

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA MISE EN SERVICE D'UNE INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT EN
COMMUN SUR L'ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE D'UNE
VILLE : ÉTUDE DU CAS DE LA CANADA LINE DU SKYTRAIN DE VANCOUVER

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉCONOMIQUE

PAR

CYNTHIA AUBERT

JANVIER 2024

REMERCIEMENTS

Tout au long de la rédaction de ce mémoire de recherche, j'ai été accompagnée par des personnes qui m'ont transmis de nombreuses connaissances, qui m'ont permis de réaliser mes premières expériences en recherche ou qui m'ont soutenu jour après jour dans mon quotidien.

Parmi ces personnes, je remercie monsieur Charles Séguin, qui a dirigé ce mémoire de recherche et qui m'a accompagné tout au long de la rédaction de ce dernier par ses divers conseils, son expertise et sa patience à mon égard.

Je remercie aussi madame Andrée De Serres, qui a co-dirigé ce mémoire, pour sa disponibilité, sa gentillesse et son altruisme. Madame De Serres enrichit mon parcours universitaire par les nombreuses connaissances qu'elle me transmet, tant sur le plan scientifique, professionnel, qu'humain ainsi que par les diverses expériences de travail que j'ai pu vivre grâce à elle.

Je remercie mon très cher Sylla Maldini, avec qui je partage mon quotidien, qui est un pilier solide dans ma vie et une inépuisable source d'inspiration.

Je remercie madame Hélène Sicotte, pour son écoute, ses conseils, sa bienveillance et la transmission de ses multiples expériences de vie enrichissantes et stimulantes.

Je remercie monsieur Robert Léonard, qui m'a transmis des connaissances précieuses sur la pensée économique et qui a enrichi mon parcours dans cette discipline par la qualité de nos échanges et sa bienveillance.

Je remercie mes professeurs havrais, madame Hélène Maisonnave, monsieur Sylvain Baumann, madame Morgane Chevé et monsieur Frédéric Gannon qui ont largement contribué à mon succès universitaire.

Je remercie madame Martine Boisselle-Lessard, pour son aide et sa disponibilité tout au long de mon parcours dans la maîtrise en économique.

Je tiens enfin à remercier les membres du jury pour le temps et l'attention qu'ils ont apportés à ce mémoire.

DÉDICACE

À mon père, Gérard,
à ma mère, Danielle,
à mon conjoint, Sylla,
et à ma belle famille,
qui me portent et me guident au quotidien par leur amour
inconditionnel, leur force, leur humour et leur confiance.

À la Chaire Ivanhoé Cambridge d'immobilier,
à sa titulaire, madame Andrée De Serres,
et à madame Hélène Sicotte,
qui m'offrent un cadre d'apprentissage inestimable et me
transmettent tout au long de mon parcours universitaire
leurs nombreuses connaissances et qualités humaines.

À mon directeur de recherche, monsieur Charles Séguin,
qui m'a accompagné au cours de cette recherche par ses
nombreux conseils, sa disponibilité, sa bienveillance et sa
patience à mon égard.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
DÉDICACE.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	ix
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	x
RÉSUMÉ	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE DE LA RECHERCHE.....	4
1.1 L'importance des changements climatiques : l'urgence d'agir	4
1.2 L'état législatif et réglementaire se resserre pour faire face aux changements climatiques	5
1.3 Le secteur des transports est une source majeure d'émission de GES	6
1.4 La possibilité de réduire les émissions de GES du secteur du transport est importante dans les villes.....	7
1.5 La principale source d'émission de GES du secteur du transport provient des véhicules individuels..	7
1.6 L'efficacité des transports en commun pour réduire les émissions de GES ne fait pas consensus au sein de la littérature sur le sujet.....	8
1.7 Présentation du sujet de recherche	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	11
2.1 Analyse des tendances bibliographiques de la littérature.....	11
2.2 Les effets directs des transports en commun sur les émissions de GES d'une ville	11
2.2.1 Les transports en commun permettent de réduire la congestion routière	12
2.2.2 L'intensité en carbone des transports en commun est plus faible que celle des véhicules individuels.....	13
2.2.3 Les transports en commun modifient les choix en transport des individus et permettent de réduire les kilomètres parcourus lors de leurs déplacements.....	16
2.3 Les effets indirects des transports en commun sur les émissions de GES d'une ville	17
2.3.1 Le transport et l'environnement bâti sont interdépendants	18
2.3.1.1 Arguments empiriques justifiant une diminution des émissions de GES.....	18
2.3.1.2 Arguments empiriques justifiant un accroissement des émissions de GES	19

2.3.2	Les transports en commun induisent des processus de changements sociaux, politiques, économiques et environnementaux complexes au sein de leur environnement bâti	20
2.3.2.1	Arguments empiriques justifiant une diminution des émissions de GES	21
2.3.2.2	Arguments empiriques justifiant un accroissement des émissions de GES	22
2.4	Le cas de la Canada Line à Vancouver : particularités	24
2.5	Études préalables sur l'évaluation de l'impact de la Canada Line : méthodologies et résultats obtenus.....	27
2.6	Contribution de la recherche : le contrôle synthétique comme outil méthodologique d'évaluation de l'impact d'une politique publique.....	30
2.7	Limites du sujet de recherche	32
2.8	Résultats attendus de la recherche	32
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE		34
3.1	Présentation de la méthode du contrôle synthétique	34
3.2	Formalisation du modèle.....	38
CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES DONNÉES.....		42
4.1	Description des bases de données	42
4.1.1	Taux de croissance annuel des émissions de GES à Vancouver	42
4.1.2	Données composant la matrice des variables explicatives du groupe de contrôle.....	43
4.1.3	Traitement des données manquantes	45
4.2	Visualisation des données	46
4.2.1	Taux de croissance annuel des émissions de GES à Vancouver	46
4.2.2	Données composant la matrice des variables explicatives du groupe de contrôle.....	49
4.3	Statistiques descriptives des données du modèle.....	51
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		56
5.1	Précisions sur la programmation du modèle.....	56
5.2	Présentation des résultats.....	57
5.3	Inférence	60
CHAPITRE 6 DISCUSSION.....		63
6.1	Interprétation des résultats.....	63
6.2	Recommandations pour les politiques publiques	66
6.3	Limites de l'étude	68
6.4	Implications pour les futures recherches	69
CONCLUSION		71
ANNEXE A ÉVOLUTION TEMPORELLE DES ARTICLES PUBLIÉS SUR LE SUJET		74

ANNEXE B PUBLICATION DES ARTICLES SUR LE SUJET SELON LES PAYS.....	75
ANNEXE C PUBLICATION DES ARTICLES SUR LE SUJET PAR DISCIPLINES.....	76
ANNEXE D LE CYCLE DE RÉTROACTION DE L'INTERDÉPENDANCE ENTRE L'ENVIRONNEMENT BÂTI ET LES TRANSPORTS.....	77
ANNEXE E CARTE DU TRACÉ DE LA CANADA LINE	78
ANNEXE F GRAPHIQUES DES DONNÉES EN VARIATION COMPOSANT LA MATRICE DES VARIABLES EXPLICATIVES.....	79
ANNEXE G RÉSULTAT DE LA PROCÉDURE D'OPTIMISATION AVEC L'AJOUT DES CONTRÔLES DE FAISABILITÉ ET D'OPTIMALITÉ	80
ANNEXE H RÉSULTATS DU CONTRÔLE SYNTHÉTIQUE SUR LE LOGICIEL MATLAB	81
ANNEXE I SPÉCIFICATIONS DU CONTRÔLE SYNTHÉTIQUE AYANT ÉTÉ TESTÉES	82
ANNEXE J MATRICE DES ENJEUX DE LA MISE EN SERVICE D'UNE INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT EN COMMUN	83
BIBLIOGRAPHIE	84

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1 : Graphique des données de la variable dépendante	48
Figure 4.2 : Graphique des données composant la matrice des variables explicatives	51
Figure 5.1 : Résultat du contrôle synthétique sur le logiciel R.....	59
Figure 5.2 : Écart entre le Vancouver synthétique et le Vancouver empirique	59
Figure 5.3 : Effets placebo temporels pour chaque ville du groupe de contrôle.....	61
Figure 5.4 : Effets placebo spatiaux pour chaque ville du groupe de contrôle.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Comparaison de l'efficacité énergétique et de l'intensité en carbone de différents types de transport pour chaque mile parcouru par passager	13
Tableau 2.2 : Comparaison du pourcentage d'augmentation des émissions de GES entre la phase d'exploitation et l'ensemble des phases du cycle de vie de différents types de transport	15
Tableau 2.3 : Comparaison des kilomètres par passager effectués avec un kilogramme de GES émis selon différents types de transport	16
Tableau 4.1 : Statistiques descriptives des données	53
Tableau 4.2 : Coefficients de corrélation entre la variable dépendante des villes contrôles et de la ville traitée.....	54
Tableau 4.3 : Coefficients de corrélation entre la variable dépendante et les variables explicatives par ville	55
Tableau 5.1 : Répartition des poids du contrôle synthétique dans le groupe de contrôle.....	58

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ATGV : Autorité des Transports du Grand Vancouver

CCMM : Chambre de commerce du Montréal métropolitain

COP-21 : 21e Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

COVID-19 : Maladie à coronavirus

EMU : Electric multiple-unit

ESG UQAM : École des Sciences de la Gestion de l'Université du Québec à Montréal

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IEA : Agence internationale de l'énergie

MSPE : Erreur quadratique moyenne de prédiction

OMS : Organisation mondiale de la Santé

PIB : Produit intérieur brut

REM : Réseau express métropolitain

UBC : Université de Colombie-Britannique

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

g/CO₂ : Gramme de CO₂

kg/CO₂ : Kilogramme de CO₂

km : Kilomètre

km/passager : Kilomètre par passager

kW/h : Kilowatt-heure

GWh : Gigawatt-heure

TJ : Térajoule

Mt : Mégatonne

τ : Tau

RÉSUMÉ

Le secteur du transport est un vecteur de changements considérable pour répondre aux enjeux de durabilité et de résilience de nos sociétés. Il s'agit du deuxième secteur émettant le plus de GES au Canada, dont une large part découle de l'usage des voitures individuelles. Pour limiter leur circulation, le développement d'infrastructure de transport en commun est un moyen efficace. Cependant, de telles infrastructures engendrent des effets indirects sur les émissions de GES en raison de leur interdépendance avec le tissu urbain et ses caractéristiques socio-économiques. Ce mémoire de recherche vise ainsi à évaluer l'impact de la mise en service d'une infrastructure de transport en commun sur l'évolution dans le temps des émissions de GES d'une ville. Le cas de la Canada Line du SkyTrain de Vancouver a été analysé. Le contrôle synthétique est la méthodologie retenue pour effectuer cette étude. C'est l'une des contributions de cette recherche à la littérature existante, dont les études n'évaluent généralement que les effets directs d'une infrastructure de transport à partir des émissions évitées par le transfert modal de passagers. La collecte des données analysées a été effectuée sur les bases de données ouvertes de villes canadiennes et de Statistique Canada. Il s'agit des émissions de GES en équivalent CO₂, du PIB, des revenus de la taxe sur l'essence et les carburants, des investissements en construction, du nombre d'habitants et de leurs habitudes de transport dans les villes du groupe de contrôle. Les résultats montrent que la mise en service de la Canada Line a engendré une augmentation d'environ 8,6 % des émissions de GES de Vancouver en 2011. Cette hausse pourrait s'expliquer par le redéveloppement des quartiers autour des stations de l'infrastructure au détriment de leur embourgeoisement, accentuant l'étalement urbain. Pour qu'un investissement dans un moyen de transport durable réduise efficacement les émissions de GES sur le long terme, les interactions entre le transport, l'immobilier et les caractéristiques socio-économiques d'un environnement bâti devraient être prises en compte. Des études avec davantage de précision spatiale permettraient de mieux comprendre l'imbrication des changements sociaux, économiques et environnementaux générés par une infrastructure de transport et affectant les émissions de GES d'une ville.

Mots clés : Émissions de gaz à effet de serre; infrastructure de transport en commun; mobilité durable; immobilier durable; ville durable; contrôle synthétique; changements climatiques.

ABSTRACT

The transportation industry is a vector of important change to meet the challenges of sustainability and resilience of our societies. It is the second largest GHG emitting sector in Canada, a large proportion of which comes from the use of private cars. To limit their circulation, the development of public transit infrastructure is an effective way. However, such infrastructure has indirect effects on GHG emissions due to its interdependence with the urban fabric and its socio-economic characteristics. This research paper aims to evaluate the impact of the commissioning of a public transit infrastructure on the evolution of a city's GHG emissions over time. The case of the Vancouver SkyTrain's Canada Line was analyzed. The methodology used to carry out this study is a synthetic control. This is one of the contributions of this research to the existing literature, whose studies generally only assess the direct effects of a transport infrastructure from the emissions avoided by the modal shift of passengers. The data analyzed was collected from the open databases of Canadian cities and Statistics Canada. These include GHG emissions in CO₂ equivalent, GDP, gasoline and fuel tax revenues, construction investments, number of inhabitants and their transportation habits in the cities in the control group. The results show that the introduction of the Canada Line resulted in an increase of approximately 8.6% in Vancouver's GHG emissions in 2011. This increase could be explained by the redevelopment of neighborhoods around infrastructure stations to the detriment of their gentrification, accentuating urban sprawl. For an investment in sustainable transportation to effectively reduce GHG emissions over the long term, the interactions between transportation, real estate and the socio-economic characteristics of a built environment should be considered. Studies with more spatial precision would provide a better understanding of the interweaving of social, economic, and environmental changes generated by transportation infrastructure and affecting a city's GHG emissions.

Keywords : Greenhouse gas emissions; public transportation infrastructure; sustainable mobility; sustainable real estate; sustainable city; synthetic control; climate change.

