 10% de la part des emplois dans une commune centre est associée à un allongement du temps de trajet de 0,2%. Le fait de concentrer spécifiquement les emplois dans la commune centre ne peut que rediriger des trajets vers ces lieux et par conséquent entraîner une augmentation des flux de véhicules induisant des temps de trajet plus longs. D'autre part, nos indices de dissimilarité donnent un effet contraire. Le fait d'avoir une proportion plus importante de population ou d'emplois dans la commune centre implique donc au moins une baisse d'un motif de déplacement étant donné que nous nous intéressons à tous les flux de déplacement entre chaque commune et la commune centre de l'aire urbaine. Par conséquent, cela peut expliquer qu'une augmentation de 1% de la dissimilarité est associée à une diminution de -0,03% du temps de trajet moyen en heure de pointe. L'effet est donc d'autant plus fort au niveau de l'aire urbaine car la dissimilarité va entraîner une nouvelle répartition des flux liée aux nouvelles localisations des emplois et de la population.

En ce qui concerne les variables de contrôle communal, on retrouve un effet important d'une des variables socio-économiques. Les femmes actives résideraient plus près des communes centres. Une augmentation de 10% de la part des femmes actives est associée à une diminution de -0,1% des temps de trajet moyens en heure de pointe mais les coefficients ne sont pas significatifs. Par contre, nous retrouvons l'effet du cycle de vie attendu. Une augmentation de 10% de l'âge moyen des actifs donne un coefficient positif de 3,4% (colonne 5) à 3,7% (colonne 1). Être localisé loin de la commune centre entraîne également des temps de trajet moyens plus longs. Une augmentation de 10% de la distance kilométrique à la commune centre du pôle le plus près d'une commune de résidence est associée à une augmentation de 6,4% (colonnes 1 à 5) des temps de trajet moyens. Une part plus importante de flux de transport en commun au niveau communal implique des temps de trajet plus long à l'exception du cas où la dissimilarité au sein de la commune centre est

Table 3.9: Impact des formes urbaines sur les temps de trajet moyens domicile-pôle urbain.

Variable dépendante Log(Temps de trajet pôle urbain)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Variables de contrôle communales					
Log (part des femmes actives)	-0.01 (0.02)	-0.01 (0.02)	-0.01 (0.02)	-0.09 (0.02)	-0.01 (0.02)
Log (âge moyen des actifs)	0.37*** (0.04)	0.37*** (0.04)	0.37*** (0.04)	0.37*** (0.04)	0.34*** (0.04)
Log (part des flux de transports collectifs)	0.07*** (0.00)	0.03*** (0.00)	0.03*** (0.00)	0.03*** (0.00)	0.03*** (0.00)
Log (distance kilométrique au centre)	0.64*** (0.00)	0.64*** (0.00)	0.64*** (0.00)	0.64*** (0.00)	0.64*** (0.00)
Variables de contrôle aire urbaine					
Log (superficie)	0.07*** (0.01)	0.06*** (0.01)	0.06*** (0.01)	0.07*** (0.01)	0.06*** (0.01)
Log (population)	0.09*** (0.01)	0.10*** (0.01)	0.09*** (0.01)	0.07*** (0.01)	0.07*** (0.01)
Log (nombre de communes)	-0.10*** (0.01)	-0.09*** (0.01)	-0.09*** (0.01)	-0.08*** (0.01)	-0.05*** (0.01)
Log (âge moyen des actifs)	1.08*** (0.18)	1.08*** (0.19)	1.08*** (0.19)	0.90*** (0.18)	0.90*** (0.18)
Log (part des flux de transports collectifs)	-0.01 (0.01)	-0.01** (0.01)	-0.01** (0.01)	-0.01** (0.01)	-0.03*** (0.01)
Autres aires urbaines	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Grandes aires urbaines	0.14*** (0.01)	0.15*** (0.01)	0.15*** (0.01)	0.14*** (0.01)	0.14*** (0.01)
Aires urbaines métropolitaines	0.16*** (0.01)	0.16*** (0.01)	0.16*** (0.01)	0.16*** (0.01)	0.15*** (0.01)
Aire urbaine de Paris	0.08*** (0.02)	0.08*** (0.02)	0.08*** (0.02)	0.11*** (0.02)	0.11*** (0.02)
Log (PEC)		0.02*** (0.01)			
Log (Indice HH)			0.02*** (0.00)		
Log (ID - centre)				-0.03*** (0.01)	
Log (ID - aires urbaines)					-0.13*** (0.04)
Observations	11 207	11 207	11 207	11 207	11 207
Adj. R^2	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écart-types sont clusterisés au niveau des communes (11 207 clusters) et reportés entre parenthèses ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. Source : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

introduite.

Au niveau de l'aire urbaine, l'effet d'une augmentation de la part des transports collectifs est également faible. Une part plus importante des flux de transport collectif de 10% est associé à une diminution de 0,1% du temps de trajet moyen au pôle urbain le plus près de la commune de résidence. Il n'y a pas d'effet significatif du coefficient lorsque les indicateurs de forme urbaine ne sont pas introduits. Ce résultat reflèterait une meilleure accessibilité en transport en commun pour les trajets vers les communes centres. Augmenter la superficie de l'aire urbaine donne un coefficient positif pour l'allongement des temps de trajet vers les communes centres. Et une augmentation de la population dans

chaque aire urbaine est associé à une diminution des temps de trajet moyens vers les communes centres toutes choses étant égales par ailleurs. Une augmentation du nombre de communes de 10% est liée à une diminution du temps de trajet moyen vers le pôle urbain de -0,50% (colonne 5) à -1,0% (colonne 1). L'effet peut être capté par la population et/ou la superficie. Nous retrouvons l'effet du cycle de vie qui est associé à un coefficient fort avec le contrôle par l'âge moyen des actifs au niveau de l'aire urbaine. En effet, une augmentation de 10% est associée à un accroissement de 9,0% (colonne 5) à 10,8% (colonne 1) du temps de trajet moyen vers le pôle urbain le plus près de la commune de résidence.

Enfin, les classes d'aire urbaine jouent toujours un rôle important. Résider dans une grande aire urbaine augmenterait de 1,5% le temps de trajet moyen en heure de pointe vers le pôle urbain. Résider dans une aire métropolitaine augmenterait de 1,6% (colonne 1) ce temps de trajet moyen, quasiment autant que dans une grande aire. Enfin, vivre dans l'aire urbaine de Paris augmente ce temps de trajet moyen de 0,8% (colonne 1) à 1,1% (colonne 4) par rapport à un résident d'une autre aire urbaine, un effet légèrement plus faible par rapport à une grande aire urbaine.

4.2 Niveau communal

Dans cette partie, nous testons deux nouveaux indicateurs de distribution spatiale des emplois pour expliquer les temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe, distance moyenne domicile-travail ainsi que le temps de trajet moyen entre le lieu de résidence et le pôle urbain le plus près du domicile.

La mesure des indicateurs de distribution spatiale des emplois au niveau communal. Le premier indicateur est le ratio emploi/population pour chaque commune appartenant à une aire urbaine de plus de deux communes.

$$RatioEmploi_{ik} = \frac{Emploi_{ik}}{Population_{active}_{ik}} \quad (3.13)$$

où k correspond à la commune et i à l'aire urbaine dans laquelle la commune se situe. $Emploi_{ik}$ est le nombre d'emplois total dans une commune k d'une aire urbaine i en 2014 et $Population_{ik}$ est la population totale de la commune k . Nous nous attendons à ce que l'impact de cette variable soit négatif et significatif. Une augmentation de ce ratio devrait diminuer les distances et temps de trajet domicile-travail. Le deuxième indicateur représente le poids d'une commune comme zone d'activité économique au sein de l'aire urbaine.

$$PartEmploi_{ik} = \frac{Emploi_{ik}}{Emploi_i} \quad (3.14)$$

où $Emploi_i$ est le nombre d'emplois total au sein de l'aire urbaine i . La présence de pôle d'affaires secondaires permet de réduire les distances moyennes domicile-travail au sein d'une aire urbaine sachant qu'au moins 40% des habitants de chaque commune travaillent au sein de chaque aire. On s'attend également à un impact négatif sur les distances et temps de trajet moyens domicile-travail. Le modèle utilisé pour expliquer l'impact de ces deux variables est de la forme suivante:

$$\log y_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \log X_{ik} + \gamma Z_{ik} + \mu i + \epsilon_{ik} \quad (3.15)$$

où y_{ik} est soit le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe, soit la distance moyenne domicile-travail, soit le temps de trajet moyen entre la commune de résidence et la commune centre du pôle urbain le plus près en heure de pointe. Les deux premières variables d'intérêt sont pondérées par tous les flux de transport de la commune k dans chaque aire urbaine i . La troisième variable d'intérêt est uniquement pondérée par les flux de transport de véhicules privés et par les flux de transport collectif. Ainsi, nous reprenons les mêmes variables que dans l'analyse précédente. C'est l'impact des formes

communales X_{ik} qui présente un intérêt. Nous avons une spécification log-log pour que β_1 soit une élasticité. Nous contrôlons par des variables communales uniquement (part des femmes actives, âge moyen des actifs, part des flux de transport collectif, distance kilométrique au centre). Nous avons rajouté une variable croisée entre la part des flux de transport collectif et la distance au centre de l'aire urbaine pour chaque commune k . Nous prenons en compte le fait que plus on réside loin de la commune, moins les actifs ont accès à un réseau de transport collectif dense. Pour intégrer l'hétérogénéité inobservée entre les aires urbaines, nous rajoutons un effet fixe μ_i avec l'aire urbaine de Paris comme référence. Enfin, ϵ_{ik} est le vecteur des termes d'erreur.