INTRODUCTION

Les changements climatiques font partie des enjeux mondiaux actuels majeurs et soulèvent de nombreux défis pour les décennies à venir puisqu'ils engendrent de sévères retombées tant sur les aspects sociaux, économiques, qu'environnementaux. En conséquence, plusieurs engagements politiques nationaux et internationaux ont été pris et les cibles fixées pour limiter et s'adapter aux changements climatiques sont toujours plus ambitieuses. À titre d'exemple, le Canada s'est engagé à réduire d'ici 2030 ses émissions de gaz à effet de serre (GES) de 40 % à 45 % par rapport au niveau de 2005¹. Pour y arriver, il est cependant nécessaire de comprendre la source de ces émissions de GES et d'identifier les leviers permettant de les diminuer.

Le secteur du transport est le quatrième secteur contribuant le plus aux émissions de GES mondiales. Au Canada, il s'agit du deuxième secteur émettant le plus de GES après celui de l'énergie². Le secteur du transport est néanmoins un secteur essentiel au développement économique et à la qualité de vie des individus. Dans un effort de réduire les émissions de GES du transport, le transport en commun s'est avéré être un moyen efficace (Condon et Dow, 2011; Nolon et Bacher, 2007; Xu, 2005). L'intérêt croissant de la part des villes pour investir dans des projets de transport en commun marque leur volonté de devenir plus durables et résilientes en limitant l'utilisation de l'automobile individuelle et en réaménageant leur territoire autour d'un développement urbain axé sur l'utilisation des transports en commun (Bleviss, 2020; Dittmar et Ohland, 2012; Bernick et Cervero, 1997). Toutefois, il est important d'évaluer l'impact direct, mais aussi indirect des investissements dans les systèmes de transports en commun sur les émissions de GES, notamment sur le long terme, en prenant en compte les multiples changements qu'ils génèrent dans le tissu urbain des villes (Profillidis *et al.*, 2014). Bien que distincts, le transport et l'immobilier sont en effet intrinsèquement liés, car si les individus se déplacent, c'est bien souvent pour se rendre d'un immeuble à un autre (Maldini, 2019; Cervero, 2013; De Colli, 2013).

D'après le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le transport et les immeubles représentent respectivement 23 % et 21 % des émissions de GES au niveau

¹ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html#>

² <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/sources-puits-sommaire-2022.html#s-5>

planétaire³ (IPCC, 2023). Au Canada, les émissions de GES du secteur du transport et de l'immobilier ont respectivement augmenté de 27 % et de 21 % de 1990 à 2021⁴. Ces pourcentages sont encore plus élevés dans les villes. À Vancouver, ville réputée la plus verte du monde⁵, les transports et les bâtiments représentent respectivement 40 % et 55 % des émissions de GES⁶.

Ce mémoire a ainsi pour objectif d'évaluer l'impact d'une infrastructure de transport en commun sur l'évolution dans le temps des émissions de GES d'une ville, en étudiant le cas de la mise en service de la Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver.

Un impact se définit comme l'effet d'un système sur une variable mesurée ou sur d'autres systèmes. Dans le cas des transports, cela signifie par exemple les effets des véhicules, des moyens de transport ou des systèmes de transport sur la société, la nature et l'environnement bâti. L'impact peut être décrit sous diverses formes, depuis les effets directs et à court terme jusqu'aux effets indirects et à long terme (Rohács et Rohács, 2018). Une infrastructure de transport en commun désigne l'ensemble des installations et des bâtiments nécessaires à l'exploitation, la circulation et l'usage de l'infrastructure. Les GES sont des gaz présents dans l'atmosphère, qui absorbent le rayonnement infrarouge et contribuent à l'effet de serre. Ces gaz sont majoritairement composés de dioxyde de carbone (CO₂), même si d'autres gaz existent en moindre quantité.

La méthodologie du contrôle synthétique (Abadie, 2021) a été employée dans le but de répondre à l'objectif de ce mémoire. Une ville synthétique de Vancouver, dans laquelle la Canada Line n'a pas été mise en service, a ainsi été conçue afin de comparer ses émissions de GES à la ville empirique de Vancouver. L'usage de cette méthodologie constitue l'une des contributions de cette recherche à la littérature existante sur le sujet puisque les études préalablement effectuées sur de tels problèmes n'estiment souvent que les

³ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter09.pdf;
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter10.pdf

⁴ <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmental-indicators/greenhouse-gas-emissions.html>

⁵ <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/752890/vancouver-plan-vert-bilan-photoreportage>

⁶ <https://vancouver.ca/green-vancouver/transportation.aspx>; <https://vancouver.ca/green-vancouver/buildings.aspx>

émissions dues au transfert modal des passagers (Soni et Chandel, 2018; Van Sang, 2015; Poudenx et Merida, 2011; Litman, 2007).

Les données analysées dans cette étude ont été collectées sur les bases de données en libre accès de plusieurs villes canadiennes et de Statistique Canada. Il s'agit de la variation annuelle des émissions de GES en équivalent CO₂, du PIB, des revenus de la taxe sur l'essence et les carburants, des investissements en constructions résidentielles et non résidentielles, des habitudes de transport des habitants et du nombre d'habitants de chacune des villes du groupe contrôle établi. Un effort systématique a été fait pour contrôler les principaux effets extrinsèques sur les émissions de GES. Par exemple, la ville de Vancouver fournit des efforts mondialement reconnus pour devenir exemplaire en régulant les activités émettrices et devenir elle-même une ville sobre en carbone.

Les résultats de la présente recherche sont statistiquement significatifs avec une marge d'erreur de 10 %, mais ils sont contre-intuitifs. Ils montrent que la mise en service de la Canada Line à Vancouver a engendré une augmentation des émissions de GES de la ville de 244 000 tonnes de CO₂ après sa mise en service, soit près de 8,6 % des émissions de GES de la ville en 2011, par rapport à ce qu'aurait été la valeur des émissions de GES de Vancouver en l'absence de la mise en service de la Canada Line estimée par le contrôle synthétique. Cette hausse pourrait notamment s'expliquer par l'accroissement de l'étalement urbain qu'engendre une nouvelle infrastructure de transport en commun (Mattioli, 2014; Wegener, 2021; Holz-Rau et Scheiner, 2019). Le redéveloppement urbain des quartiers aux alentours des stations de la ligne de transport favorisant des quartiers complets et compacts au détriment de leur embourgeoisement accentuerait aussi le déplacement des individus aux faibles revenus vers des zones périphériques du noyau urbain (Jones et Ley, 2016; Devries, 2016; Ngo, 2012; Au, 2007; Quastel, 2013; Barla, 2011; Grube-Cavers et Patterson, 2018; Rice, 2020).

Dans cette perspective, le chapitre suivant présente tout d'abord des éléments issus de la revue de littérature sur le sujet. La méthodologie employée ainsi que les données utilisées dans le modèle sont ensuite présentées au chapitre 2. Les résultats et la discussion de ces derniers sont finalement exposés dans les derniers chapitres avant la conclusion et la liste des références.

CHAPITRE 1

CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Ce chapitre vise à contextualiser la recherche pour souligner les motivations et l'intérêt du sujet étudié à l'égard des enjeux actuels auxquels fait face la société.

1.1 L'importance des changements climatiques : l'urgence d'agir

Les changements climatiques sont en grande partie causés par l'augmentation exponentielle de la quantité d'émission de GES dans l'atmosphère terrestre, en particulier depuis le début de l'ère industrielle et du développement économique qui s'en est suivi ⁷ (IPCC, 2023). Les GES d'origine humaine sont majoritairement composés de dioxyde de carbone (CO₂), bien que d'autres gaz existent en moindre quantité et détiennent un potentiel de réchauffement plus important comme le méthane (CH₄) ou encore le protoxyde d'azote (N₂O). Le GES d'origine naturelle le plus présent dans l'atmosphère est la vapeur d'eau (H₂O). Ces gaz permettent d'avoir une température adéquate à la survie de l'être humain dans des quantités raisonnables⁸. Toutefois, une concentration trop élevée en GES dans l'atmosphère peut causer une rétention plus importante de la chaleur émise par les rayons infrarouges à la surface de la planète Terre à cause de l'effet de serre⁹. Dès lors, ces gaz peuvent causer de sévères dérèglements dans l'équilibre des écosystèmes alors que ces derniers fournissent des services de régulation cruciaux pour nos sociétés. Les conséquences des changements climatiques sont nombreuses et interdépendantes. Elles affectent, entre autres, la sécurité alimentaire et hydrique, la santé humaine, les économies, l'équité ainsi que la paix sociale tout en engendrant des pertes et dommages irréversibles pour la nature, incluant les êtres humains (IPCC, 2023). Selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), les changements climatiques sont responsables d'au moins 150 000 décès par an. Ce chiffre devrait doubler d'ici à 2030¹⁰. En outre, la Banque mondiale estime que les investissements pour subvenir aux besoins liés aux changements climatiques

⁷ https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

⁸ La température à la surface de la planète Terre serait d'en moyenne -18 °C sans la présence de GES dans l'atmosphère

⁹ <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/questce-ges.htm>

¹⁰ <https://www.un.org/fr/chronicle/article/les-effets-du-rechauffement-climatique-sur-la-sante-les-pays-en-developpement-sont-les-plus#:~:text=L%27Organisation%20mondiale%20de%20la,Maladies%20infectieuses.>

s'établissent entre 1200 et 1700 milliards de dollars canadiens par an d'ici à 2030¹¹. À titre d'exemple, cela représente le PIB annuel d'un pays comme la Corée du Sud ou encore l'Australie pour l'année 2022¹². Les émissions de GES sont un exemple d'externalité environnementale que les marchés seuls échouent généralement à résoudre sans intervention gouvernementale. De nombreux scientifiques cherchent ainsi à éveiller les consciences et à susciter la responsabilité des gouvernements et des multiples acteurs économiques sur l'urgence d'agir.

1.2 L'état législatif et réglementaire se resserre pour faire face aux changements climatiques

Plusieurs accords internationaux ont été signés entre les pays en vue de limiter et de s'adapter aux changements climatiques. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, ratifiée par le Canada en 1992 lors du Sommet Planète Terre à Rio de Janeiro et ayant donné lieu au protocole de Kyoto, en est un exemple. Le protocole de Kyoto a été ratifié par le Canada en 2002 et prévoyait une cible de réduction des émissions de GES du pays de 6 % en moyenne par rapport au niveau de 1990 sur la période de 2008 à 2012¹³ (Gouvernement du Canada, 2021). Le Canada s'est cependant retiré de l'accord en 2011. À l'occasion de l'Accord de Paris, négocié en 2015 durant la 21e Conférence des parties (COP-21) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et reposant sur des objectifs fixés au niveau national ainsi que sur l'engagement des pays à les atteindre, le Canada avait indiqué qu'il réduirait ses émissions de GES de 30 % par rapport au niveau de 2005, et ce, d'ici à 2030¹⁴. Plus récemment, au terme du Sommet des dirigeants sur le climat des États-Unis organisé en avril 2021, le Canada s'est engagé à réduire d'ici à 2030 ses émissions de GES de 40 % à 45 % par rapport au niveau de 2005¹⁵. Pour y arriver, le gouvernement du Canada a adopté la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* en juin 2021 et a publié en mars 2022 le *Plan de réduction des émissions du Canada pour 2030*¹⁶. Afin de suivre l'accomplissement de ses objectifs, le Canada publie chaque année *L'inventaire*

¹¹ <https://www.banquemondiale.org/fr/news/feature/2023/03/13/what-you-need-to-know-about-how-ccdrs-estimate-climate-finance-needs>

¹² https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?most_recent_value_desc=true

¹³ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/campagnes/50-ans-action-environnementale/eccc-chronologie/changement-climatique.html>

¹⁴ https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/sds_fs_f_41101.html#

¹⁵ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2021/07/le-gouvernement-du-canada-confirme-sa-nouvelle-cible-ambitieuse-de-reduction-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre.html>

¹⁶ <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/survol-plan-climatique.html>

officiel national de gaz à effet de serre du Canada, suivant les lignes directrices du GIEC éditées en 2006 et révisées en 2019¹⁷. Cet inventaire fait, entre autres, état des secteurs d'activités les plus polluants.

1.3 Le secteur des transports est une source majeure d'émission de GES

Le secteur du transport est le deuxième secteur émettant le plus de GES après celui de l'énergie au Canada, contribuant à hauteur de 28 % des émissions totales du pays¹⁸. Cependant, ce chiffre doublerait si les émissions de GES engendrées par la production de l'énergie et son acheminement étaient prises en compte (Elkind, 2022). De surcroît, il est estimé que les émissions de GES du secteur du transport ont augmenté de 27 % entre 1990 et 2021¹⁸. La croissance démographique du Canada, en augmentation de 5,2 % entre 2016 et 2021¹⁹ notamment dans les grands centres urbains, devrait amplifier la contribution de ce secteur aux émissions de GES nationales (Rodrigue *et al.*, 2009). En France, le secteur du transport constitue la principale source d'émission de GES du pays et compte pour 31 % des émissions de GES françaises, un chiffre resté stable, car l'amélioration de la performance environnementale des véhicules ne compense pas l'augmentation de la circulation²⁰. Aux États-Unis, ce secteur compte pour 29 % des émissions de GES du pays et une augmentation de 10 % de ces émissions est attendue d'ici à 2035²¹. En outre, le secteur du transport est devenu la principale source d'émission de GES des États-Unis en 2016, devant le secteur de l'énergie, et constitue sa première cause de dépendance au pétrole (Greene, 2010). À l'échelle mondiale, le secteur du transport émet près d'un quart des émissions de GES totales, ce qui en fait le quatrième secteur le plus polluant d'après le GIEC²². Par ailleurs, ce secteur génère également de nombreuses externalités environnementales dont l'étude est d'autant plus complexe en raison de leurs nombreuses interactions avec les dimensions sociales et économiques d'un environnement bâti (Profillidis *et al.*, 2014). Le transport est donc un des leviers par lequel les différents paliers gouvernementaux peuvent atteindre

¹⁷ https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/En81-4-2021-1-fra.pdf

¹⁸ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html#transports>

¹⁹ <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220209/dq220209a-fra.htm>

²⁰ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-des-transport>

²¹ <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>

²² https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter09.pdf

leur cible de réduction de GES, en particulier après la crise sanitaire de la COVID-19 et l'intérêt des politiques publiques d'investissement pour une relance économique se voulant plus durable.