Table 3.10: Impact des formes urbaines sur les temps de trajet moyens domicile-travail (pondérés par tous les flux de transport) : Estimations MCO.

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)
Log (Temps de trajet domicile-travail)			
Log (part des femmes actives)	-0.13*** (0.04)	-0.10*** (0.04)	-0.01 (0.04)
Log (âge moyen des actifs)	0.37*** (0.06)	0.30*** (0.06)	0.18*** (0.06)
Log (part des flux de transports collectifs)	-0.002 (0.01)	0.01 (0.01)	0.02*** (0.01)
Log(distance au centre)xLog(part des flux de transports collectifs)	0.01*** (0.00)	0.01*** (0.00)	0.002 (0.00)
Log (distance kilométrique au centre)	0.06*** (0.00)	0.03*** (0.00)	0.03*** (0.00)
Ratio emploi/population active		-0.12*** (0.00)	
Part de l'emploi communal dans l'aire urbaine			-0.06*** (0.00)
Observations	11 830	11 795	11 795
Adj. R^2	0.53	0.58	0.58
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écart-types sont clusterisés au niveau des communes (11 830 clusters) et reportés entre parenthèses ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

Temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe. Nos variables explicatives sont associées à une diminution du temps de trajet moyen domicile-travail corroborant les résultats de la section 3 et sous-section 4.1. Si de nouvelles zones d'activités économique émergent avec des créations d'emplois à la clé dans une commune k , certains

ménages seraient plus près de leur lieu d'emploi. L'augmentation de 10% du ratio emploi/population active dans une commune k est associé à une diminution de 1,2% du temps de trajet moyen domicile-travail. Le même effet est retrouvé avec le deuxième indicateur. Une augmentation de 10% de la part de l'emploi dans une commune rapportée au nombre d'emploi total de l'aire urbaine est associé à une baisse de 0,6% du temps de trajet moyen vers les lieux d'emplois.

Concernant nos variables de contrôle, nous retrouvons certaines tendances observées dans nos analyses précédentes concernant les caractéristiques socio-économiques et spatiales notamment. Une augmentation de 10% de la part des femmes actives dans une commune est lié à une diminution de 1,0% (colonne 2) à 1,3% (colonne 1) du temps de trajet moyen. En outre, l'âge moyen des actifs est associé à une augmentation des temps de trajet lié certainement à une distance domicile-travail plus grande lorsque la génération des actifs vieillit. Plus on réside loin de la commune centre de l'aire urbaine, plus le temps de trajet moyen domicile-travail est élevé (colonnes 1, 2 et 3). Les variables de contrôle concernant les flux de transport collectif donnent un résultat ambigu. Une augmentation des flux de 10% est associée à une augmentation de 0,2% du temps de trajet moyen domicile-travail avec l'introduction de la part de l'emploi communal. Il n'y a pas d'effet significatif pour les deux autres spécifications (colonnes 1 et 2). La variable croisée entre la distance au centre du pôle urbain et les flux de transport collectif donne une augmentation des temps de trajet domicile-travail lorsque l'on réside loin des communes centres. Si une commune de résidence héberge peu de zones d'activités économiques, une augmentation des flux de transport collectif devrait mener à un accroissement du temps de trajet moyen domicile-travail.

Distance moyenne domicile-travail. Dans la seconde analyse, nous nous intéressons aux effets de nos indicateurs de forme urbaine sur les distances moyennes domicile-travail. Une augmentation du poids de l'emploi dans une commune donnée implique une distance moyenne domicile-travail plus faible. De même, une augmentation de 10% du ratio emploi sur population active est liée à une diminution de 1,1% des distances moyennes parcourues. On retrouve la même influence concernant nos variables socio-économiques. La part des femmes actives est associée à une baisse des distances moyennes domicile-travail. Une augmentation de l'âge moyen des actifs de 10% est liée à une augmentation de 1,5% (colonne 2) à 2,0% des distances domicile-travail à l'exception de la troisième colonne lorsque la part de l'emploi communal au sein de l'aire urbaine est introduite. Résider loin de la commune centre implique une distance moyenne parcourue domicile-travail plus élevée (colonnes 1 et 2). Une augmentation du flux de transport collectif dans une commune de

Table 3.11: Impact des formes urbaines sur les distances moyennes domicile-travail : Estimations MCO.

Variable dépendante Log (Distances domicile-travail)	(1)	(2)	(3)
Log (part des femmes actives)	-0.31*** (0.05)	-0.29*** (0.05)	-0.16*** (0.05)
Log (âge moyen des actifs)	0.20** (0.08)	0.15* (0.08)	-0.04 (0.08)
Log(part des flux de transport collectif)	-0.016** (0.008)	-0.007 (0.008)	0.02** (0.007)
Log(distance au centre)xLog(part des flux de transports collectifs)	0.004* (0.002)	0.005** (0.002)	-0.001 (0.002)
Log (distance kilométrique au centre)	0.07*** (0.005)	0.04*** (0.005)	0.02*** (0.005)
Ratio emploi/population active		-0.11*** (0.005)	
Part de l'emploi communal dans l'aire urbaine			-0.08*** (0.002)
Observations	11 830	11 795	11 795
Adj. R^2	0.23	0.28	0.31
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écarts-types sont clusterisés au niveau des communes (11 830 et 11 795 clusters) et reportés entre parenthèses ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

résidence est associée à une diminution de la distance domicile-travail mais plus faible de moitié quand on contrôle par la variable croisée entre la distance au centre et la part des flux de transport collectif. Les résultats sont ambigus. Soit une commune de résidence est très près du centre et des lieux d'emplois, ce qui est associé à une diminution du temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe lorsque les flux de transport collectif sont plus importants, soit elle en très éloignée et l'effet en est atténué de 0,05%.

Temps de trajet moyen au pôle urbain le plus près de la commune de résidence en heure de pointe. Pour la troisième et dernière analyse, nous nous focalisons sur les impacts de nos formes communales sur le temps de trajet moyen entre le lieu de résidence et la commune centre du pôle urbain le plus proche. L'effet négatif de nos deux variables explicatives s'explique notamment par le fait que la majorité des emplois d'une aire urbaine (à l'exception de Paris) est souvent localisée dans la commune centre (Annexe B). Par conséquent, une augmentation de 10% du poids de l'emploi communal par rapport à

Table 3.12: Impact des formes urbaines sur les temps de trajet moyens domicile-pôle urbain le plus près : Estimations MCO.

Variable dépendante	(1)	(2)	(3)
Log (Temps de trajet au pôle urbain)			
Log (part des femmes actives)	-0.43*** (0.03)	-0.42*** (0.03)	-0.32*** (0.03)
Log (âge moyen des actifs)	-0.26*** (0.06)	-0.31*** (0.06)	-0.48*** (0.05)
Log (part des flux de transports collectifs)	-0.20*** (0.01)	-0.19*** (0.01)	-0.16*** (0.01)
Log(distance au centre)xLog(part des flux de transports collectifs)	0.05*** (0.005)	0.05*** (0.005)	0.04*** (0.004)
Log (distance kilométrique au pôle urbain)	0.06*** (0.007)	0.05*** (0.007)	0.03*** (0.006)
Ratio emploi/population active		-0.06*** (0.004)	
Part de l'emploi communal dans l'aire urbaine			-0.06*** (0.002)
Observations	11 578	11 543	11 543
R^2	0.82	0.82	0.83
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écarts-types sont clusterisés au niveau des communes (11 578 clusters) et reportés entre parenthèses ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

l'aire urbaine et du ratio emploi/population active dans une commune "dortoir" est respectivement associée à une diminution de 0,6% du temps de trajet moyen domicile-pôle urbain.

Concernant nos variables de contrôle socio-économiques et spatiales. Sans surprise, plus la distance au centre du pôle urbain augmente de 10%, plus le temps de trajet moyen est associé à une hausse de 0,3% (colonne 3) à 0,6% (colonne 1). Ensuite, si on augmente de 10% la part de femmes actives dans une commune, le temps de trajet moyen diminue (colonnes 1 à 3), ce qui sous-entend que les femmes seraient localisées plus près de la commune centre du pôle urbain. On retrouve encore l'effet du cycle de vie bien connu de nos résultats précédents. Puis, en ce qui concerne la part du transport collectif, on remarque qu'une augmentation de 10% de la part des flux de transport collectif est associée à une baisse de -1,6% (colonne 3) à -2,0% (colonne 1) du temps de trajet moyen domicile-pôle urbain. Ceci implique une bonne desserte de la commune centre par le réseau de transport collectif. Cependant, l'effet est amoindri quand on vit encore plus loin de la commune

centre (colonnes 1 à 3).

Résultats. En conclusion, nous pouvons observer un effet faible de nos variables explicatives sur nos variables d'intérêts. Les élasticités varient de 0,02 à 0,07 pour la part des emplois dans les communes centres, de 0,02 à 0,05 pour l'indice HH, de -0,03 à 0,05 pour l'indice de dissimilarité emplois-population dans les communes centres et de -0,13 à 0,06 pour l'indice de dissimilarité au sein des aires urbaines. Une concentration des emplois au sein d'une aire urbaine est bien associée à des distances et temps de trajet moyen domicile-travail plus élevés. Par conséquent, l'inclusion de nos formes urbaines par commune (ratio emploi/population active et part des emplois communaux) est bien associée à une diminution de ces distances et temps de trajet domicile-travail par l'effet de rapprochement des emplois et des ménages.

Parmi les variables socio-économiques, nous retrouvons l'effet du cycle de vie dans l'ensemble de nos résultats pour l'année 2014. Plus les actifs sont âgés, plus ils sont susceptibles de vivre loin des communes centres des aires urbaines comme le montre également Gautier *et al.*, (2010) au Danemark. L'effet du cycle de vie capte le fait d'accumuler du patrimoine au fil des ans et d'être en couple marié ou non, avec ou sans enfants, avec une demande d'espace disponible plus forte en périphérie des communes centres (Buisson et Lincot, 2016 ; Gautier *et al.*, 2010). Par conséquent, cela induit que les distances et temps de trajet moyens domicile-travail s'allongent toutes choses égales par ailleurs. Cependant, les emplois se délocalisent plus rapidement que les populations (Segal et Steinmeier, 1980). De manière statique, augmenter la proportion de femmes actives dans une aire urbaine permet de diminuer les distances et les temps de trajet domicile-travail, un résultat observé également aux Etats-Unis par l'étude de Gordon *et al.*, (1989) et par Schwanen *et al.*, (2004b) qui ont analysé les impacts des politiques d'aménagement aux Pays-Bas mises en place au début des années 2000. Enfin, nous observons bien qu'une diminution de la densité population dans les villes centres entraîne de facto un étalement urbain et un allongement des distances pour les navetteurs (voir Borck, 2016 ; Bertaud et Brueckner, 2005).

Analyse contrefactuelle simple de l'évolution des temps de trajet et des distances domicile-travail. Enfin, nous estimons les temps de trajet moyens domicile-travail de toutes les communes de notre échantillon pour la régression qui inclue le ratio emploi/population active:

$$\log T_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \log \text{RatioEmploi}_{ik} + \gamma \log Z_{ik} + \mu I + \epsilon_{ik}. \quad (3.16)$$

Nous obtenons les temps de trajet moyen domicile-travail prédit suivants:

$$\widehat{T}_{ik} = e^{\widehat{\beta}_0} \text{RatioEmploi}_{ik}^{\widehat{\beta}_1} Z_{ik}^{\widehat{\gamma}} \quad (3.17)$$

Puis, nous considérons un cas de proportion parfaite entre le nombre d'emplois et le nombre d'actifs par communes. Nous fixons donc le ratio emploi/population active à 1 pour chaque commune. Nous reprenons les coefficients de la régression afin d'en déduire une nouvelle équation du temps de trajet moyen domicile-travail dans ce cas:

$$\widehat{T}_{ik}(\text{RatioEmploi}_{ik} = 1) = e^{\widehat{\beta}_0} Z_{ik}^{\widehat{\gamma}} \quad (3.18)$$

menant à la comparaison entre les valeurs prédites quand la proportion est parfaite entre le nombre d'emplois et le nombre d'actifs avec les valeurs prédites dans le cas de ratios variables et nous analysons nos résultats.

$$\Delta T = \frac{\widehat{T}_{ik}(\text{RatioEmploi}_{ik} = 1) - \widehat{T}_{ik}}{\widehat{T}_{ik}} \quad (3.19)$$

Nous analysons graphiquement nos résultats ensuite. Le premier graphique représente la variation entre la valeur prédite du temps de trajet moyen domicile-travail lorsque le ratio emploi/population active est constant (c.-à-d., égal à 1) et la valeur prédite avec les valeurs observées variables en fonction de la distance au centre de l'aire urbaine.

Nous pouvons remarquer des variations plus faibles ou plus élevées pour l'ensemble des communes. Les variations inférieures à 0 impliquent une prédiction d'un temps de trajet moyen domicile-travail plus faible dans le cas d'un ratio emploi/population active égal à 1 par rapport aux valeurs réellement observées et inversement. Cela montre qu'il est avantageux pour certaines communes d'avoir une proportion égale d'emplois et d'actifs sur leur territoire contrairement à d'autres. Cela sous-entend des problèmes d'appariement entre lieux de résidence et lieux d'emplois pour certaines communes même avec un ratio emploi/population active égal à 1. La moyenne et la médiane des variations pour l'ensemble des communes sont égales à -0,10 et -0,11. Nous pouvons observer sur la figure ci-dessus

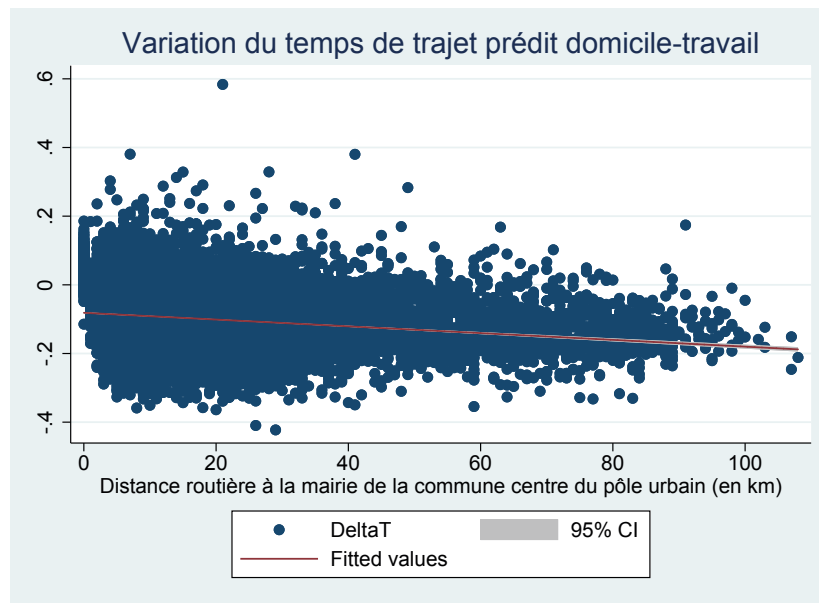


Figure 3.3: Variation du temps de trajet moyen prédit domicile-travail par commune centre en fonction du rang de chaque aire urbaine.

que plus la distance à la commune centre est importante, plus la variation du temps de trajet prédit est négative. Plus on est éloigné du centre, plus il est bénéfique d'avoir une proportion équilibrée d'emplois et d'actifs au sein d'une commune.

Ensuite, nous nous focalisons sur l'évolution de la variation du temps de trajet prédit en fonction des classes d'aire urbaine où se situe chacune des communes. Chaque aire est rangé par ordre décroissant de leur taille de population et d'emplois. Concernant les autres aires urbaines, on peut voir une variation à la baisse au fur et à mesure que la distance d'une commune au centre du pôle urbain de son aire urbaine augmente. La distance kilométrique médiane est de 9 et la plus importante est de 41. La variation moyenne est de -11,0% et la médiane de -12,0%. La valeur la plus faible est de -0,40 et la plus élevée de 0,33. Concernant les grandes aires urbaines, on note la même variation à la baisse de temps de trajet moyen domicile-travail prédit par rapport à la situation réelle en 2014. La distance kilométrique médiane est de 19 et la plus importante est de 64 (écart-type de 8,90). La variation moyenne est de -10,0% et la médiane de -11,0%. La valeur la plus faible est de -0,36 et la plus élevée de 0,38 (écart-type de 0,08).

Concernant les aires urbaines métropolitaines incluant également Paris, on note la même variation à la baisse de temps de trajet moyen domicile-travail prédit par rapport à la situation réelle en 2014. La distance kilométrique médiane est de 33 et la plus importante

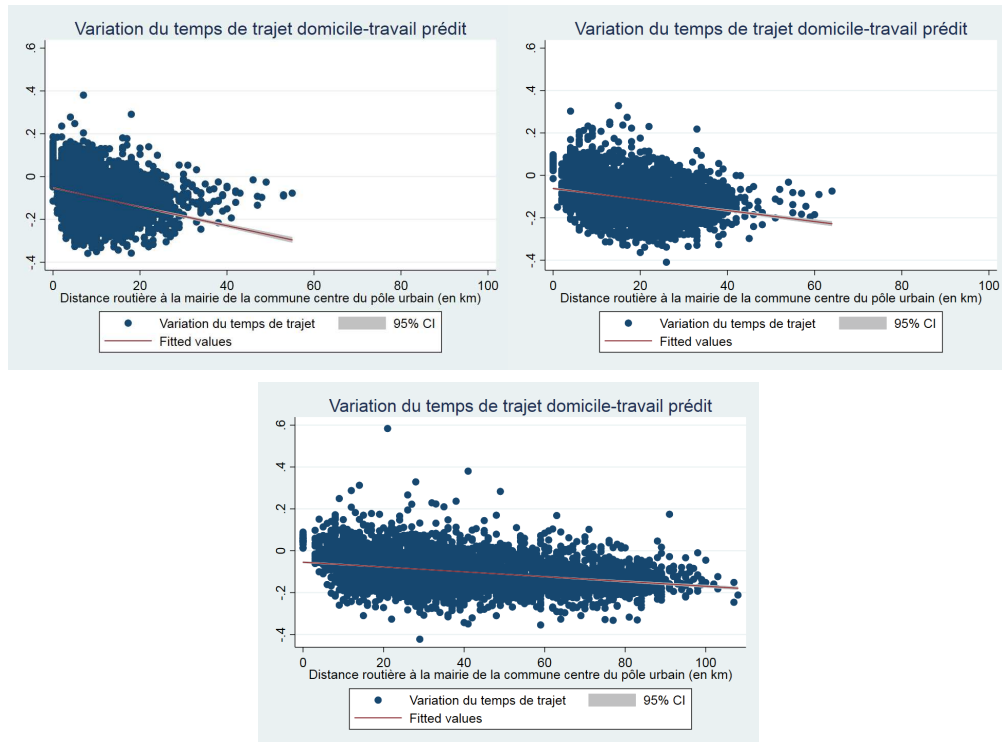


Figure 3.4: Variation des temps de trajet moyens domicile-travail prédits en fonction de la distance des communes au centre du pôle urbain par classes d'aires urbaines (Autres aires urbaines en haut à gauche, grandes aires urbaines en haut à droite et aires métropolitaines incluant Paris en bas).

est de 108 (écart-type de 21,20). La variation moyenne est de -9,70% et la médiane de -10,6%. La valeur la plus faible est de -0,36 et la plus élevée de 0,38 (écart-type de -0,08).