1.4 La possibilité de réduire les émissions de GES du secteur du transport est importante dans les villes

Le potentiel de réduction des émissions de GES du secteur du transport est particulièrement important dans les villes, car il est souvent à l'origine de la majorité de leurs sources d'émission de GES et que 74 % de la population canadienne vivent dans les grands centres urbains²³. À Vancouver, le transport est à l'origine de 40 % des GES émis par la ville²⁴. Le même constat peut être réalisé à Montréal, où le transport routier est la plus importante source d'émission de GES de la ville comptabilisant 43 % de ses émissions totales²⁵. En Chine, le transport émet jusqu'à 65 % des émissions de GES dans les grandes villes comme celle de Shenzhen (Elkind, 2022). Pour contribuer à réduire efficacement les émissions de GES du secteur du transport, la première étape est d'identifier les sources de réduction des émissions de GES qui soient efficaces sur le long terme et de comprendre quels mécanismes peuvent être mis en place pour soutenir cette réduction.

1.5 La principale source d'émission de GES du secteur du transport provient des véhicules individuels

Les émissions de GES des véhicules légers individuels représentent près de 60 % des émissions totales du secteur des transports (Bleiviss, 2020). Au Canada, les émissions de GES engendrées par le déplacement des individus en 2021 s'élèvent à près de 57 % des émissions de l'ensemble du secteur du transport, dont 30 % sont liées uniquement aux voitures individuelles²⁶. Les véhicules individuels routiers émettaient déjà en 2004 au Canada plus de GES que n'importe quel autre mode de transport en commun ou bien que des secteurs comme la construction résidentielle ou commerciale (Poudenx et Merida, 2011). De plus, le transport routier est le sous-secteur qui émet le plus d'émission de GES parmi celles produites par l'ensemble du secteur du transport à l'échelle globale (IEA, 2023)²⁷. En conséquence, l'accroissement d'une

²³ <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220209/dq220209b-eng.htm>

²⁴ <https://vancouver.ca/green-vancouver/transportation.aspx#:~:text=Nearly%2040%25%20of%20carbon%20pollution,we%20do%20need%20to%20drive>

²⁵ <https://montreal.ca/articles/mieux-se-deplacer-pour-moins-polluer>

²⁶ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html#transports>

²⁷ <https://www.iea.org/energy-system/transport>

offre de modes de transport plus durables, notamment par l'utilisation des transports en commun, apparaît être une solution viable pour réduire efficacement les émissions de GES des véhicules individuels (Shapiro, 2002). Toutefois, selon Devlin (2010), il y aurait deux types d'effets, directs et indirects, qui devraient être pris en compte lorsqu'il s'agit d'évaluer l'impact des transports en commun sur les émissions de GES d'une ville. Les effets directs se définissent par l'influence directe d'une variable indépendante sur une variable dépendante. Les effets indirects se définissent par l'influence d'une variable indépendante sur une variable dépendante par l'entremise d'une variable intermédiaire (Vahedi, 2021). Ensemble, ces deux types d'effets permettent de déterminer l'impact total d'une infrastructure de transport en commun sur les émissions de GES d'une ville, mais l'amplitude de cet impact est très discutée dans la littérature sur le sujet. C'est l'amplitude de cet impact total que ce mémoire cherche à évaluer.

1.6 L'efficacité des transports en commun pour réduire les émissions de GES ne fait pas consensus au sein de la littérature sur le sujet

Certaines recherches arrivent à la conclusion qu'investir et moderniser les moyens de transports durables tels que les transports en commun s'avère être une stratégie efficace afin de diminuer l'utilisation des véhicules individuels et par conséquent les émissions de GES du secteur du transport dans les villes (Litman, 2023; Bleviss, 2020). La planification urbaine autour du développement des transports en commun permettrait d'encourager l'usage de tels modes de transport et de réduire les distances parcourues par les individus (Cervero et Duncan, 2006), provoquant un changement dans les habitudes de transport de ces derniers qui privilégieraient des moyens de transports plus durables (Boarnet, 2011; Naess, 2011).

Toutefois, d'autres études mentionnent quant à elles que l'impact des transports en commun sur les émissions de GES d'une ville pourrait ne pas être aussi évident. Une méta-analyse économique menée sur les systèmes de transport en commun de plusieurs villes du monde a par exemple identifié que l'efficacité des transports publics d'une ville n'est pas systématiquement associée à de faibles coûts implicites de leurs émissions de CO₂, préconisant des études de cas pour mieux comprendre les particularités locales affectant les résultats (Tamaki *et al.*, 2019). Il a aussi été constaté en 2017 aux États-Unis que 82,6 % des déplacements se faisaient par l'usage d'une voiture individuelle, tandis que seuls 2,5 % des voyages s'effectuaient en transports en commun et 10,5 % à pied, et ce, malgré les investissements en matière de développement des transports en commun (tels que les bus, les métros, les trains de banlieue, ou encore les systèmes légers sur rail) (Bleviss, 2020). Similairement, une étude réalisée dans la ville de Shenzhen en

Chine a révélé que les émissions totales de CO₂ des transports publics de la ville entre 2005 à 2015 ont connu une croissance annuelle moyenne de plus de 10 %, illustrant l'efficacité limitée des modes de transport à faible émission qui ont été mis en place jusqu'à présent (Dong *et al.*, 2018). Pour qu'investir et développer des modes de transport durables permettent de façon efficiente d'atteindre des économies d'émission de GES, il serait ainsi nécessaire que ces modes de transport soient bien pensés et intégrés dans leur environnement urbain et social (Holz-Rau et Scheiner, 2019).

L'efficacité des transports en commun à réduire les émissions de GES serait ainsi affectée par de multiples facteurs, présentés plus en détail dans la revue de littérature sur le sujet, qu'il est possible de regrouper selon trois catégories : le comportement de déplacement des individus, l'environnement bâti ainsi que la technologie utilisée par le mode de transport (Liu *et al.*, 2017). Si la technologie utilisée pour faire fonctionner le transport affecte directement les émissions de GES de ce dernier, le comportement de déplacement des individus génère un effet direct sur leurs choix de transport et, de surcroît, les caractéristiques de l'environnement bâti ont aussi des effets directs sur les comportements de déplacement des individus. Ensemble, le comportement de déplacement des individus ainsi que l'environnement bâti impactent de façon indirecte les émissions de GES d'un transport en commun (Grazi et Van den Bergh, 2008). Par ailleurs, l'arrivée d'un nouveau mode de transport en commun dans un environnement urbain génère aussi des changements dans celui-ci ainsi que dans ses caractéristiques socio-économiques, entraînant du même coup un changement dans le comportement de déplacements des individus, ce qui provoque aussi des effets indirects sur les émissions de GES du transport en commun (Holz-Rau et Scheiner, 2019; Elkind, 2022).

1.7 Présentation du sujet de recherche

La présente recherche s'inscrit dans la continuité de cette discussion. Elle vise ainsi à étudier l'impact environnemental d'une politique publique de verdissement de la mobilité sur l'évolution de la quantité d'émission de GES émise par une ville. Plus spécifiquement, cette étude a pour principal objectif d'évaluer l'impact de la mise en service d'une infrastructure de transport en commun sur l'évolution dans le temps

des émissions de GES de la ville de Vancouver, en étudiant le cas du système de transport en commun appelé Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver²⁸.

Cette étude a bénéficié du soutien financier de la Chaire Ivanhoé Cambridge d'immobilier de l'ESG UQAM et s'inscrit dans le cadre d'un de ses programmes de recherche sur le bâtiment durable. Les résultats de cette étude ont contribué à évaluer l'impact de la mobilité durable, pierre angulaire en gestion des actifs immobiliers, sur les émissions de GES d'une ville.

²⁸ Un *SkyTrain* est un système de transport rapide sur rail utilisant un système de train automatisé circulant sur une voie aérienne. Il est le seul réseau de ce type entièrement automatisé (c'est-à-dire sans conducteur ni personnel pour superviser la circulation des trains et les échanges de voyageurs) au Canada.

<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/skytrain>;
https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_systèmes_de_métros_automatisés

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre vise à présenter des éléments de la revue de littérature ayant été réalisée sur le sujet pour mieux appréhender les processus sous-jacents au résultat que l'on cherche à estimer. Une présentation de l'étude de cas, des méthodologies et des résultats des recherches ayant déjà été réalisées sur le sujet, de la contribution de la présente étude à la littérature et des résultats attendus est soulignée.

2.1 Analyse des tendances bibliographiques de la littérature

La littérature portant sur l'évaluation de l'impact d'un transport en commun sur les émissions de GES d'une ville est large et est étudiée dans diverses disciplines. L'analyse de la littérature sur ce sujet a été réalisée en ayant recours à la base de données *Scopus* à l'aide de la combinaison suivante de mots clés : « public transport* » AND « greenhouse gases » OR « ghg emissions » OR « emissions » AND « city » AND « impact ». D'après cette analyse, l'intérêt sur ce sujet s'est amplifié depuis 1984 et les articles publiés ne cessent de se multiplier jusqu'à présent, atteignant un nombre de 80 articles publiés au cours de l'année 2021 (voir Annexe A). La majorité des recherches ont été réalisées en Chine ainsi qu'aux États-Unis (voir Annexe B). Les disciplines ayant le plus étudié le sujet sont les sciences de l'ingénierie, les sciences de l'environnement, les sciences sociales et les sciences de l'énergie. Les études en économie et en économétrie sur le sujet ne représentent qu'environ 2 % des articles publiés dans cette littérature (voir Annexe C).

La présente revue de littérature a été effectuée en essayant plusieurs combinaisons de mots clés, mais l'inclusion du terme « *SkyTrain* » à la combinaison présentée ci-dessus dans la base de données *Scopus*, en la complétant avec l'aide du moteur de recherche *Google Scholar*, a été la méthode qui s'est avérée être la plus pertinente et la plus efficace. Cette combinaison a permis le repérage d'une centaine d'articles dont 60 ont été retenus pour une analyse plus approfondie de leurs résultats. Les paragraphes suivants relatent les analyses de ces articles.

2.2 Les effets directs des transports en commun sur les émissions de GES d'une ville

Une augmentation de l'offre en transports en commun entraîne plusieurs effets directs sur les émissions de GES d'une ville. Ces effets peuvent notamment être évalués par le changement dans les choix des modes de transports empruntés par les individus pour effectuer leurs déplacements. Ce changement

permet de déterminer les émissions de GES évitées par l'utilisation des véhicules individuels au profit des transports en commun, ayant une plus grande capacité de transport de passagers, une meilleure efficacité énergétique, une intensité en carbone plus faible et permettant de réduire la distance parcourue par les véhicules individuels, le nombre en circulation de ces derniers ainsi que la congestion routière.

2.2.1 Les transports en commun permettent de réduire la congestion routière

La congestion routière des villes représente un poids considérable sur les émissions de GES du secteur du transport au Canada et engendre des coûts importants pour les finances publiques du pays. Il a été estimé que les coûts engendrés par la congestion au Canada (en termes de temps perdu par les heures de travail non effectuées et par les retards de livraison ou bien de quantité d'essence dépensée) s'élèvent à près de 4,6 milliards de dollars canadiens chaque année. La plus grande partie de ces coûts repose sur la congestion dans les régions de Toronto, de Montréal et de Vancouver (Urban Transportation Task Force, 2012). La seule région de Vancouver contribuait en 2011 à près de 17 % des coûts totaux générés par la congestion au Canada. Dans la région métropolitaine de Montréal, il a été évalué qu'une hausse de 3 % de la fréquentation des transports en commun permettrait une économie des coûts de congestion pour la région de 63,8 millions de dollars canadiens et correspondrait à une baisse de 54 000 tonnes de CO₂ par année²⁹ (CCMM, 2011). La congestion serait par ailleurs responsable d'une hausse du temps de transport des individus de 51 %, ce qui augmenterait les émissions de CO₂ associés aux déplacements des véhicules individuels de 53 % (Bharadwaj, 2016). Les trajets domicile-travail aux heures de pointe sont la principale cause de la congestion dans les villes (Falcocchio, 2015). Une étude de Statistique Canada parue en 2021 a permis d'évaluer que le passage à temps plein au télétravail dans l'ensemble du pays correspondrait à une réduction de 8,6 Mt de CO₂. Cela représente 11 % des émissions de GES attribuables au transport des Canadiens en 2015³⁰. Afin de réduire la congestion et les émissions de GES associées à l'usage des véhicules individuels, notamment lors des déplacements entre le lieu de domicile et le lieu de résidence, le développement des transports en commun apparaît être une des options les plus efficaces (Bleviss, 2020). Par rapport aux véhicules individuels, les transports en commun produiraient 45 % de CO₂ et 48 % de NO₂ en moins. Ils éviteraient également 95 % des émissions de CO (monoxyde de carbone), un GES aux effets indirects importants sur les changements climatiques (Shapiro, 2002).