Quand on se restreint aux communes centres de toutes les aires urbaines, la situation s'inverse. En 2014, nos données montrent que les emplois s'y concentrent en majorité (annexe 6.2). Quel que soit le type d'aire urbaine, la moyenne mobile est positive à l'exception du percentile le plus faible de la distribution (-0,03). Ces aires sont classées parmi les petites et moyennes aires urbaines. Par conséquent, cela implique qu'un rééquilibrage entre emplois et population au sein des communes centres des aires urbaines augmenterait les temps de trajet moyen domicile-travail pour les habitants de ces communes. Ce résultat est d'autant plus net lorsque nous prenons uniquement les communes centres des aires métropolitaines françaises.

Ces résultats montrent qu'en moyenne, le temps de trajet prédit domicile-travail diminuerait de 10%. Afin de mesurer l'ampleur de cette politique de relocalisation des emplois et des populations aboutissant à une répartition homogène, il nous faut réfléchir à trois im-

plications. Dans un premier temps, il nous faut évaluer ce que représente cette diminution de temps de trajet domicile-travail. En 2014, près de 22 millions d'actifs ont un emploi et se déplacent pour s'y rendre au sein de nos aires urbaines conservées pour l'analyse. Le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe est de 27 minutes par commune pour un aller-retour. Nous faisons l'hypothèse qu'en moyenne 80% des actifs utilisent une voiture pour ce type de trajet au niveau national (CGDD, 2010). Par conséquent, sur l'année 2014, le temps total passé est de 475 millions de minutes par jour travaillé. En appliquant la diminution moyenne de 10%, on obtient 427,5 millions de minutes, ce qui représente une économie de 47,5 millions de minutes par jour travaillé. En se basant sur 1607 heures travaillées chaque année en France pour un temps de travail de 35h par semaine, on obtient 230 jours travaillés par an en France en 2014. En totalisant sur une année, l'économie réalisée est de 10,9 milliards de minutes. On peut mesurer ce gain par un nombre de jours travaillé et la productivité horaire moyenne. La répartition homogène des emplois et de la population permet de gagner 10 heures par an par personne. En se basant sur le produit intérieur brut français par habitant de 32641 euros en 2015 selon l'INSEE, la productivité horaire moyenne est de 20,3 euros pour un temps de travail de 35h par semaine. Par conséquent, les 10 heures gagnées par habitant donnent un gain de 203 euros produits. Si ce temps était passé à travailler, la congestion urbaine représenterait donc une perte de 3,57 milliards d'euros de produits avec une répartition non homogène.

Nous refaisons une analyse contrefactuelle avec la même méthode mais en étudiant la variation des distances moyennes domicile-travail dans le cas où il y a une proportion égale entre le nombre d'emplois et la population active dans chaque commune par rapport à nos valeurs estimées précédentes. Le graphique incluant les autres aires urbaines nous montre une variation à la baisse des distances parcourues au fur et à mesure qu'augmente la distance d'une commune au centre du pôle urbain. La variation moyenne est de -9,0% et la médiane de -10%. La valeur la plus faible est de -0,33 et la plus élevée de 0,34 (écart-type de 0,08). Concernant les grandes aires urbaines, on note la même variation à la baisse des distances moyennes domicile-travail prédites par rapport à la situation réelle en 2014. La variation moyenne est de -10,0% et la médiane de -11,0%. La valeur la plus faible est de -0,38 et la plus élevée de 0,30 (écart-type de 0,29). On note également une variation à la baisse pour les aires urbaines métropolitaines incluant également Paris par rapport à la situation réelle en 2014. La variation moyenne est de -9,0% et la médiane de -10,0%. La valeur la plus faible est de -0,39 et la plus élevée de 0,52 (écart-type de 0,07). Pour l'ensemble des communes de cette analyse, la distance moyenne domicile-travail (pondérée par les flux) est de 21,3 kilomètres par habitant par commune pour un trajet aller-retour, ce qui correspond à 4899 kilomètres parcourus en une année pour 230

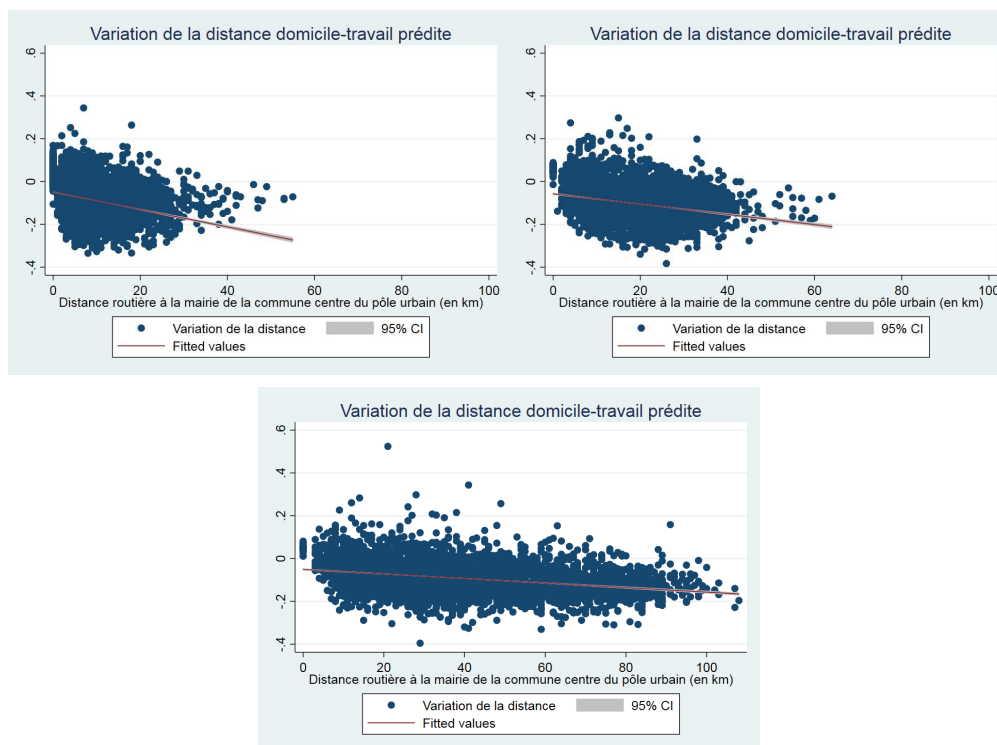


Figure 3.5: Variation des distances moyennes domicile-travail prédites en fonction de la distance des communes au centre du pôle urbain par classes d'aires urbaines (Autres aires urbaines en haut à gauche, Grandes aires urbaines en haut à droite et Aires métropolitaines incluant Paris en bas).

jours travaillés. Au niveau agrégé, cela représente 86 milliards de kilomètres parcourus en moyenne par l'ensemble des actifs disposant d'un véhicule privé tout en faisant l'hypothèse qu'ils travaillent 35 heures par semaine. Une baisse de 10% des distances entraînerait une économie de 489,9 kilomètres par actif pour une année. Au niveau agrégé, cela correspond à une diminution de 8,6 milliards de kilomètres parcourus.

Ces analyses contrefactuelles confirment bien qu'une répartition plus homogène des emplois et des actifs au sein des aires urbaines pourrait réduire en moyenne de 10% les distances et temps de trajet moyens domicile-travail prédits impliquant des gains de productivité significatifs. Les communes centres ne sont pas concernées par les évolutions à la baisse étant donnée qu'elles concentrent les emplois et donc qu'une décentralisation impliquerait des appariements non optimaux entre les actifs y vivant et les nouveaux lieux d'emplois.

5 Conclusion

Ce travail apporte de premières réponses quant aux effets des configurations spatiales des aires urbaines sur les distances moyennes domicile-travail, les temps de trajet moyens domicile-travail en heure de pointe et les temps de trajet au pôle urbain le plus près de chaque commune de résidence en période de pointe. Nous avons analysé l'impact de déterminants spatiaux liés à la localisation des emplois au sein de chaque aire urbaine française de 1999 à 2014 et pour l'année 2014 comme point focal récent. Nous avons étudié également les impacts de ces déterminants sur les temps de trajet en heure de pointe entre le lieu de résidence et le pôle urbain en 2014. Notre analyse statique des déterminants spatiaux nous indique que l'élasticité de la distance moyenne domicile-travail par rapport à l'accroissement de la concentration des emplois au sein d'une aire urbaine est comprise entre 0,22 et 0,26, toutes choses étant égales par ailleurs. Augmenter la densité de population a le même effet qualitatif à court-terme sur les distances moyennes domicile-travail mais il ne faut pas négliger les effets de second ordre. En effet, une densité de population plus importante implique en retour une augmentation du nombre de navetteurs entraînant une dégradation du temps de trajet moyen domicile-travail. Par conséquent, les entreprises se relocalisent ainsi que des ménages à cause de la congestion urbaine vers des zones moins denses à la périphérie des vieux centres villes (Louf et Barthelemy, 2013 ; Schwanen *et al.*, 2004b). Les économies d'agglomération sont un élément moteur pour les firmes qui se relocalisent ensemble au même endroit, notamment lorsqu'elles font partie du même secteur (Glaeser, 2012). Cependant, un système urbain polycentrique ne mène pas forcément à une diminution du temps de trajet, ni de la distance domicile-travail mais dépend surtout d'une bonne accessibilité de ces lieux d'emploi par les moyens de transport (Denant-Boemont *et al.*, 2018). De plus, la théorie selon laquelle les citadins résident près de leur lieu d'emploi est discutée lorsqu'on se retrouve avec des modèles polycentriques (Aguiléra, 2005; Schwanen *et al.*, 2004b). Nos analyses contrefactuelles montrent cependant que les valeurs prédites des distances et temps de trajet moyens domicile-travail en heure de pointe sont plus faibles lorsque la répartition des emplois et de la population active est identique dans les communes les plus éloignées des communes centres au sein des aires urbaines. Par conséquent, les économies de temps réalisées peuvent être significatives.

Nos analyses en coupe de trois périodes (1999 à 2014) et d'une période (2014) présentent plusieurs limites quant à la précision de nos estimateurs MCO. La première limite est liée à un manque d'information. Notre base de données mériterait de contenir des informations supplémentaires sur la composition des ménages, leur revenu, leur taux d'équipement

(nombre de voitures...), la présence d'un ou plusieurs garages et de facilité de parking à la fois sur leur lieu résidentiel mais aussi sur leur lieu de travail. Toutes ces informations peuvent être incluses dans nos modèles économétriques en tant que contrôles pour tester la robustesse de nos coefficients associés à nos quatre variables explicatives. En outre, nos estimations ne nous permettent pas de déterminer un effet causal de chacune de nos variables explicatives. Des données individuelles plus fines seraient nécessaires pour chaque année depuis 1999. Une autre limite est liée à l'endogénéité de nos variables explicatives. La méthode couramment adoptée dans la littérature est d'instrumenter, c'est-à-dire d'utiliser une variable instrumentale corrélée à chacune de nos variables explicatives et non corrélée au terme d'erreurs¹³. Appliquer la méthode quasi-expérimentale de Duranton et Turner (2017) nous permettrait de traiter l'endogénéité de nos variables explicatives et mesurer leurs effets causaux. Utiliser des données géologiques ou des données historiques de la productivité des sols pourrait être une solution afin de prédire la répartition des emplois et de la population dans les zones urbaines. Pour prédire la concentration des emplois dans les aires urbaines, il serait intéressant d'instrumenter par les valeurs ajoutées au kilomètre carré d'entreprises historiques.

L'ensemble de nos résultats nous amènent à penser que les politiques publiques en lien avec l'amélioration des conditions de circulation, la diminution des temps de trajet domicile-travail et la réduction des émissions de CO_2 (Stratégie nationale bas carbone du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire¹⁴) doivent s'attacher en priorité aux trois variables clés suivantes : (i) la répartition des lieux d'emploi, (ii) l'accessibilité aux zones d'emploi et (iii) la densité des emplois. Notre contribution principale est donc de relever l'importance d'une alternative aux politiques de densification, c'est-à-dire se focaliser sur la distribution spatiale des emplois et de la population. Cette étude à partir de données françaises vient confirmer les conclusions de plusieurs travaux empiriques. Muñiz et Galindo (2005), Veneri (2010) et Aguilera (2005) s'accordent sur le fait que les formes urbaines ont un impact considérable sur les distances et temps de trajet domicile-travail et les émissions de GES. Ils préconisent également que la décentralisation des emplois s'accompagne de politiques de densification, d'amélioration des services de transport public et des infrastructures routières (Alpkokin *et al.*, 2008 ; Muñiz et Galindo, 2005). Les politiques publiques d'aménagement du territoire pourront se nourrir de ses résultats afin d'être

¹³Dans la littérature, il existe des instrumentations par des données historiques de recensement de la population (ex : données démographiques du 19ème siècle) et des données géologiques (Combes *et al.*, 2010 ; Blaudun de Thé *et al.*, 2018). L'intérêt principal de ces instruments est leur bonne prédiction de la localisation des populations urbaines actuelles tout en étant non corrélés aux phénomènes d'agglomération de la population et des emplois actuels (Duranton et Turner, 2017).

¹⁴<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone> (consulté le)

mieux ciblées au sein des aires urbaines françaises. Le recentrage de politiques urbaines vers la décentralisation des emplois afin de réduire la pollution et la congestion urbaine pose également la question de l'analyse coût/bénéfice en situation réelle.

Références

- Aguiléra, A. (2005). Growth in commuting distances in French polycentric metropolitan areas: Paris, Lyon and Marseille. *Urban studies*. 42(9): 1537–1547.
- Aguiléra, A., Wenglenski, S., et Proulhac, L. (2009). Employment suburbanisation, reverse commuting and travel behaviour by residents of the central city in the Paris metropolitan area. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 43(7): 685–691.
- Alpkokin, P., Cheung, C., Black, J. et Hayashi, Y. (2008). Dynamics of Clustered Employment Growth and Its Impacts on Commuting Patterns in Rapidly Developing Cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 42(3): 427—444.
- Blaudin de Thé, C., Carantino, B. and Lafourcade, M. (2018). The Carbon ‘Carprint’ of Suburbanization: New Evidence from French Cities. CEPR Discussion Paper No. DP13086. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3222602>
- Borck, R. (2016). Will skyscrapers save the planet? Building height limits and urban greenhouse gas emissions. *Regional Science and Urban Economics*. 58: 13–25.
- Brutel C., (2011). Un maillage du territoire français - 12 aires métropolitaines, 29 grandes aires urbaines. *Insee Première*. numéro 1333, janvier.
- Brutel C., et Levy D., (2011). Le nouveau zonage en aires urbaines de 2010 - 95% de la population vit sous l’influence des villes. *Insee Première*. numéro 1374, octobre.
- Buehler, R. (2011). Determinants of transport mode choice: a comparison of Germany and the USA. *Journal of Transport Geography*. 19(4): 644–657.
- Buisson G. et Lincot L., (2016). Où vivent les familles en France?. *Insee Première*. numéro 1582, janvier.
- Carlson, J., et Malmfors, H. (2018). Gender Differences in Commuting over Municipality Borders: A study of regional Human Capital’s effect on commuting in Sweden. 39p.
- CGDD, S. (2010). La mobilité des Français, Panorama issu de l’enquête nationale transports et déplacements 2008. La Revue du CGDD. 225 p.
- CITEPA (2016). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France (format SECTEN). Champ: France Métropolitaine.
- Colley, M., et Buliung, R. N. (2016). Gender Differences in School and Work Commuting Mode Through the Life Cycle: Exploring Trends in the Greater Toronto and Hamilton Area, 1986 to 2011. Transportation Research Record. *Journal of the Transportation Research Board*. (2598): 102–109.
- Combes, P. P., Duranton, G., et Gobillon, L. (2010). The identification of agglomeration economies. *Journal of economic geography*. 11(2): 253–266.

- Coudène M., et Lévy D. (2016). "De plus en plus de personnes travaillent en dehors de leur commune de résidence", Insee Première numéro 1605, juin 2016.
- Cook and Pishue. (2017). INRIX Global traffic scorecard. 44 p.
- Crane, R., et Takahashi, L. (2009). Sex changes everything: the recent narrowing and widening of travel differences by gender. *Public works management and policy*. 13(4): 328–337.
- Denant-Boemont, L., Gagné, C., et Gaté, R. (2018). Urban spatial structure, transport-related emissions and welfare. *Journal of Environmental Economics and Management*. 89: 29–45.
- Duranton G. et Turner M.A. (2017). Urban form and driving: Evidence from US cities. Working paper, Brown University. 49 p.
- Duncan O.D. et Duncan B., (1955), A Methodological Analysis of Segregation Indexes. *American Sociological Review*. 41: 210–217.
- García-Palomares, J. C. (2010). Urban sprawl and travel to work: the case of the metropolitan area of Madrid. *Journal of Transport Geography*. 18(2): 197–213.
- Gautier, P. A., Svarer, M., et Teulings, C. N. (2010). Marriage and the city: Search frictions and sorting of singles. *Journal of Urban Economics*. 67(2): 206–218.
- Glaeser, E. L. (2012). Triumph of the city: How our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier. Penguin Press, USA.
- Glaeser, E. L., Kolko, J., et Saiz, A. (2001). Consumer city. *Journal of economic geography*. 1(1): 27–50.
- Gordon, P., Kumar, A., and Richardson, H. W. (1989). Gender differences in metropolitan travel behaviour. *Regional Studies*. 23(6): 499–510.
- Hervé M. et De Nicola L.-J. (2017), Rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable par le groupe de travail sur l'aménagement du territoire, rapport numéro 565, session ordinaire de 2016-2017. 126 p. Disponible à http://www.senat.fr/rap/r16-565/r16-565_mono.html.
- Hilal, M. (2010) : "ODOMATRIX. Calcul de distances routières intercommunales," Cahier des Techniques de l'INRA, Numéro spécial : Méthodes et outils de traitement des données en sciences sociales. Retours d'expériences. 41–63.
- Huber P., 2014, Are Commuters in the EU better educated than non-commuters but worse than migrants?. *Urban Studies*. 51(3): 509–525.
- Kahn, M. E. (2010). New evidence on trends in the cost of urban agglomeration. *Agglomeration economics*. University of Chicago Press. 339–354.
- Law, R. (1999). Beyond 'women and transport': towards new geographies of gender and daily mobility. *Progress in human geography*. 23(4): 567–588.
- Levy D. et Le Jeannic T. (2011). Un habitant de pôle urbain émet deux fois moins

de CO_2 que la moyenne pour se rendre à son lieu de travail ou d'études. *Insee Première*. numéro 1357, juin.

Louf, R., et Barthelemy, M. (2013). Modeling the polycentric transition of cities. *Physical review letters*. 111(19): 198–702.

Makido, Y., Dhakal, S., et Yamagata, Y. (2012). Relationship between urban form and CO2 emissions: Evidence from fifty Japanese cities. *Urban Climate*. 2: 55–67.

Mirabel François, Reymond Mathias (2013). Économie des transports urbains, Paris, La Découverte « Repères ». 128 p.