²⁹ https://www.cmm.ca/documents/etudes/2010_2011/10_11_26_cmm_etude-transport_fr.pdf

³⁰ <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/36-28-0001/2021004/article/00005-eng.htm>

2.2.2 L'intensité en carbone des transports en commun est plus faible que celle des véhicules individuels

L'intensité en carbone est un indicateur qui permet de comparer l'efficacité des transports en commun à réduire les émissions de GES du secteur du transport par rapport aux véhicules individuels. Il s'agit du rapport entre le taux d'émission de carbone et la quantité d'énergie utilisée pour faire fonctionner un véhicule. Cet indicateur varie selon les types de véhicule et les sources d'énergie qu'ils utilisent. Cet indicateur est plus faible pour les modes de transport ayant la capacité de transporter un grand nombre de passagers en utilisant une source d'énergie propre ou renouvelable à l'instar de l'hydroélectricité.

Le Tableau 2.1 présente une comparaison des valeurs de l'efficacité énergétique (exprimée en kW/h) et de l'intensité en carbone (exprimée en g/CO₂) de différents types de transport pour chaque mile parcouru par passager dans la région de Vancouver. D'après cette comparaison, le *SkyTrain* est le deuxième mode de transport en commun le plus efficace énergétiquement derrière le tramway. Il détient une efficacité énergétique près de deux fois supérieure à un véhicule individuel tel qu'une Toyota Prius. En outre, en posant l'hypothèse que la source d'énergie utilisée pour faire fonctionner les transports électriques est l'hydroélectricité, émettant 4 g/CO₂ pour chaque kWh produit (Spadaro, 2000), l'intensité en carbone d'un *SkyTrain* serait 125 fois inférieure à celle d'un véhicule individuel tel qu'une Toyota Prius.

Tableau 2.1 : Comparaison de l'efficacité énergétique et de l'intensité en carbone de différents types de transport pour chaque mile parcouru par passager

	<i>Types de transport</i>	<i>Efficacité énergétique du véhicule pour chaque mile parcouru par passager (en kW/h)</i>	<i>Intensité en carbone du véhicule pour chaque mile parcouru par passager (en g/CO₂) (source d'énergie : hydroélectricité)</i>
Véhicules individuels	Ford Explorer	1,42 kW/h	370,9 g/CO ₂
	Toyota Prius	0,64 kW/h	167,9 g/CO ₂
Transports en commun	Bus articulé fonctionnant au diesel	0,56 kW/h	188,9 g/CO ₂
	Bus électrique	0,36 kW/h	1,60 g/CO ₂
	SkyTrain	0,30 kW/h	1,34 g/CO ₂
	Tramway moderne	0,11 kW/h	0,45 g/CO ₂

Source : Condon et Dow, 2011

D'autres études, menées également dans la région de Vancouver, vont dans ce sens en estimant que l'intensité moyenne d'émission de carbone d'un véhicule individuel s'élève à 220 g/CO₂ comparativement

à celles d'un bus électrique et d'un *SkyTrain*, estimées respectivement à 2,5 g/CO₂ et 2,4 g/CO₂ (Poudenx et Merida, 2007). Par ailleurs, d'autres chercheurs ont estimé qu'en Ontario un métro aurait une intensité d'émission en carbone moyenne de 21 g/CO₂, alors qu'elle serait de 91 g/CO₂ pour un bus fonctionnant au gaz naturel et de 184 g/CO₂ pour un véhicule individuel (Wang, 2018). En moyenne, un trajet en transport en commun (tel qu'en bus, en train, en métro ou en tramway) serait près de 8 fois plus écoénergétique avec une intensité d'émission de carbone moyenne de 16,3 kg/CO₂, comparativement à 129,6 kg/CO₂ pour un véhicule individuel, évaluée sur un trajet domicile-travail d'un individu effectuant deux kilomètres (aller-retour) au cours d'une année de travail (215 jours) (Aguiléra et Voisin, 2014).

Il faut aussi noter qu'une étude sur les implications économiques et environnementales de l'électrification d'un parc de bus publics en Australie suggère qu'un tel investissement effectué avant 2022 entraînerait une réduction de 74 % des émissions de gaz à effet de serre pendant la phase opérationnelle, par rapport à un parc de bus fonctionnant au diesel (Say *et al.*, 2023). Malgré un coût d'investissement initial élevé, celui-ci serait rentabilisé sur une exploitation à long terme du parc. Toutefois, parmi les émissions de GES produites tout au long du cycle de vie d'un véhicule, une part importante de ces émissions est associée à la fabrication et à l'entretien des véhicules, à la construction d'infrastructures ainsi qu'à leur entretien et à la production de carburant. Le Tableau 2.2 présente le pourcentage d'augmentation des émissions de GES entre la phase d'exploitation et l'ensemble des phases du cycle de vie de différents types de transport. D'après cette comparaison, le *SkyTrain* est le mode de transport qui émet le plus de GES si l'on considère l'ensemble des phases de son cycle de vie³¹.

³¹ Ces phases incluent l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux et leur assemblage, la construction de l'infrastructure ainsi que son entretien et son maintien, ou encore la source d'énergie utilisée pour faire fonctionner l'infrastructure. Cependant, la phase de fin de vie, dont la déconstruction, le recyclage des déchets et la démolition, n'est pas prise en compte dans ces estimations.

Tableau 2.2 : Comparaison du pourcentage d'augmentation des émissions de GES entre la phase d'exploitation et l'ensemble des phases du cycle de vie de différents types de transport

<i>Types de transport</i>	<i>Proportion de GES émis sur l'ensemble des phases du cycle de vie du transport par rapport à la phase d'exploitation</i>
Voiture individuelle	Émissions de 47 à 65 % supérieures à la phase d'exploitation
Bus fonctionnant au diesel	Émissions 43 % supérieures à la phase d'exploitation
Véhicule sur rails de type tramway	Émissions 39 % supérieures à la phase d'exploitation
Véhicule sur rails de type SkyTrain	Émissions 150 % supérieures à la phase d'exploitation

Source : Chester, 2008

Ces résultats sont dus en particulier à la quantité de béton nécessaire dans le processus de production des matériaux de construction d'une infrastructure de transport tel qu'un *SkyTrain* (Jiangying, 2011). Ce constat dépend toutefois de l'énergie utilisée lors de la phase d'exploitation de l'infrastructure, dont la traction et le chauffage sont aussi des sources importantes d'émission de GES (Del Pero, 2014). En ce sens, une étude réalisée en Inde, dont le mix énergétique est principalement composé de charbon et de pétrole, a constaté que l'effet net de la mise en service du métro a entraîné une augmentation des émissions de GES de la ville. À cause de sa source énergétique, l'électricité utilisée pour exploiter le métro engendrait davantage d'émission de GES que celles évitées par le changement des habitudes de transport des individus privilégiant le métro à leur véhicule (Soni et Chandel, 2018). Les émissions de GES engendrées par ce projet de métro sont encore plus importantes lorsqu'on considère le besoin de complémentarité et de fluidité entre les différents modes de transports. L'afflux de bus (fonctionnant au diesel) et de véhicules individuels pour transporter les individus vers les stations de la ligne de métro a ainsi contribué à la hausse des émissions de GES de cette infrastructure de transport en commun.

L'analyse de la consommation d'énergie ainsi que des émissions de GES de tous les véhicules privés et de transport en commun de la Lower Fraser Valley (région de Vancouver), dont la source principale d'énergie est l'hydroélectricité, a permis de déterminer que les bus électriques et le *SkyTrain* automatisé sont huit fois plus écoénergétiques que les véhicules privés et 100 fois plus efficaces en termes d'émission de GES par kilomètre par passager (Poudenx et Merida, 2007). L'ajout à ce calcul de l'électricité requise pour le fonctionnement des stations de l'infrastructure du *SkyTrain* la garde six fois supérieur en termes d'efficacité

d'émission de GES par rapport aux véhicules individuels. Le Tableau 2.3 compare les kilomètres par passager que permet d'effectuer un kilogramme de GES émis selon différents modes de transport. D'après cette comparaison, le *SkyTrain* est le mode de transport qui permet d'effectuer le plus de kilomètres par passager avec une émission d'un kilogramme de GES.

Tableau 2.3 : Comparaison des kilomètres par passager effectués avec un kilogramme de GES émis selon différents types de transport

<i>Types de transport</i>	<i>Kilomètres par passager effectués avec un kilogramme de GES émis</i>
Voiture individuelle	5 km/passager
Bus fonctionnant au diesel	10 km/passager
Bus électrique	401 km/passager
SkyTrain	428 km/passager

Source : Poudenx et Merida, 2007

D'autres résultats confirment ces données et relatent aussi que les émissions de GES des trains légers sont plus faibles comparativement à celles des bus fonctionnant au diesel et des véhicules individuels (Del Pero, 2014). En contrepartie de cette efficacité, il est à noter que le *SkyTrain* fait partie des transports en commun les plus chers en termes de kilomètre par passager parcouru à cause de l'investissement initial qu'il requiert (Condon et Dow, 2011).

2.2.3 Les transports en commun modifient les choix en transport des individus et permettent de réduire les kilomètres parcourus lors de leurs déplacements

Il a été démontré que les services de transport en commun permettent de réduire à la fois le nombre de véhicules privés et les kilomètres parcourus par les individus, promettant ainsi un haut potentiel de réduction d'émission de GES (Nahlik et Chester, 2014). Dans la région métropolitaine de Toronto, les transports en commun émettraient seulement 4 % des émissions de GES dues aux déplacements des individus alors qu'ils totaliseraient 32 % des km/passager effectués quotidiennement (Wang, 2018). En outre, il a été établi qu'une augmentation de 1 % de l'usage des transports en commun dans l'ensemble de la province de l'Ontario permettrait de réduire les émissions de GES de la province de 25 000 tonnes de CO₂ par année (Urban Transportation Task Force, 2012). Dans la région de Washington DC (États-Unis), il a été évalué qu'un nouveau réseau de bus conduirait à une diminution de 2 % du nombre moyen de véhicules individuels et de 8 % du nombre de miles parcourus en véhicule individuel par an. Pour un métro,

il s'agirait d'une baisse de 1,5 % du nombre moyen de véhicules individuels et de 1,6 % du nombre de miles parcourus par ces derniers chaque année (Liu et Cirillo, 2016).

Une autre étude a estimé que les transports en commun s'apparentant aux systèmes de transport léger sur rail émettraient deux fois moins d'émission de CO₂ par mile parcouru par passager par rapport aux véhicules individuels, tandis que pour les transports en commun par autobus cette diminution serait de 30 % (Murphy, 2016). En outre, chaque mile parcouru en transport en commun par un passager aboutirait en une réduction de 2 à 9 miles parcourus par véhicules individuels, à la condition que le transport en commun dont il est question soit de bonne qualité (accessible, confortable, sécurisé et abordable) et soit supporté par un développement urbain favorisant son usage (Litman, 2023).

Par ailleurs, les services de transport en commun améliorés, combinant différentes offres de transports (comme la marche, la trottinette, le vélo, le taxi, l'autopartage), permettent d'initier des changements rapides et à grande échelle dans les déplacements des individus, en s'adaptant à leurs besoins et en les incitant du même coup à privilégier au moins un mode de transport en commun parmi la combinaison des différents modes de transports choisis pour effectuer leur trajet (Boisjoly, 2018). Le changement dans les habitudes de transport des individus en faveur des transports en commun permettrait de réduire plus d'émission de GES que l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'ensemble d'un réseau d'autobus (Dirgahayani, 2013). Cependant, les réductions des émissions de GES par mile parcouru par passager, entraînées par la mise en service et l'amélioration d'un transport en commun, seraient davantage significatives dans les milieux urbains denses, particulièrement aux heures de pointe (VandeWeghe et Kennedy, 2007; Litman, 2011).

2.3 Les effets indirects des transports en commun sur les émissions de GES d'une ville

L'impact d'un transport en commun n'a pas qu'un effet direct sur les émissions de GES des villes. Un transport en commun affecte aussi les émissions de GES des villes par le biais des effets indirects qu'il occasionne sur le développement urbain, générant à son tour un changement dans les déplacements des individus et dans leurs choix de modes de transport (Vance et Hedel, 2007; Cao, 2009). Des études ont évalué que la densification du tissu urbain augmente à hauteur de 27 % lorsqu'un système de transport en commun y est développé (Gallivan, 2015). Cette densification engendre de façon indirecte une réduction de 8 % des émissions de GES d'une ville, une diminution quatre fois supérieure à celle engendrée par la

seule infrastructure de transport et au changement des préférences en transport des individus que cette nouvelle offre a entraîné.

2.3.1 Le transport et l'environnement bâti sont interdépendants

Plusieurs articles identifiés dans la littérature sur la performance environnementale des transports en commun indiquent que le potentiel de réduction des émissions de GES qu'ils génèrent résiderait davantage dans la façon dont les quartiers sont pensés, construits et rénovés, que dans l'établissement de politiques impactant de façon directe l'usage des transports en commun (Elkind, 2022; Liu, 2017; Devlin, 2010; Frank, 2009; Nolon et Bacher, 2007; Krizek, 2003).

Si le transport est un élément essentiel au développement économique et à la qualité de vie des individus, il est aussi étroitement lié à l'environnement bâti des villes. Bien qu'ayant des fonctions distinctes, le transport et l'immobilier sont interdépendants, car si les individus se déplacent, c'est bien souvent pour se rendre d'un immeuble à un autre (Zegras, 2005; Cervero, 2013; De Colli, 2013; Maldini, 2019). L'arrivée d'un nouveau moyen de transport génère ainsi de multiples changements dans le tissu urbain des villes. Or, l'immobilier est aussi un vecteur majeur d'émission de GES puisqu'il produit près de 21 % des émissions de GES au niveau planétaire (IPCC, 2023). Au Canada, les émissions de GES du secteur de l'immobilier ont augmenté de 21 % de 1990 à 2021, alors que la population du Canada a augmenté de près de 38 % sur la même période, en se concentrant particulièrement dans les grands centres urbains où 74 % de la population canadienne résident. Similairement au secteur du transport, ces statistiques sont encore plus élevées dans les villes puisqu'à Vancouver, la part des immeubles dans les émissions de GES totales de la ville s'élève à 55 %, comparativement à celle du transport qui est de 40 % en 2022³².