Muñoz, I., et Galindo, A. (2005). Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics*. 55(4): 499–514.

Pereira, R., et Schwanen, T. (2015). Commute Time in Brazil (1992-2009): Differences Between Metropolitan Areas, By Income Levels And Gender (No. 0192). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada-IPEA. 32 p.

Priemus, H., Nijkamp, P., and Banister, D. (2001). Mobility and spatial dynamics: an uneasy relationship. *Journal of transport geography*. 9(3): 167–171.

Roca, J. D. L., and Puga, D. (2017). Learning by working in big cities. *The Review of Economic Studies*. 84(1): 106–142.

Schwanen, T., Dieleman, F. M., et Dijst, M. (2004a). The impact of metropolitan structure on commute behavior in the Netherlands: a multilevel approach. *Growth and change*. 35(3): 304–333.

Schwanen, T., Dijst, M., et Dieleman, F. M. (2004b). Policies for urban form and their impact on travel: the Netherlands experience. *Urban studies*. 41(3): 579–603.

Schwanen T., Dieleman M.F. et Dijst M. (2001). Travel behaviour in Dutch monocentric and policentric urban systems. *Journal of Transport Geography*. 9: 173–186.

Segal, D., and Steinmeier, T. L. (1980). The incidence of congestion and congestion tolls. *Journal of Urban Economics*. 7(1): 42–62.

Small, K. A., and Verhoef, E. T. (2007). The economics of urban transportation. Routledge. 276 p.

Van Puymbroeck C., Reynard R. (2010). Répartition géographique des emplois - Les grandes villes concentrent les fonctions intellectuelles, de gestion et de décision. *Insee Première*. numéro 1278, février.

Veneri, P. (2010). Urban polycentricity and the costs of commuting: evidence from italian metropolitan areas. *Growth and Change*. 41(3): 403–429.

White M. (1986). Sex differences in urban commuting patterns. *American Economic Review*. 76: 368–372.

Wiedenhofer, D., Smetschka, B., Akenji, L., Jalas, M., et Haberl, H. (2018). Household time use, carbon footprints, and urban form: a review of the potential contributions of

everyday living to the 1.5°C climate target. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 30: 7–17.

Wyly K.E. (1998). Containment and mismatch: gender differences in commuting in metropolitan labor markets. *Urban Geography*. 19(5): 395–430.

6 Annexe

A. Les aires urbaines françaises de 2010.

Les aires d'influence des villes - Le zonage en aires urbaines 2010

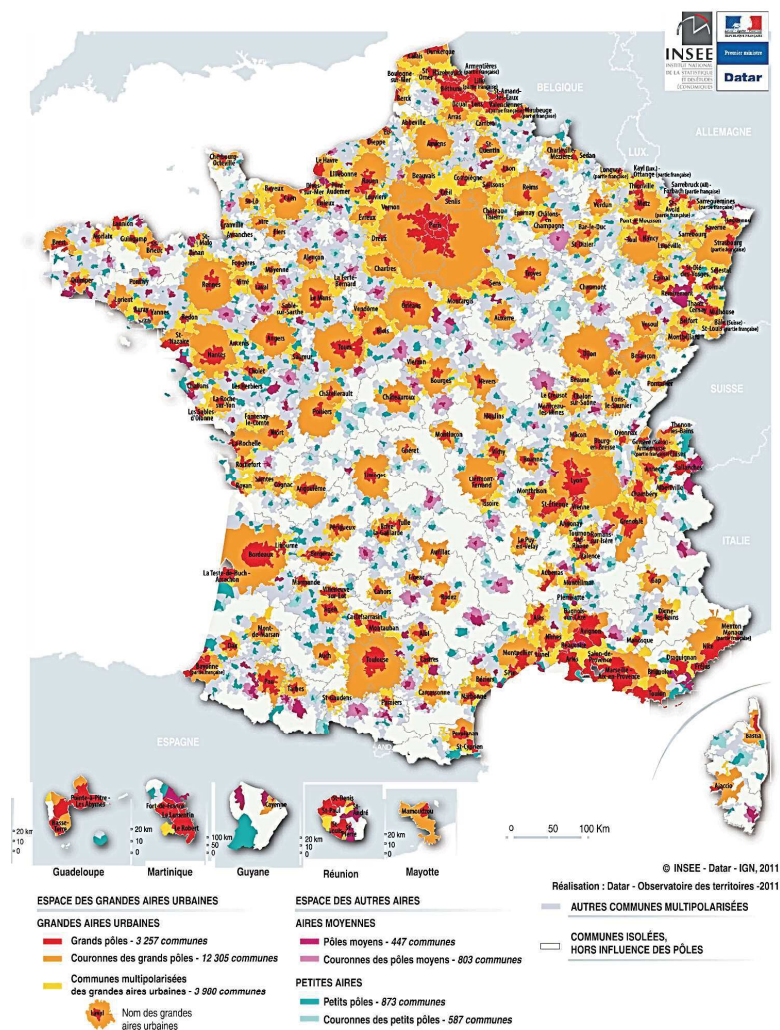
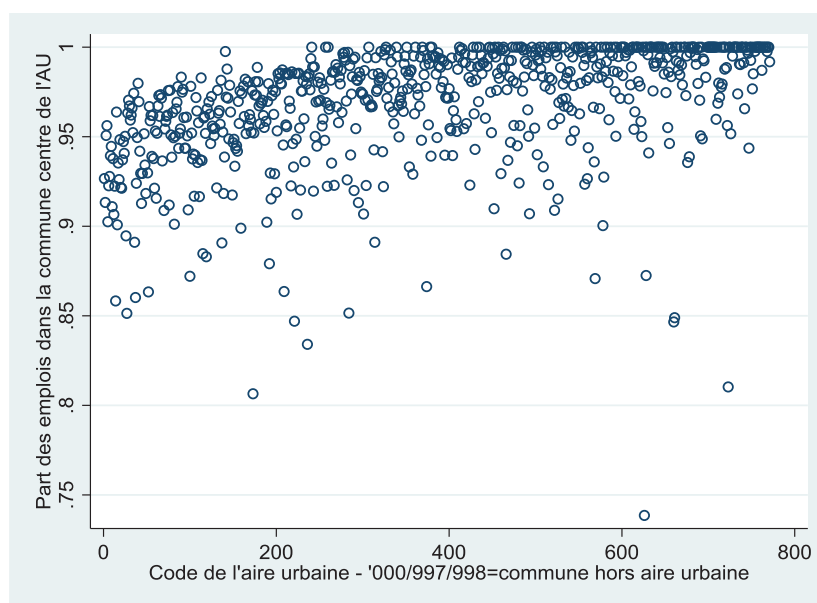
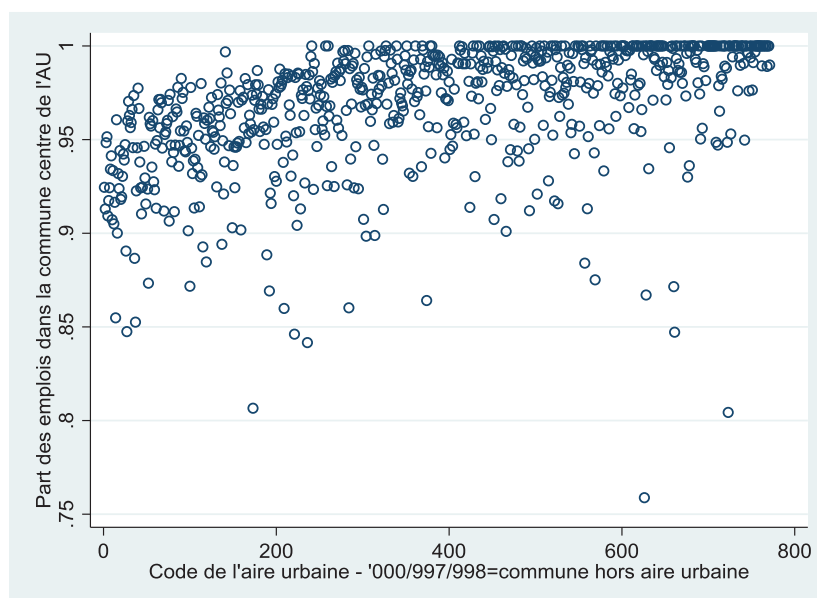


Figure 3.6: Délimitation et localisation des Aires Urbaines françaises en 2010.

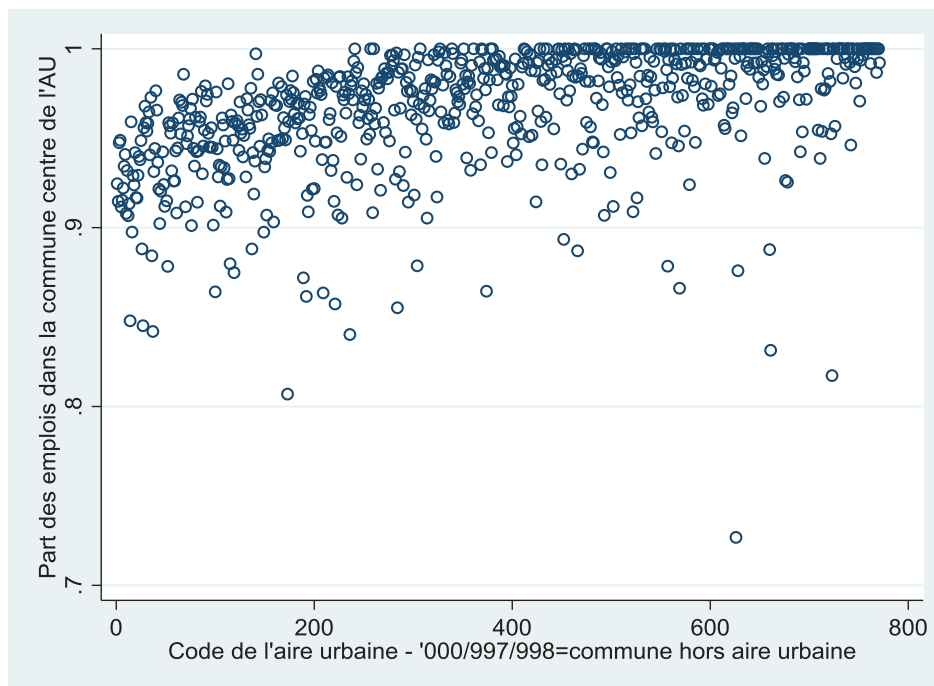
B. Statistiques descriptives de la part des emplois dans les communes centres des aires urbaines sur deux périodes.



Part des emplois de la commune-centre pour chaque aire urbaine en 1999.



Part des emplois dans la commune-centre pour chaque aire urbaine en 2007.



Part des emplois dans la commune-centre pour chaque aire urbaine en 2014.

C. Estimations des distances routières moyennes domicile-travail sur deux périodes (2007 et 2014): Nombre de communes variable entre 2007 et 2014.

Table 3.13: Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile-travail : Estimations MCO, Référence : Nombre de communes variable entre 2007 et 2014 par aire urbaine.

Variable dépendante Log (distance moyenne domicile-travail)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Log (superficie)	-0.07 (0.17)	-0.06 (0.17)	-0.06 (0.18)	-0.10 (0.18)	-0.10 (0.17)
Log (population)	-0.50*** (0.17)	-0.50*** (0.17)	-0.50*** (0.17)	-0.46*** (0.17)	-0.43** (0.17)
Log (âge moyen des actifs)	-0.61 (0.45)	-0.62 (0.45)	-0.62 (0.45)	-0.77* (0.45)	-0.73* (0.45)
Log (part des femmes actives)	-0.25 (0.28)	-0.25 (0.28)	-0.25 (0.28)	-0.27 (0.28)	-0.25 (0.28)
Log (nombre de communes)	-0.17 (0.18)	-0.17 (0.19)	-0.17 (0.19)	-0.16 (0.18)	-0.20 (0.18)
Log (part des flux de transport collectif $t-x$)	0.01 (0.02)	0.01 (0.02)	0.02 (0.02)	0.01 (0.02)	0.01 (0.02)
Log (PEC)		0.08 (0.18)			
Log (Indice HH)			0.11 (0.14)		
Log (ID - centres)				0.07** (0.03)	
Log (ID - aires urbaines)					0.10** (0.05)
Année 2007	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Année 2014	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Observations	1 182	1 182	1 182	1 182	1 182
Adj. R^2	0.60	0.60	0.60	0.61	0.61

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écart-types sont clusterisés au niveau des aires urbaines (594 clusters) et reportés entre parenthèses ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

D. Estimations des distances routières moyennes domicile-travail sur deux périodes (2007 et 2014) : Nombre de communes variable entre 2007 et 2014.

Table 3.14: Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile-travail : Estimations MCO, Référence : Nombre de communes variable entre 2007 et 2014.

Variable dépendante Log (distance moyenne domicile-travail)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Log (superficie)	-0.07 (0.19)	-0.07 (0.19)	-0.06 (0.20)	-0.10 (0.20)	-0.11 (0.20)
Log (population)	-0.51*** (0.17)	-0.51*** (0.17)	-0.50*** (0.17)	-0.47*** (0.18)	-0.45** (0.18)
Log (âge moyen des actifs)	-0.63 (0.55)	-0.63 (0.55)	-0.64 (0.55)	-0.80 (0.55)	-0.76 (0.54)
Log (part des femmes actives)	-0.36 (0.28)	-0.37 (0.28)	-0.37 (0.28)	-0.38 (0.27)	-0.35 (0.27)
Log (nombre de communes)	-0.20 (0.20)	-0.20 (0.20)	-0.19 (0.20)	-0.19 (0.20)	-0.22 (0.20)
Log (Part des flux de transport collectif)	0.06** (0.02)	0.06** (0.02)	0.06** (0.02)	0.06** (0.02)	0.06** (0.02)
Log (part des emplois du centre)		0.10 (0.19)			
Log (indice HH)			0.14 (0.15)		
Log (ID - centres)				0.07** (0.03)	
Log (ID - aires urbaines)					0.10** (0.05)
Année 2007	Référence	Référence	Référence	Référence	Référence
Année 2014	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)	0.14*** (0.03)	0.15*** (0.02)	0.14*** (0.02)
Effet fixe Aire urbaine	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Observations	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191
Adj. R^2	0.60	0.60	0.60	0.61	0.61

Notes : Estimations des Moindres Carrés Ordinaires ; les écart-types sont clusterisés au niveau des aires urbaines (594 clusters) et reportés entre parenthèses ; PEC : Part de l'emploi de la commune centre, Indice HH : concentration des emplois dans l'aire urbaine, ID-Centre : Indice de dissimilarité emplois-population dans la commune centre et ID-Aire urbaine : indice de dissimilarité emplois-population au sein de l'aire urbaine ; *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. *Source* : recensements de la population de 1999, 2007 et 2014 INSEE ; Odomatrix 1990-2014, UMR1041 CESAER INRA.

General conclusion

The world's population lives mainly in urban areas. Cities are attractive spaces that are resilient to economic crises. Cities accommodate companies and households through a mechanism called agglomeration economies. The literature has focused heavily on identifying, measuring and quantifying these urbanization-related gains. However, urban costs in developed and developing countries are far from negligible. Air pollution, traffic congestion, lack of efficient public transport, excessive economic specialization and poor governance are threats to a sound urban economy. As cities in emerging countries develop, these numerous challenges emerge. Solutions exist and their effects are studied in this thesis. Without measures lowering negative externalities, workers are likely to leave a city. For instance, eight out of ten highly skilled executives want to move within the next five years from Paris. Quality of life, housing and transportation costs are key criteria in a household's location choice. As a consequence, it is essential that public authorities address these issues and provide answers to households and businesses located in urban areas. Challenging the paradigm of the car-based city seems complicated, and urban policies focus on densifying and/or redensifying urban cores in order to reduce GHG emissions and bring households closer to workplaces. For instance, the French Town Planning Code (TPC) was recently modified to include densification policies. These policies aim to reduce urban sprawl above all. New buildings must have a minimum threshold of density in each municipality. Increasing floor space per unit of land should be the right policy a priori. We should carefully examine whether elevate existing buildings boosts compactness or expands the city border. A higher supply of floor space would be an effective policy to make denser cities instead of floor area ratio policies that limit building heights. However, households' housing demand and urban costs (i.e., congestion and pollution externalities) may counteract this basic premise. The results could be very different at second glance, although there is a wide consensus to develop compact cities among political leaders and urban planners. The debate is complex. The questions of feasibility, acceptability and which efficient policies to implement remains. A better understanding of urban forms is therefore necessary to help mitigate the harmful effects of transport externalities.

The three chapters of this thesis bring new elements out to the debate about compact cities, which emit less CO_2 and are less congested. Our three chapters analyze the effects of urban forms on CO_2 emissions, traffic congestion and commuting times and distances by car. In our analysis, urban planning involves a new spatial organization of jobs and population: the polycentric city.

Our main results can be summarized as follows. Our first theoretical chapter provides some insights concerning urban forms and CO_2 emissions stemming from transportation. We argue that the polycentric city is not necessarily the most desirable city to develop under certain circumstances. Indeed, close scrutiny must be granted to the interplay between housing demand, commuting distances and the magnitude of urban pollution. Taking into account the pollution externality stemming from the aggregate traveled distances mitigates the desirability of the polycentric city even though it reduces home-to-work distances. Travel speed and number of roads connected to the CBD play a critical role in the choice of the most desirable urban form. Finally, the spatial size of cities is a key variable when it comes to curbing CO_2 emissions.

Chapter 2 extends the model, including traffic congestion and road land use. A change in urban form and congestion management with road pricing schemes in a polycentric city are investigated. A polycentric city can mitigate the congestion burden for each road user provided that no distortions exist on the labor and housing markets when congestion is unpriced. As long as growth of traffic flows and urban sprawl costs do not substantially decrease the direct benefits from job relocations, land use regulations remain key policies for addressing urban transport issues instead of pricing schemes. Indeed, road pricing schemes do not achieve the optimal level of congestion. The *Pigouvian tax* yields a CBD that is too small. According to the initial location of the SBD (too small or too large), a *flat tax* may be less (resp., more) harmful than a *cordon toll*. Note that road pricing schemes benefit all landlords regardless of the closed-city structure without redistribution. Hence, political concerns regarding the redistribution of tax revenues are implied when we internalize the negative externality.

The relationship between urban forms and commuting time and distances in French urban areas is investigated in Chapter 3. Our static analysis of the determinants of the spatial distribution of jobs and population shows us that an increase in job concentration in an urban area is associated with an elasticity between 0.22 and 0.26 with commuting distances and times. An increase in population density has the same qualitative effect on average commuting distances. However, second-order effects should not be underestimated. In-

deed, higher density yields higher commuting times in cities. This chapter highlights a relevant alternative policy to densification, i.e. a decentralization of CBD jobs towards SBDs. It validates the choice to theoretically analyze polycentric cities. In addition, policies of decentralization and densification could be combined to have a greater impact in reducing commuting time and distances. Our results show that commuting time and distances depend also on socio-economic factors such as demography, gender and public transport demand.