2.3.1.1 Arguments empiriques justifiant une diminution des émissions de GES

Une des solutions pour réduire la part des émissions de GES du secteur de l'immobilier, et conséquemment du secteur du transport, est le concept de bâtiment durable et la gestion que cela implique. Ce concept est basé sur la prise en compte d'objectifs environnementaux (réduction de la charge de l'environnement), sociaux (améliorer la qualité de la vie, l'équité et la réalisation de la protection sociale) et économiques (maximiser financièrement les bénéfices) tout au long des phases de son cycle de vie (Dridi, 2017). Or, sur

³² Il est à noter que les émissions de GES de la ville de Vancouver entre 2007 et 2020 ont diminué de 13 % pour le secteur du transport et de 10 % pour le secteur de l'immobilier. (<https://vancouver.ca/files/cov/2021-ceap-annual-report.pdf>)

ces trois dimensions du bâtiment durable, le concept de la mobilité durable (dont l'utilisation des transports en commun, la marche active et le vélo) est un des objectifs majeurs à gérer puisque la mobilité des occupants pour accéder à un immeuble fait partie des quatre grands secteurs d'émission de GES d'un bâtiment. Réciproquement, l'immobilier est une préoccupation majeure dans l'élaboration du concept de mobilité durable (Banister, 2008) et dans l'intégration de ce concept à la planification urbaine d'une ville. Toutefois, le rythme de changement dans le secteur de l'immobilier est souvent plus rapide que dans celui des transports (Bleviss, 2020; Lefèvre, 2009).

La densification et le développement de quartiers complets autour des stations d'une infrastructure de transport en commun ont ainsi déjà fait leurs preuves pour encourager le changement d'habitudes de transport des individus résidant en périphérie des villes (Alves, 2017). Certains auteurs préconisent que le développement, le réaménagement, mais aussi la rénovation de quartiers plus compacts (Greene, 2010) et complets (accueillant non seulement des lieux de vie, mais aussi des espaces de travail, de commerce, de santé, d'éducation, d'administration, de culture et de nature) (Zamir, 2014) doivent nécessairement accompagner les investissements dans des infrastructures stimulant la mobilité durable pour qu'ils aient un effet significatif sur les émissions de GES (Nolon et Bacher, 2007; Elkind, 2022). Pour réussir ce développement et favoriser la marche, l'utilisation du vélo et des transports en commun dans ces quartiers, il importe aussi d'encourager la mixité des usages (Frank, 2009) tout en veillant à maintenir l'abordabilité du logement (Melchor et Lembcke, 2020). Un quartier complet et compact générerait des déplacements moins complexes qui produisent moins d'émission de GES que des déplacements s'effectuant dans des zones moins denses (Krizek, 2003; Devlin, 2010).

2.3.1.2 Arguments empiriques justifiant un accroissement des émissions de GES

Les effets d'un développement de quartiers mixtes, complets et compacts seraient donc indirects sur les émissions de GES, en incitant les individus à voyager plus souvent et sur de plus courtes distances grâce à des modes de transport durables émettant de faibles niveaux d'émission de GES (Liu, 2017). Une étude réalisée aux États-Unis suggère par exemple que ce nouveau mode de développement urbain pourrait réduire jusqu'à 25 % des émissions de GES du pays dans le scénario le plus optimiste (Greene *et al.*, 2010). Cependant, ce sujet fait débat dans la littérature, car plusieurs auteurs évoquent que ce type de développement urbain autour des transports en commun engendre un embourgeoisement de ces quartiers, contribuant à une augmentation des émissions de GES de la ville (Jones, 2015; Rayle, 2014; Billings, 2011; Chatman, 2012; Atkinson-Palombo, 2010; Au, 2007; Grube-Cavers et Patterson, 2018). Une

étude sur les interactions entre l'étalement urbain, les systèmes de transport et les émissions de CO₂ dans la ville de Manille aux Philippines a permis de constater que le manque d'accessibilité financière aux logements près des centres d'activités, une forte dépendance des individus aux transports en commun, ainsi que les trajets plus longs qui en résultent sont les causes principales de l'augmentation des émissions de CO₂ provenant du secteur des transports de la ville (Andong et Sajor, 2017). Enfin, une autre étude économétrique, ayant utilisé des tests de dépendance transversale, des tests de racine unitaire de panel, des tests de cointégration de panel, ainsi que des tests d'estimation de régression à long terme de panel, suggère que l'urbanisation, le revenu réel et la densité de population ont un impact significatif et positif sur les émissions de CO₂, tandis que le développement d'infrastructures a un impact insignifiant (Qi *et al.*, 2023).

La planification urbaine d'une ville ainsi que les décisions en matière d'investissement dans les infrastructures et aménagements favorisant la mobilité durable doivent donc prendre en considération les conséquences sur le long terme que de tels changements peuvent engendrer sur le tissu urbain des villes et sur leurs déterminants socio-économiques (Jones, 2015; Condon et Dow, 2011).

2.3.2 Les transports en commun induisent des processus de changements sociaux, politiques, économiques et environnementaux complexes au sein de leur environnement bâti

Une nouvelle offre de transport en commun dans un écosystème urbain modifie l'environnement bâti existant alors que ce dernier conditionne une partie des émissions de GES qu'un transport en commun peut générer (Ewing, 2008; Bailey, 2008). Or, des changements dans l'environnement bâti peuvent en retour modifier les préférences des individus y résidant (Mokhtarian et Cao, 2008) et entraîner un changement de lieu de résidence, transformant ainsi les déterminants socio-économiques de l'environnement urbain existant (Forsyth, 2007; Handy, 2005), ce qui affecte de façon indirecte les émissions de GES du transport (Barla, 2011). Des changements dans l'environnement bâti peuvent aussi entraîner de nouveaux choix et comportements de déplacement des individus, modifiant aussi le potentiel de réduction d'émission de GES d'un transport en commun (Grazi et Van den Bergh, 2008; Hankey et Marshall, 2010; Cervero et Murakami, 2010). Des analyses produites à partir de modélisation par équations structurelles suggèrent que la complexité des déplacements des individus (Shiftan, 2008; Buliung et Kanaroglou, 2007) dépend de plusieurs facteurs (Devlin, 2010).

Les facteurs affectant la demande en transport sont par exemple : la taille des villes (en termes de nombre d'habitants ainsi que d'activité économique) (Eldér, 2014), le niveau d'éducation de la population, le sexe,

l'âge et la situation professionnelle des individus (Barla, 2011; Golub, 2022), le revenu médian ainsi que la structure du marché du travail (Holz-Rau et Scheiner, 2019), le niveau d'aversion aux transports en commun de la population ainsi que la distance et le temps nécessaire pour relier le lieu de résidence et le lieu de travail (Holz-Rau et Scheiner, 2019). L'environnement bâti affecte aussi la demande en transport des individus par le biais de sa proximité au centre-ville et du développement de nouvelles constructions modifiant la structure des quartiers ainsi que le niveau de densité, de centralisation et de diversité de l'offre de biens et de services (y compris en termes de demande d'emplois et d'offre de logements) (Johnson, 1971; Siedentop et Fina, 2010; Krizek, 2003; Barla, 2011; Yang, 2017). La disponibilité des transports en commun, la flexibilité qu'ils permettent ainsi que les aménagements urbains favorisant le déplacement des piétons sont des éléments permettant d'améliorer l'accessibilité à l'offre de biens et de services des villes. L'ensemble de ces facteurs affectent le comportement de déplacement des individus, caractérisé par leurs préférences sur la fréquence des déplacements, la distance parcourue, le temps ainsi que le budget alloué, le processus de prise de décision intervenant avec une tierce personne (Timmermans et Zhang, 2009), la raison du trajet (domicile-travail, courses, loisirs, etc.) (Yang, 2018) et finalement le choix du mode de transport emprunté qui en résulte (Greene *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2017). En engendrant des effets directs sur le choix du mode de transport emprunté, le comportement de déplacement des individus a des effets indirects sur les émissions de GES du secteur du transport.

2.3.2.1 Arguments empiriques justifiant une diminution des émissions de GES

Pour qu'un investissement dans un moyen de transport durable puisse répondre efficacement à son objectif de réduction d'émission de GES sur le long terme, plusieurs variables doivent donc être prises en compte, notamment les interactions entre le transport, le patrimoine urbain et les caractéristiques socio-économiques d'un environnement bâti. Le cercle vicieux de l'étalement des grands centres urbains en périphérie des villes est un enjeu important lors de l'implantation ou de l'extension d'un moyen de transport en commun. Pour ce faire, la complémentarité et la fluidité des transports pour réduire le temps d'attente et de marche entre deux moyens de transport en commun sont des éléments vitaux afin de réussir à inciter les individus à privilégier des transports durables à leur véhicule individuel. Les nouveaux moyens de transport en commun comme l'autopartage, le covoiturage ou le recours à des services de transport à la demande peuvent permettre de combler ce problème du « premier (ou dernier) kilomètre », l'une des principales raisons décourageant l'utilisation des transports en commun (Bleviss, 2020). Toutefois, ce problème peut aussi être limité par la conception de villes moyennement denses et dont la répartition de l'offre en biens et services est plus uniforme, contrairement à un modèle de planification

urbaine dans lequel le centre-ville est au cœur de la ville et concentre toute son activité économique (Condon et Dow, 2011). Ce premier modèle offre la possibilité d'étendre les moyens de transports en commun de façon plus disparate, privilégiant une approche plus micro afin d'atteindre le plus d'individus possible, avec des horaires de passage plus fréquents, et d'encourager leur déplacement sur de plus courtes distances. Cela va à l'encontre d'une approche plus macro présentant de grandes artères de circulation en transports en commun, plus rapides, mais qui peinent cependant à atteindre toutes les subdivisions du tissu urbain et qui engendrent de plus grandes distances parcourues ainsi qu'un étalement urbain. Or, l'éloignement des individus habitant en périphérie du centre-ville complexifie leurs déplacements puisqu'ils sont susceptibles de devoir faire des arrêts plus fréquents afin de subvenir à l'ensemble de leurs besoins. La distance, le temps et le manque de flexibilité sont ainsi des facteurs décourageant l'utilisation des transports en commun (Krizek, 2003), alors que la proximité à un système de transport en commun est un facteur important pour encourager le transfert modal d'un véhicule individuel vers un transport en commun. De même, la facilité d'accès d'une périphérie à son centre-ville a aussi des effets indirects significatifs sur les émissions de GES d'un transport en commun. Pour encourager les individus à recourir aux transports en commun, des méthodes de gestion de la demande en transport ont été développées et consistent à simplifier la complexité des déplacements des individus en influençant leur décision (Chou, 2008). Il peut s'agir d'augmenter la fréquence et la vitesse du transport en commun et d'en diminuer le coût, mais il peut aussi s'agir d'influencer des facteurs psychologiques comme la perception sociale d'un transport en commun (Kitamura, 1999).

2.3.2.2 Arguments empiriques justifiant un accroissement des émissions de GES

L'usage de la voiture individuelle a été soutenu par une planification urbaine organisée en vue de faciliter la circulation des automobiles et de réduire le temps de déplacement entre le domicile et le travail des individus (Holz-Rau et Scheiner, 2019). La voiture individuelle a ainsi favorisé un étalement urbain en périphérie des villes, enclenchant un processus de développement du tissu urbain décrit comme un cercle vicieux (Holz-Rau et Scheiner, 2019) (voir Annexe D). Dès lors, les changements spatiaux intervenant dans le tissu urbain pour favoriser l'accessibilité des villes et de leurs centres, par exemple avec l'extension d'infrastructures de transport en commun, aboutissent à une dépendance aux voitures individuelles toujours plus forte. Ceci a comme effet d'accroître les distances parcourues ainsi que l'accessibilité à de nouveaux espaces en conservant le même temps de trajet à un coût similaire, ce qui contribue à une augmentation de l'offre et de la demande en matière de logement, de travail et de loisir en périphérie des villes (Mattioli, 2014; Wegener, 2021). Ce processus est nommé le trafic généré (Batty *et al.*, 2012; Noland

et Lem, 2002). Cependant, cet effet varie beaucoup en fonction des divers contextes géographiques, économiques et sociaux (Stevens, 2017). En outre, le fait qu'un individu possédait déjà une voiture avant la mise en service d'une infrastructure de transport en commun l'inciterait à continuer d'en faire usage en raison des coûts irrécupérables que ce véhicule lui a déjà engendrés (Litman, 2009). Or, la possession d'une voiture serait à la fois influencée par le choix du lieu de résidence et des décisions en matière de déplacement et déterminée par ces deux facteurs (Liu *et al.*, 2017). Ainsi, une augmentation des distances parcourues a été relevée dans la plupart des grandes villes, malgré le développement des transports en commun (Holz-Rau et Scheiner, 2019).

Par ailleurs, il a été montré que plus les déplacements sont complexes et nécessitent des arrêts fréquents, moins un individu sera enclin à utiliser un transport en commun sous la contrainte de temps et des coûts engendrés (McGuckin, 2005). Cette complexité dans les déplacements des individus résulte donc de multiples facteurs, qui, par leur interdépendance, s'amplifient mutuellement et impactent indirectement les émissions de GES des déplacements (Naess, 1995). En conséquence, l'évaluation de l'impact d'un transport en commun sur les émissions de GES d'une ville ne peut se résumer à la simple conversion des émissions de GES évitées par le choix d'un individu à prendre un mode de transport plus durable que son véhicule personnel. Une telle évaluation ne peut réussir à capter les effets indirects et non négligeables induits par cette nouvelle offre de transport sur ses émissions de GES (Shiftan et Suhrbier, 2002).