This thesis highlights the need for a cautious approach to implement certain policies that would guarantee a city's sustainable development. A polycentric city may or may not be desirable depending on the (i) accessibility of workplaces, (ii) the quality of road infrastructure (high speed) and (iii) the employment density in cities. This thesis also demonstrates the significant role of the housing demand on urban structure when the latter is endogenous in a context of unpriced transport congestion. Some urban densification projects might reconsider the negative externalities (congestion and pollution) that arise when a population grows within a city. These externalities are indirect costs due to the adjustment of the housing demand in the long run.

In the future, research in urban economics related to the negative impacts of urban transport should focus on several topics. Parking economics is an underlying field that has remained surprisingly minimally explored until recently. First, our theoretical model could be enriched by an analysis including land used by car parks. The key question is whether a supply and demand management policy could be more effective than urban tolls in congestion management. The second important point is the link between urban forms, transport modes and CO_2 emissions. Indeed, the decentralization of jobs in secondary centers lowers the pressure on the main center, reducing the potential market for public transport. Therefore, the effects of a change in the spatial organization of cities that are initially monocentric on the substitution between private vehicles and public transport and long-term CO_2 emissions still need to be theoretically and empirically assessed. Third, it would be interesting to test several urban policies simultaneously in situ and measure the long-term effects on traffic congestion, housing demand and CO_2 emissions. Finally, the question of inequalities in urban areas should be addressed as it relates to the implementation of these policies to reduce transport externalities.

List of Tables

2.1	Calibrated parameters	131
2.2	Simulated results of CBD size within a polycentric city according to each road pricing scheme. ($1/\mu = 2$).	131
2.3	Simulated results of policy instruments within a polycentric city. ($1/\mu = 2$).	133
3.1	Statistiques descriptives des variables dépendantes : distances aux emplois, temps de trajet moyens domicile-travail et domicile-pôle urbain en fonction des classes d'aires urbaines en 1999, 2007 et 2014.	166
3.2	Statistiques descriptives des différents indicateurs de forme urbaine en fonction des classes d'aires urbaines en 1999, 2007 et 2014.	169
3.3	Statistiques descriptives des variables de contrôle : caractéristiques spatiales et socio-démographiques en fonction des classes d'aires urbaines en 1999, 2007 et 2014.	172
3.4	Impact des formes urbaines sur les distances moyennes domicile-travail (pondérées par tous les flux de transport) sur trois périodes (1999, 2007 et 2014).	175
3.5	Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile-travail (pondérées par tous les flux de transport), Référence : Communes et superficie de 1999 par aire urbaine.	176
3.6	Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile-travail (pondérées par tous les flux de transport), Référence : Communes et superficie de 1999.	178
3.7	Impact des formes urbaines sur le temps de trajet moyen domicile-travail en heure de pointe (pondéré par tous les flux de transport) : Estimations MCO.	186
3.8	Impact des formes urbaines sur la distance moyenne domicile-travail : Estimations MCO.	188
3.9	Impact des formes urbaines sur les temps de trajet moyens domicile-pôle urbain.	191

3.10 Impact des formes urbaines sur les temps de trajet moyens domicile-travail (pondérés par tous les flux de transport) : Estimations MCO.	194
3.11 Impact des formes urbaines sur les distances moyennes domicile-travail : Estimations MCO.	196
3.12 Impact des formes urbaines sur les temps de trajet moyens domicile-pôle urbain le plus près : Estimations MCO.	197
3.13 Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile- travail : Estimations MCO, Référence : Nombre de communes variable entre 2007 et 2014 par aire urbaine.	214
3.14 Impact des formes urbaines sur les distances routières moyennes domicile- travail : Estimations MCO, Référence : Nombre de communes variable entre 2007 et 2014.	215

List of Figures

1	Temps de trajet en heures creuse et de pointe (minutes) par communes de l'aire urbaine en fonction de la distance à la commune centre en 2014. . . .	12
2	Enveloppe supérieure des enchères foncières à l'équilibre et localisation du centre central d'affaires $x = 0$, et limite y de la ville monocentrique (Solow, 1972).	20
3	Enveloppe supérieure des enchères foncières à l'équilibre et localisation du centre principal d'affaires $x = 0$, d'un centre secondaire z_S et de la limite y de la ville polycentrique (auteur).	21
4	Travel times in peak and off-peak hours (minutes) by municipalities of the urban area with respect to the distance from Central Business Districts (CBD) in 2014.	37
5	Upper envelope of the bid rents in equilibrium and location of CBD $x = 0$, and limit y of the monocentric city (Solow, 1972).	45
6	Upper envelope of the bid rents in equilibrium and location of CBD $x = 0$, SBD z_S and limit y of the polycentric city (author).	46
1.1	Upper envelope of the bid rents in equilibrium and location of CBD limit $\hat{z}$, and limit y_P of the polycentric city.	78
1.2	Evolution of private welfare (without pollution externality) with wage gap $(1/\mu)$ [left-hand side]. Evolution of total commuting distances with wage gap $(1/\mu)$ [right-hand side]. Case with a low Γ : ($L = 20, \tau = 1/10, \omega_P = 1, \delta = 1, m = 10, R_A = 1/4$.)	82
1.3	Evolution of private welfare (without pollution externality) with wage gap $(1/\mu)$ [left-hand side]. Evolution of total commuting distances with wage gap $(1/\mu)$ [right-hand side]. Case with a high Γ : ($L = 20, \tau = 1, \omega_P = 1, \delta = 1, m = 2, R_A = 1/4$.)	82
2.1	Evolution of the components of the total commuting time function with respect to the distance to the CBD in a monocentric city configuration. . .	115

2.2	Bids rent in equilibrium near each business district and the locations of the CBD ($x = 0$) and the SBD ($x = z_S$) within a polycentric city configuration.	121
2.3	The evolution of welfare with respect to $\hat{z}$ within a polycentric city configuration (from the CBD $x = 0$ to the city limits y).	125
3.1	Variation des distances moyennes parcourues domicile-travail prédites par aires urbaines sur trois périodes (1999, 2007 et 2014).	180
3.2	Variation des distances moyennes parcourues domicile-travail prédites par aires urbaines sur trois périodes (1999, 2007 et 2014).	181
3.3	Variation du temps de trajet moyen prédit domicile-travail par commune centre en fonction du rang de chaque aire urbaine.	200
3.4	Variation des temps de trajet moyens domicile-travail prédits en fonction de la distance des communes au centre du pôle urbain par classes d'aires urbaines (Autres aires urbaines en haut à gauche, grandes aires urbaines en haut à droite et aires métropolitaines incluant Paris en bas).	201
3.5	Variation des distances moyennes domicile-travail prédites en fonction de la distance des communes au centre du pôle urbain par classes d'aires urbaines (Autres aires urbaines en haut à gauche, Grandes aires urbaines en haut à droite et Aires métropolitaines incluant Paris en bas).	203
3.6	Délimitation et localisation des Aires Urbaines françaises en 2010.	211

Titre : Régulations de la pollution et de la congestion urbaine dans les villes polycentriques : Formes urbaines et tarification routière.

Mots clés : Formes urbaines, coûts de transport, externalités, tarification routière, aires urbaines.

Résumé : L'urbanisation des pays développés et en voie de développement entraîne des effets négatifs liés à la pollution de l'air, aux émissions de gaz à effet de serre et à la congestion dans les villes. Cette thèse étudie les effets des formes urbaines sur la pollution, la congestion, les distances domicile-travail et le bien-être des citoyens. Nous construisons un modèle théorique de ville polycentrique incluant des choix de localisation résidentielle avec la présence d'externalités négatives de pollution et de congestion provenant des flux de transport, où la localisation des lieux d'emploi est déterminée de manière endogène. Une analyse empirique des déterminants spatiaux des distances et des temps de déplacement domicile-travail est menée avec les aires métropolitaines françaises comme cas d'étude. Cette thèse souligne la nécessité d'une approche prudente pour mettre en œuvre certaines politiques urbaines qui garantiraient un développement durable des villes.

Une ville polycentrique peut être une ville souhaitable ou non en fonction (i) de l'accessibilité des lieux d'emplois, (ii) de la qualité de l'infrastructure routière (vitesse élevée ou non), (iii) de la densité d'emploi dans les villes et de (iv) la répartition de la population et des emplois. Cette thèse démontre également le rôle significatif de la demande de logements endogène sur les structures urbaines en présence d'une externalité négative de congestion des transports non tarifiée. Certains projets de densification urbaine devraient reconsidérer et quantifier les externalités négatives (congestion et pollution) qui surviennent lorsque la population augmente dans une ville. Ces externalités sont des coûts indirects dus à l'ajustement de la demande de logements et de transport à long terme.

Title : Traffic congestion and pollution regulations in polycentric cities : Urban forms and road pricing

Keywords : Urban forms, commuting costs, externalities, road pricing, metropolitan areas.

Abstract : Urbanization in developed and developing countries has major drawbacks regarding air pollution, Greenhouse Gas (GHG) emissions and congestion externalities due to transport in car-based cities. In this thesis, we study the effects of urban design on pollution, congestion, traveled distances and welfare. We build a theoretical model of residential choices with pollution and congestion externalities arising from commuting, where the location of jobs within the city is endogenous. Finally we collect data from French metropolitan areas to conduct an empirical analysis of spatial determinants of commuting time and distances. This thesis highlights the need of a cautious approach to implement some urban policies that would guarantee a sustainable development of a city.

A polycentric city may be a desirable city or not depending on the (i) accessibility of workplaces, (ii) the quality of road infrastructure (high speed), (iii) the employment density and (iv) the distribution of population and workplaces in cities. This thesis also demonstrates the significant role of the housing demand on urban structure when the latter is endogenous in a context of unpriced transport congestion. Some urban densification project might reconsider and quantify the negative externalities (congestion and pollution) which arise when the population grows within any city. These externalities are indirect costs due to the adjustment of the housing and transport demand in the long run.