Les changements sociaux et économiques causés par le secteur du transport, et affectant à leur tour les émissions de GES d'une ville, sont donc nombreux et difficiles à contrôler (Rammler, 2014). Ainsi, les spécialistes estiment qu'une seule politique publique ne peut résoudre les problèmes de planification de transports, puisqu'ils nécessitent de prendre en compte une multitude de variables qui sont interdépendantes (Greene, 2010). De la même façon, la seule mécanique d'ajustement des marchés ne peut permettre de résoudre des problèmes d'externalités environnementales. Une combinaison de politiques publiques doit ainsi accompagner l'installation d'une infrastructure de transport en commun pour que cette dernière permette de réduire de façon efficiente les émissions de GES d'une ville (Halsnaes, 2008). En outre, l'impact d'une planification urbaine intégrant les transports en commun sur la réduction des émissions de GES est limité en raison de l'incertitude sur les multiples relations de cause à effet qui interviennent tout au long du cycle de vie d'une infrastructure de transport ainsi que de son environnement et qui font partie de processus complexes de changements sociaux et spatiaux (Holz-Rau et Scheiner, 2019).

2.4 Le cas de la Canada Line à Vancouver : particularités

Les effets directs et indirects d'une infrastructure de transport en commun sur les émissions de GES d'une ville qui ont été analysés dans la littérature permettent de mieux comprendre les facteurs déterminant l'impact total à travers le temps de la Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver sur les émissions de GES de la ville.

Cette infrastructure de transport en commun a été choisie dans le cadre de cette recherche pour trois raisons : la particularité de la technologie utilisée par cette infrastructure au Canada entre 2009 et 2017 ainsi que de son envergure; sa similarité avec le REM (Réseau express métropolitain) de Montréal, mis en service en août 2023, qui permet d'analyser les retombées d'une telle infrastructure sur les émissions de GES d'une ville; et la disponibilité des données requises pour effectuer la présente étude.

Le *SkyTrain* de Vancouver est un système de transport rapide sur rail utilisant un système de train automatisé circulant sur une voie aérienne. Il est le premier système de transport en commun rapide sans conducteur à avoir été mis en service au monde³³ et le seul réseau de ce type entièrement automatisé (c'est-à-dire sans conducteur ni personnel pour superviser la circulation des trains et les échanges de voyageurs) au Canada³⁴. Le *SkyTrain* de Vancouver était aussi le plus long réseau de transport rapide sur rail automatique au monde en 2016 avec 79,5 km de voies³⁵. La Canada Line est une des trois lignes du *SkyTrain* de Vancouver. Elle fonctionne à l'aide de 20 rames automotrices de type EMU (Electric multiple-unit) à moteurs électriques construites par le groupe Hyundai Motor, à la différence des deux autres lignes du *SkyTrain* (Van Sang, 2015). La Canada Line bénéficie d'un réseau à part entière de 19,2 km comportant 16 stations d'arrêt (Gamiz *et al.*, 2021). Depuis sa mise en service au cours du mois d'août 2009, elle est ainsi exploitée différemment et individuellement des deux autres lignes. Cette nouvelle ligne du *SkyTrain* a permis par son axe principal de relier le centre-ville de Vancouver à sa périphérie jusqu'à la ville de Richmond et par son axe secondaire de relier le centre-ville de Vancouver à l'aéroport international de

³³ <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1865669/skytrain-vancouver-anniversaire-carillon-emblème-mars>

³⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_systèmes_de_métros_automatisés

³⁵ <https://www.canada.ca/fr/transports-canada/nouvelles/2016/11/projet-ligne-evergreen.html>

Vancouver (Gamiz *et al.*, 2021) (voir Annexe E). Les travaux ont commencé en 2005 et ont été en grande partie terminés en 2008³⁶.

Cette infrastructure de transport en commun a été construite pour répondre à la fois aux besoins en transports de la ville de Vancouver durant les Jeux olympiques d’hiver qu’elle a accueillis en février 2010 ainsi qu’aux besoins en transports régionaux à moyen et long terme. La Canada Line constitue le legs des Jeux olympiques d’hiver en matière de mobilité durable, favorisant le rayonnement économique de la ville de Vancouver (Bozovic, 2018). Cet événement a permis de mettre en vitrine l’efficacité de cette infrastructure de transport à gérer simultanément un nombre important de déplacements et ainsi de catalyser la modification des comportements de déplacement des individus résidant à Vancouver en impactant la perception sociale de cette infrastructure en faveur de son utilisation régulière (Chou, 2010). La Canada Line transportait plus de 100 000 passagers par jour après sa mise en service en 2010 et 150 000 passagers en 2019 (Translink, 2019). En pleine crise sanitaire de la COVID-19, ce nombre est descendu à 94 000 passagers par jour (Translink, 2022). Il faut aussi noter que d’autres installations ont été mises en place en marge des Jeux olympiques d’hiver pour encourager la mobilité durable des individus sur le long terme au moyen d’un plan de gestion du transport³⁷.

Le propriétaire du *SkyTrain* de Vancouver est la société Translink, mais la Canada Line est exploitée pour une durée de 35 ans par la société ProTrans BC, un concessionnaire fondé par SNC Lavalin, à la différence des deux autres lignes du *SkyTrain* qui sont sous contrat avec l’Autorité des Transports du Grand Vancouver (ATGV)³⁸ (DeVries, 2016). L’investissement pour cette infrastructure de transport en commun a coûté plus de 2 milliards de dollars canadiens et a été l’un des projets de transport les plus importants de la province de la Colombie-Britannique³⁹. Ces coûts importants ont nécessité l’implication de différents paliers gouvernementaux, engendrant des enjeux de gouvernance multiniveau. Les gouvernements locaux et provinciaux ne partageaient pas les mêmes préoccupations sur le projet, si bien que les gouvernements

³⁶ <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/340665/vancouver-horloge>;
<http://canadaline.snclavalin.com/protransbc/canada-line>

³⁷ Ce plan prévoyait une augmentation de la fréquence des passages du *SkyTrain*, une extension des horaires de mise en service, de nouveaux bus fonctionnant avec du biocarburant, de nouveaux véhicules fonctionnant à l’hydrogène, une nouvelle ligne de tramway gratuite pour favoriser la complémentarité et la fluidité du réseau de transports de la ville, de nombreuses voies vertes pour favoriser la marche et le vélo ainsi qu’un agrandissement de l’autoroute (Craig, 2011).

³⁸ <http://canadaline.snclavalin.com/protransbc/canada-line>

³⁹ <https://bccr.net/resources/Documents/CanadaLine-SNC.pdf>

locaux ne souhaitaient pas la création d'une troisième ligne du *SkyTrain* en raison des coûts importants engendrés et des risques encourus par des prédictions fallacieuses sur le nombre de passagers, mais aussi des impacts sur la communauté locale, le coût de la vie autour des stations de la ligne et des risques d'inondations accrus par un développement excessif des zones limitrophes entre les villes de Vancouver et de Richmond, séparées par le fleuve Fraser (Jones, 2015). Les raisons motivant le gouvernement provincial à investir dans la Canada Line concernaient le développement urbain de la région, notamment de friches industrielles, pour faire face à l'augmentation rapide de la population, mais aussi le développement économique de la région en vue d'accroître son *soft power*. Pour faire face à ces divergences d'intérêt, les différents paliers gouvernementaux impliqués dans le projet ont eu recours à une structure de financement prenant la forme d'un partenariat public privé (Siemiatycki, 2006) afin d'avoir une meilleure gestion des risques des coûts et délais supplémentaires sur le long terme (Preece, 2006)⁴⁰. La Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver ainsi que les nouvelles extensions récentes de l'infrastructure permettent de répondre à la croissance de la population de la région métropolitaine de Vancouver tout en contrôlant la croissance des émissions de GES associées. De plus, elle permet aussi de positionner la ville de Vancouver sur la scène internationale comme une des villes les plus durables au monde afin d'accroître son rayonnement, celui de la province de la Colombie-Britannique et du Canada (Holden, 2011).

La région métropolitaine de Vancouver est la troisième plus grande région du Canada en termes d'habitants derrière celles de Toronto et de Montréal et il est estimé qu'elle devrait gagner un million d'habitants en plus d'ici 2050 (Ville de Vancouver, 2022). La ville de Vancouver comprend les deux plus grands centres d'affaires de la province de la Colombie-Britannique, recense actuellement 34 % des emplois de cette région et accueille le premier port du Canada, qui est aussi le quatrième plus grand port d'Amérique du Nord. Par ailleurs, l'attractivité du centre-ville de Vancouver ne cesse de gagner en importance puisqu'il concentrait en 2022 65 % des espaces à bureaux en construction et que près d'un

⁴⁰ Si les coûts initiaux de cette structure de financement sont plus élevés que ceux des financements publics traditionnels, ils sont compensés par le transfert du risque de sous-performance aux partenaires privés tout au long du cycle de vie de l'infrastructure. Il a été estimé que près de 92 millions de dollars canadiens ont été économisés en prime de risque grâce à cette structure de financement (Sroka, 2021). D'une part, le gouvernement provincial a eu recours à cette structure de financement, car il venait de créer la société d'État Partnerships BC et qu'il était estimé qu'un partenariat public privé était plus avantageux pour tout projet de plus de 20 millions de dollars canadiens bénéficiant d'un financement du gouvernement de la Colombie-Britannique. D'autre part, la gestion des risques de coûts supplémentaires permettait de rassurer les membres du conseil d'administration de TransLink, ayant voté à deux reprises contre le projet de la Canada Line, car le coût de la Canada Line ne devait pas épuiser le budget de la société pour l'extension d'autres lignes qui était déjà planifié (Chan, 2014).

quart des nouveaux arrivants à Vancouver désirent y travailler⁴¹. Le centre-ville de Vancouver est donc au cœur du rayonnement de la ville et un centre d'affluence important. Avec son développement urbain en pleine croissance, les quartiers résidentiels de Vancouver continuent de s'étendre en périphérie alors que les principales activités économiques sont établies dans les centres d'affaires situés en plein cœur de la ville (Stan, 2013). La ville de Vancouver est ainsi atypique par cette multiplicité de centres d'affaires qui ont contribué à son étalement urbain et à l'importance du développement d'infrastructures de transport en commun reliant les zones situées en périphéries de la ville aux zones concentrant les emplois. De surcroît, la congestion routière à Vancouver contribuait en 2011 à près de 17 % des coûts totaux générés par la congestion au Canada et est une source importante des émissions de GES de la ville. La Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver a donc joué un rôle majeur dans le développement des transports en commun de la ville, en offrant de nouvelles possibilités de connexions avec les zones périphériques situées vers la ville de Richmond et vers l'aéroport international de Vancouver. Elle a permis, du même coup, de modifier l'environnement bâti en développant l'accessibilité à de nouveaux espaces, mais elle a aussi eu pour effet de modifier l'environnement socio-économique existant en entraînant une hausse des prix de l'immobilier aux alentours de ses stations (Craig et Chernoff, 2018; Devries, 2016; Foth, 2010). L'impact global de la Canada Line sur les émissions de GES de la ville de Vancouver demeure toutefois incertain.

2.5 Études préalables sur l'évaluation de l'impact de la Canada Line : méthodologies et résultats obtenus

Peu d'études se sont attelées à évaluer les émissions de GES engendrées par la Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver et son impact sur les émissions de GES de la ville de Vancouver (Van Sang *et al.*, 2015; Poudenx et Merida, 2007; Boutron *et al.*, 2020; Gamiz *et al.*, 2021; Translink, 2022). Les méthodologies consistaient dans la plupart des articles à évaluer les émissions de GES évitées par les nouveaux passagers de l'infrastructure de transport en commun qui se déplaçaient auparavant avec leur véhicule individuel. D'après Translink, les économies de GES engendrées par cette infrastructure seraient de 20 000 à 27 000 tonnes d'émission de GES en équivalent CO₂ par année si elle fonctionnait à sa pleine capacité (British Columbia Construction Roundtable, 2023)⁴² et les individus privilégiant la Canada Line parmi leurs modes de transport réduiraient leurs émissions de GES de 99 %. Une augmentation de 11 % de l'utilisation

⁴¹ <https://vancouverplan.ca/wp-content/uploads/Vancouver-Plan-2022-06-27.pdf>

⁴² <https://bccr.net/project>

du *SkyTrain* de Vancouver aurait suivi l'ouverture de la Canada Line en 2010⁴³, si bien qu'entre 2010 et 2016, il y aurait eu une augmentation totale de 36 % du nombre de passagers du *SkyTrain*⁴⁴. La diminution du nombre de transactions de stationnement à l'aéroport international de Vancouver après la mise en service de la Canada Line en 2009 reflète également un autre de ses impacts sur le nombre de véhicules en circulation (Lee, 2012).

Une autre étude comparant la ligne T2 du tramway d'Île-de-France à la Canada Line a permis d'établir que cette dernière permettrait de réduire les émissions de GES à hauteur de 14 000 tonnes d'émission de GES en équivalent CO₂ par année (Van Sang, 2015). Cette étude a été réalisée en calculant le nombre de kW/h nécessaires pour faire fonctionner les moteurs des rames de train en fonction du nombre de déplacements moyens effectués ainsi que de la longueur parcourue sur la ligne. Ces données ont ensuite été agrégées au nombre de kW/h nécessaires au fonctionnement des stations de la ligne et converties en fonction des g/CO₂ émis pour un kW/h par le fournisseur d'électricité. Au total, la Canada Line aurait émis 196 tonnes d'émission de GES en équivalent CO₂ au cours de l'année 2012. Le nombre d'émissions de GES ayant été économisés par la Canada Line a enfin été déterminé par la conversion des émissions de GES produites par le nombre estimé de véhicules individuels qui auraient circulé sans la Canada Line. En ce sens, une étude de Statistique Canada a permis de déterminer qu'à Vancouver, la proportion de travailleurs utilisant le transport en commun pour se rendre au travail a augmenté de 6 % entre 1996 et 2016. Par ailleurs, c'est également à Vancouver que la baisse de la proportion de travailleurs utilisant leur véhicule individuel a été la plus importante par rapport au niveau national, avec une diminution de 8 % en 10 ans entre 1996 et 2016⁴⁵. De plus, la proportion d'individus ayant recours au transport en commun a augmenté de 17 % à 26 %⁴⁶ entre 2006 et 2016 dans la ville de Vancouver (Edwards et Smith, 2008). Pour autant, le transport était en 2006 la principale source d'émissions de GES de la région de Vancouver, devant la gestion de l'eau, des déchets, des immeubles et de l'approvisionnement en nourriture. Le transport était aussi le deuxième facteur le plus important de l'empreinte écologique de la région, dont l'énergie intrinsèque de

⁴³ Incluant l'impact des Jeux olympiques d'hiver, ayant doublé le nombre de passagers quotidien habituel (Archambault, 2010)

⁴⁴ <https://www.infrastructure.gc.ca/pd-dp/eval/eval-van-eng.html?wbdisable=true>

⁴⁵ <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/171129/dq171129c-fra.htm>

⁴⁶ <https://vancouver.ca/files/cov/2020-transportation-panel-survey.pdf>

l'infrastructure et l'énergie pour son fonctionnement représentent respectivement 22 % et 78 % de cette empreinte en 2006 (Moore, 2013).

Les estimations concernant la réduction des émissions de GES associée au *SkyTrain* de Vancouver varient cependant selon les études. Une extension du *SkyTrain* de Vancouver vers l'Université de Colombie-Britannique (UBC) entraînerait une hausse de 14,5 % des émissions de GES avec des hypothèses pessimistes et une diminution de 14 % des émissions de GES, avec les hypothèses les plus optimistes quant au changement de comportement de déplacement des individus par rapport aux émissions de GES de 2007 (Boutron *et al.*, 2020; Louie, 2008). Une autre étude mentionne que parmi l'ensemble des transports en commun de la ville de Vancouver, le *SkyTrain* détient le plus faible facteur d'émission en carbone, évalué à 2,33 g/CO₂ émis pour chaque kilomètre par passager parcouru, dont le total culminait en 2019 à 7 330 000 km par jour (Gamiz *et al.*, 2021). D'après ces données, le *SkyTrain* de Vancouver aurait émis 17 108 kg/CO₂ chaque jour en moyenne au cours de l'année 2019. En outre, le *SkyTrain* de Vancouver serait 100 fois plus efficace en termes d'émissions de GES par kilomètre par passager que les véhicules individuels (Poudenx et Merida, 2007). L'arrivée des nouveaux modes de transport tels que les systèmes d'autopartage viennent cependant modifier le coût d'opportunité des individus qui privilégient le meilleur rapport entre le temps et l'effort dépensé ainsi que les GES émis. Ces études ayant visé à évaluer les émissions de GES de la Canada Line ne prennent cependant pas en considération l'évolution dans le temps des émissions de GES de la ville de Vancouver⁴⁷ à la suite de la mise en service de la Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver, ni les effets indirects engendrés par l'infrastructure sur les émissions de GES de la ville, comme les changements tant dans son environnement bâti que dans les caractéristiques socio-économiques des individus y résidant. D'après un rapport de la ville de Richmond, les émissions de GES des transports dont Translink est propriétaire auraient augmenté de 5 % entre 2014 et 2018⁴⁸ dans la région métropolitaine de Vancouver.

⁴⁷ Les émissions de GES de la ville de Vancouver comprennent : les émissions liées à l'utilisation d'énergie pour les transports, les bâtiments, les industries, les commerces ou encore les logements; les émissions provenant des décharges; les émissions provenant des processus industriels; les émissions liées aux espaces agricoles.

⁴⁸ <https://www.letstalkrichmond.ca/11006/widgets/42720/documents/19615>

2.6 Contribution de la recherche : le contrôle synthétique comme outil méthodologique d'évaluation de l'impact d'une politique publique

Les études antérieures sur le sujet, le plus souvent en sciences de l'ingénierie, en sciences de l'énergie ou encore en sciences de l'environnement, utilisent des données sur les émissions de GES en équivalent CO₂ par kilomètres parcourus par passagers et par types de véhicules ou encore sur les habitudes de déplacement des individus (selon les véhicules utilisés et les caractéristiques des déplacements) afin de calculer les émissions de GES totales de la Canada Line, sans toutefois considérer les effets indirects induits par cette nouvelle infrastructure sur le long terme (Van Sang, 2015; Boutron *et al.*, 2020; Gamiz *et al.*, 2021; Translink, 2022). L'évaluation de l'impact de la Canada Line sur les émissions de GES de la ville de Vancouver s'est donc souvent limitée à la conversion des émissions de GES évitées par la proportion d'individus ayant privilégié un mode de transport plus durable à leur véhicule individuel. Plusieurs études ont aussi permis de répertorier quelques effets indirects d'une infrastructure de transport en commun, en prenant en considération les changements qu'elle a occasionnés au sein de son environnement bâti et sur le comportement de déplacement des individus. Ces modélisations spatiales n'ont cependant pas permis de quantifier les émissions de GES associées à ces effets indirects ni leur évolution dans le temps (Liu, 2017; Devlin, 2010).

La méthodologie retenue pour ce mémoire de recherche vise à appliquer un modèle économétrique d'évaluation de politique publique pour déterminer l'impact total d'une infrastructure de transport en commun telle que la Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver sur l'évolution dans le temps des émissions de GES de la ville. La méthode d'estimation utilisée à cette fin est celle du contrôle synthétique. La méthode de contrôle synthétique est basée sur l'observation qu'une combinaison d'unités dans un groupe de contrôle peut se rapprocher des caractéristiques de l'unité traitée mieux que n'importe quelle autre unité non traitée à elle seule (Abadie, 2021). Un contrôle synthétique est ainsi défini comme une moyenne pondérée des unités du groupe de contrôle déterminée par une optimisation quadratique contrainte. Dans cette étude, le groupe de contrôle est constitué de grandes villes canadiennes et la ville de Vancouver est l'unité traitée. La mise en service de cette infrastructure de transport en commun est ainsi identifiée comme le « traitement » du contrôle synthétique. À partir des émissions totales de GES de ces villes et d'une combinaison de données affectant la trajectoire des émissions de GES, un Vancouver synthétique, dans lequel la Canada Line n'a pas été mise en place, est reproduit avant et après la mise en service effective de l'infrastructure. La comparaison de ce Vancouver synthétique avec le Vancouver empirique après la mise en service de la Canada Line permet d'observer l'impact réel de l'infrastructure sur les émissions de GES

de la ville de Vancouver. Les problèmes d'endogénéité sont limités par la création d'une matrice de variables explicatives, qui capturent les effets de ces facteurs sur les émissions de GES. La variable dépendante contient la variation annuelle des émissions de GES en équivalent CO₂. Les variables indépendantes qui composent la matrice des variables explicatives sont le produit intérieur brut (PIB), les revenus de la taxe sur l'essence et les carburants, les investissements en constructions résidentielles et non résidentielles, les habitudes de transport des habitants et le nombre d'habitants de chacune des villes du groupe contrôle établi.

Le défi dans l'estimation de l'effet sur le long terme d'une infrastructure de transport en commun sur les émissions de GES d'une ville est de déterminer quelle aurait été la trajectoire naturelle de ces émissions si l'infrastructure n'avait pas été mise en service. L'avantage de cette méthodologie est de réaliser des tests placebo qui permettent de vérifier que les effets que l'on a capturés sont bien attribuables à l'infrastructure d'intérêt.

Quelques études notoires ont contribué au développement de la méthodologie du contrôle synthétique. Un des articles de référence sur lequel se base la présente recherche est celui d'Alberto Abadie et de Javier Gardeazabal, paru en 2003 et ayant contribué à évaluer les coûts économiques des conflits engendrés par le terrorisme dans le Pays basque à la fin des années 1960. Dans cet article, les chercheurs ont trouvé une relation de causalité significative et positive entre les actions des entreprises implantées au Pays basque et l'annonce d'une trêve. Un autre article publié en 2010 par Alberto Abadie, Alexis Diamond et Jens Hainmueller utilise aussi cette méthodologie pour modéliser l'impact de la « proposition 99 », une taxe sur la vente de cigarettes, sur la consommation de paquets de cigarettes par tête aux États-Unis. D'après cet article, la vente de paquets de cigarettes à la fin de l'année 2000 a baissé de 26 paquets de cigarettes par personne, par rapport au cas où la réforme n'aurait pas eu lieu.

Ce type de méthodologie ainsi que les données utilisées n'ont jamais encore été employés pour évaluer l'impact d'une infrastructure de transport sur les émissions de GES d'une ville d'après les recherches menées dans la littérature sur le sujet et mises à jour en juin 2023. Il faut toutefois noter qu'un article a été réalisé pour évaluer l'effet à long terme du covoiturage sur les transports publics, la congestion et les accidents mortels dans la ville de Vancouver en utilisant la méthodologie du contrôle synthétique (Cairncross, 2022), mais ce dernier ne s'intéresse pas aux émissions de GES de la ville. Par ailleurs, les auteurs d'un article ont utilisé cette méthodologie pour évaluer l'impact d'une infrastructure aéroportuaire

mise en service en 2007 sur l'affluence de touristes, sans toutefois considérer les émissions de GES (Doerr, 2019).

En outre, il faut noter que les articles en économie de l'environnement et en économétrie s'étant intéressés à ce sujet représentent environ 2 % des articles recensés dans la littérature sur le sujet d'après une analyse bibliométrique réalisée sur *Scopus* (voir Annexe C). L'apport de ce mémoire est de réaliser et de tester un modèle reproductible pour l'étude d'autres projets ou politiques publiques impactant aussi les émissions de GES. Cette recherche vise à se démarquer des études réalisées précédemment pour prendre en compte l'endogénéité qui peut se confondre lors de la modélisation de l'évolution sur le long terme des émissions de GES d'une ville après l'installation d'une infrastructure de transport en commun. Cette recherche a ainsi pour ambition d'évaluer l'impact cumulé des effets directs et indirects d'une infrastructure de transport en commun et leur persistance temporelle sur les émissions de GES d'une ville. Ces deux éléments ne sont pas étudiés par les méthodologies employées par les articles et rapports parus dans la littérature sur le sujet.

2.7 Limites du sujet de recherche

Dans le cadre de ce mémoire, l'étude se limite exclusivement à la phase d'exploitation d'une infrastructure de transport en commun sur une période définie et de ses impacts sur les émissions de GES de la ville dans laquelle elle est implantée. Elle ne comprend donc pas les autres phases de conception et de construction ainsi que les phases de rénovation et éventuellement de déconstruction. Il faut cependant noter que les émissions de GES émises par l'infrastructure à l'échelle de la ville sont également dépendantes des autres variables sociales et économiques qui sont impactées par l'infrastructure de transport en commun. Les résultats des modélisations réalisées dans cette recherche pourront ainsi s'expliquer par cette interdépendance entre ces variables environnementales, sociales et économiques. Toutefois, le but de cette recherche n'est pas d'évaluer l'interdépendance de ces différentes variables ni de comprendre de façon précise comment elles s'influencent mutuellement, mais plutôt de quantifier l'impact total de la mise en place de la Canada Line sur l'évolution dans le temps des émissions de GES de la ville de Vancouver.

2.8 Résultats attendus de la recherche

Les résultats attendus de cette recherche sont ambigus puisque la littérature ne fait pas consensus sur le fait qu'une infrastructure de transport en commun contribue à la réduction des émissions de GES d'une ville. D'une part, l'effet direct dû au transfert modal de passagers vers l'infrastructure de transport en

commun qui utilisaient auparavant un véhicule individuel engendre une diminution des émissions de GES. Cela s'explique par une intensité en carbone plus faible des transports en commun ainsi que de la congestion et des kilomètres parcourus évités. D'autre part, la mise en service d'une infrastructure de transport en commun entraîne aussi plusieurs effets indirects qui sont interdépendants et peuvent s'intensifier mutuellement. Ces effets indirects renforcent ainsi l'importance du contexte politique, social, économique et environnemental dans lequel s'inscrit une infrastructure de transport en commun (Condon et Dow, 2011). Ainsi, certaines pistes dans la littérature et les données publiées par Translink indiquent que l'impact de la mise en service de la Canada Line sur les émissions de GES de la ville de Vancouver devrait être négatif (Poudenx et Merida, 2007; Louie, 2008; Boutron *et al.*, 2020; Bleviss, 2020; Gamiz *et al.*, 2021), de sorte qu'une diminution entre 14 000 et 20 000 tonnes de GES en équivalent CO₂ est attendue (Van Sang, 2015; Translink, 2022). Toutefois, d'autres articles théoriques sur les transports en commun laissent penser que cet impact pourrait être positif et entraîner une augmentation des émissions de GES de la ville en raison des nombreux effets indirects induits par des changements de l'environnement bâti, de ses caractéristiques socio-économiques et des comportements de déplacement des individus (Devlin, 2010; Liu, 2017; Holz-Rau et Scheiner, 2019). En outre, une augmentation de la valeur foncière autour des stations de la Canada Line, symptôme d'un embourgeoisement, laisse penser que l'étalement urbain vers des zones périphériques de Vancouver continue de s'amplifier, causant un éloignement de la population du centre-ville et de sa périphérie et incitant les individus à prendre leurs véhicules pour se rendre aux stations de la ligne. Ce phénomène a été identifié dans plusieurs articles (Wegener, 2021; Barla, 2011; DeVries, 2016; Jones et Ley, 2016; Rice, 2020). Cette littérature sur l'embourgeoisement n'est pas au cœur de notre étude, mais elle fait partie des pistes à considérer pour bien saisir les processus sous-jacents à notre recherche et les effets indirects qui en découlent.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie employée dans le cadre de cette recherche ainsi que ses avantages, ses prérequis et sa formalisation.

3.1 Présentation de la méthode du contrôle synthétique

La méthodologie retenue dans cette étude vise à réaliser un contrôle synthétique de la trajectoire des émissions de GES de la ville de Vancouver afin d'évaluer l'impact de la mise en service de la Canada Line et les réductions des émissions de GES potentiellement engendrées par cette nouvelle infrastructure de transport en commun pour la ville. Les données collectées pour les villes du groupe de contrôle permettent ainsi de modéliser un Vancouver synthétique en tenant compte des facteurs influençant le plus les émissions de GES. La variable dépendante contient la variation annuelle des émissions de GES en équivalent CO₂. Les variables explicatives sont : le PIB des villes, les revenus de la taxe sur l'essence et les carburants, les investissements en constructions résidentielles et non résidentielles, les habitudes de transport des habitants et le nombre d'habitants des villes⁴⁹.

La méthodologie du contrôle synthétique est une innovation majeure dans les méthodologies d'évaluation de l'impact des politiques publiques (Athey et Imbens, 2017) et permet d'estimer les effets d'une politique publique à un niveau d'agrégation affectant de grandes unités comme les villes, les régions ou les pays. Les avantages de cette méthodologie sont multiples. Tout d'abord, le contrôle synthétique permet une meilleure interprétation du résultat obtenu, puisque la validité des estimateurs du contrôle synthétique dépend fortement du contexte empirique de l'étude et des caractéristiques des données utilisées (Abadie et Gardeazabal, 2003). Le deuxième avantage de cette méthode est sa transparence, puisqu'elle permet de calculer l'écart entre les données empiriques de la ville traitée et le résultat de la combinaison convexe des données des villes du groupe de contrôle sans avoir accès aux données collectées après la mise en service de la Canada Line. Autrement dit, les poids synthétiques sur lesquels repose l'importance des villes du groupe contrôle dans le résultat synthétique sont calculés sans avoir connaissance des interactions entre les données et la trajectoire synthétique des émissions de GES de Vancouver (Abadie *et al.*, 2010). De plus, la pondération du contrôle synthétique est connue et définie par une moyenne pondérée des

⁴⁹ Le choix des variables est discuté à la section 4.1 du mémoire.

variables des villes du groupe de contrôle. De cette façon, une partie des villes du groupe de contrôle contribue à l'estimation de l'effet final du traitement tout en contrôlant tout ou une partie de l'endogénéité des phénomènes non observés⁵⁰. Ce contrôle est réalisé par l'entremise d'une combinaison de variables explicatives pour chacune des villes du groupe de contrôle et son efficacité est vérifiée par des tests placebo (Abadie *et al.*, 2010). Un autre avantage de cette méthode est que son pouvoir prédictif se base sur une pondération de données historiques disponibles dans l'échantillon plutôt que sur l'estimation de valeurs à partir de données externes à l'échantillon. Par ailleurs, cette méthode est plus efficace que la plupart des techniques d'analyse de régression qui sont souvent mal adaptées pour estimer les effets d'un événement unique affectant un grand nombre d'unités et qui nécessitent un grand nombre d'observations (Abadie *et al.*, 2010). De la même façon, l'analyse de série chronologique pour estimer des effets à long terme d'une politique est difficile à cause des chocs multiples pouvant survenir en même temps que l'effet d'intérêt. Enfin, ce modèle n'a pas recours à l'hypothèse fondamentale des modèles de doubles différences qui requière que les tendances des unités observées soient parallèles (McClelland et Livia Mucciolo; 2022).

L'efficacité de la mise en place de la méthodologie du contrôle synthétique requiert cependant d'autres prérequis, qui sont à considérer par le chercheur lors de la construction du modèle et qui peuvent notamment être vérifiés par l'entremise de contrôles de faisabilité et d'optimalité lors de l'exécution du modèle (Becker et Klößner, 2018). Ces prérequis sont les suivants (Abadie, 2021) :

1. la volatilité de la variable dépendante devrait être faible et l'effet d'intérêt devrait être significatif sur cette variable;
2. l'effet d'intérêt ne doit pas avoir lieu dans les villes du groupe de contrôle pendant la période évaluée et l'effet d'intérêt ayant lieu dans la ville traitée ne doit pas introduire de chocs dans la trajectoire des variables des villes du groupe de contrôle;
3. les trajectoires de la variable dépendante des villes du groupe de contrôle ne doivent pas être interdépendantes;
4. les villes du groupe de contrôle doivent avoir des caractéristiques similaires à la ville traitée;

⁵⁰ Certains enjeux d'endogénéité peuvent aussi résulter d'un phénomène de causalité inverse, en raison du fait que l'investissement dans une infrastructure de transport puisse être motivé par une anticipation de la croissance des émissions de GES d'une ville. Ainsi, la Canada Line pourrait avoir contribué à l'augmentation des émissions de GES de la ville, mais le développement de cette infrastructure pourrait découler d'une anticipation de la hausse des émissions de GES. Par ailleurs, une ville en forte croissance démographique et économique implique aussi une hausse de ses émissions de GES, l'incitant à développer des infrastructures de transport.

5. la taille des villes doit être contrôlée dans le modèle;
6. les individus ne doivent pas anticiper le traitement en réagissant en avance par un changement dans leurs comportements;
7. une trop grande différence entre les magnitudes des variables devrait être atténuée par une reproduction des variations de ces variables, même si le niveau des variables ne peut être reproduit;
8. les estimateurs du contrôle synthétique devraient reproduire la trajectoire de la variable d'intérêt au cours de la période pré-traitement;
9. les données du modèle devraient couvrir un nombre suffisant de périodes pré-traitement, mais aussi post-traitement. Autrement dit, en fonction des données disponibles, il est nécessaire de considérer une période de quelques années précédant le traitement afin de s'assurer que les tendances de la variable dépendante du modèle soient bien reproduites à partir des variables explicatives des villes du groupe de contrôle. Cela permet ainsi de s'assurer que la trajectoire synthétique de la variable dépendante suivant le traitement soit bien due à ce dernier. De la même façon, il est donc nécessaire de considérer une période de quelques années après le traitement pour pouvoir comparer la trajectoire synthétique de la trajectoire empirique.

Le premier prérequis suppose que la volatilité de la variable dépendante est relativement limitée. D'après les statistiques descriptives présentées au chapitre suivant, c'est effectivement le cas puisque les séries de données sur les émissions de GES des villes du modèle ont un écart-type relativement faible. On suppose aussi que l'effet de la mise en service de la Canada Line est significatif sur l'évolution de la trajectoire des émissions de GES de la ville. Le deuxième prérequis requiert qu'aucune autre infrastructure n'ait été mise en place dans les autres villes du groupe de contrôle. La Canada Line étant la seule ligne de métro entièrement automatisée au Canada au cours de la période couverte par le modèle, alors qu'une telle infrastructure ne peut affecter la trajectoire des émissions de GES des autres villes du modèle, il est possible de supposer que ce prérequis est vérifié. Par ailleurs, aucun autre événement ayant la même temporalité que la mise en service de la Canada Line ne devrait affecter les villes du groupe de contrôle sans affecter la ville traitée. On ne peut, cependant, s'assurer hors de tout doute qu'un événement inobservable n'affecte aucune des trajectoires des émissions de GES des villes du modèle. Or, aucun élément pouvant décrire un tel événement n'a été déterminé dans la présente étude. La troisième hypothèse qui permet de s'assurer de l'efficacité du modèle préconise que les trajectoires des émissions de GES des villes du groupe de contrôle ne soient pas interdépendantes. À cet égard, on suppose qu'un

évènement affectant la trajectoire des émissions d'une des villes ne peut affecter celle des autres villes du modèle. Les statistiques descriptives des données confirmeront cette hypothèse. Les villes du groupe de contrôle sont toutes des villes situées au Canada et ont également été sélectionnées en fonction de leur similarité avec la ville de Vancouver en termes de leur nombre d'habitants. De cette façon, la quatrième hypothèse de base du modèle est également vérifiée. La taille des villes est contrôlée dans le modèle grâce à l'inclusion d'une variable de contrôle tenant compte du nombre d'habitants dans chacune des villes, validant ainsi le cinquième prérequis du modèle. On suppose que les habitants de Vancouver n'ont pas modifié leurs habitudes de transport avant la mise en service de la Canada Line, de sorte qu'aucune anticipation à l'égard de cette nouvelle infrastructure ne pouvait se traduire par un changement de comportement des individus. Ainsi, la sixième hypothèse de base du modèle est vérifiée. Le septième prérequis du modèle suggère qu'une trop grande asymétrie entre les magnitudes de la série de données de la variable dépendante de la ville traitée et des villes du groupe de contrôle devrait être corrigée par une reproduction en variation de ces variables. C'est ce qui a été effectué dans la présente étude afin de tenir compte du niveau particulièrement bas des émissions de GES de la ville de Vancouver, réputée comme étant l'une des villes les plus « vertes » du monde. Le huitième prérequis pour s'assurer de la validité du modèle requiert que les estimateurs du contrôle synthétique reproduisent la trajectoire de la variable d'intérêt avant l'apparition du traitement. Cette hypothèse a fait l'objet de tests approfondis par des contrôles de faisabilité et d'optimalité dans le modèle, en raison du manque de reproductibilité du contrôle synthétique pour quelques années de la période pré-traitement (voir le chapitre sur la discussion des résultats). Ces contrôles ont permis de confirmer la validité du modèle. Enfin, le dernier prérequis permettant d'attester l'optimalité des résultats du modèle repose sur le nombre de périodes pré-traitement observables. Il s'agit d'une des limites de la présente recherche, puisque le manque de disponibilité des données ne permet pas d'avoir un nombre de périodes pré-traitement satisfaisant. Toutefois, les tests d'inférence pourront rassurer le lecteur sur le résultat estimé.

La qualité de l'ajustement du modèle repose sur un bon ajustement des données des villes du groupe contrôle par rapport à la ville traitée. Si cet ajustement est réussi pour la période pré-traitement, alors il devrait persister dans le temps et les facteurs non observés devraient jouer une part négligeable dans l'effet estimé final. Pour ce faire, les variables explicatives du modèle devraient également couvrir une large partie des facteurs affectant la trajectoire des émissions de GES pour améliorer la qualité de l'ajustement du modèle (Abadie et Vives-i-Bastida, 2022). Enfin, la pondération du contrôle synthétique

devrait reposer sur plusieurs villes, même si on s'attend à ce que certaines villes n'aient pas de poids non-nuls dans le modèle (Abadie, 2021).

3.2 Formalisation du modèle

Le modèle est constitué d'un total de $J + 1$ villes ($j = 1, 2, \dots, J + 1$) où $j = 1$ est la ville affectée par le traitement et où les autres valeurs de j ($j = 2, 3, \dots, J + 1$) sont les villes composant le groupe de contrôle, soit l'ensemble des combinaisons potentielles de villes non affectées par l'installation de l'infrastructure. La date de la mise en service de la Canada Line est notée ∂ . Le temps est divisé en deux périodes :

- de T_0 à ∂ la période précédant la mise en service;
- de ∂ à T la période suivant la mise en service de la Canada Line.

Ainsi, pour chaque ville j et année t , les émissions de GES sont observées et notées Y_{jt} . De plus, pour chaque ville j , un ensemble de k variables explicatives influençant l'évolution des émissions de GES est observé et ces variables sont notées de X_{1j} à X_{kj} . Ces variables permettent d'isoler l'endogénéité induite par les facteurs qui les composent et qui peuvent aussi influencer la trajectoire des émissions de GES. Des vecteurs de taille $k \times 1$ regroupant toutes les variables de X_1 à X_{j+1} sont ainsi créés ainsi qu'une matrice de taille $k \times J$ nommée X_0 , qui regroupent toutes les variables de X_2 à X_{j+1} et les valeurs des variables explicatives pour les J villes non affectées par la mise en service de l'infrastructure. Pour Vancouver, la ville affectée par la mise en service de la Canada Line, la réponse potentielle des émissions de GES après la mise en service du transport collectif est notée Y_{1t}^I .

De ce fait, l'effet de la mise en service pour la ville de Vancouver de 2009 à 2017 est modélisé à partir de l'équation suivante :

$$\tau_{1t} = Y_{1t}^I - Y_{1t}^N$$

Cette équation de base est indexée au temps, ce qui permet à l'effet de la mise en service de la Canada Line sur les émissions de GES de varier dans le temps. Cette étude longitudinale est importante dans cette recherche, car l'effet peut ne pas être instantané et s'accumuler, ou bien se dissiper, dans le temps après la période de mise en service.

Les émissions de GES de la ville de Vancouver étant impactées durant la fin du troisième trimestre de l'année 2009 par la mise en service de la Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver, l'effet pour les années

qui suivent 2009 (inclue) est désigné par : $Y_{1t} = Y_{1t}^I$. On observe donc le résultat potentiel de la mise en service de la Canada Line sur les émissions de GES de la ville de Vancouver.

Toutefois, le but ultime de cette étude est d'évaluer un résultat contrefactuel⁵¹ noté Y_{1t}^N pour les années suivant 2009 (inclue), c'est-à-dire de déterminer comment les émissions de GES auraient évolué pour la ville traitée, Vancouver, sans la mise en service de la Canada Line.

Comme la variable Y_{1t}^I est observée, le problème d'estimer l'effet de la mise en service du *SkyTrain* est équivalent à estimer Y_{1t}^N . Pour cela, cette étude de cas comparative a pour but de reproduire cette valeur en utilisant un petit nombre de villes canadiennes non affectées par la mise en service de la Canada Line et ayant des caractéristiques similaires à la ville traitée.

Un contrôle synthétique est ainsi représenté par $J \times 1$ vecteurs de poids $W = (w_2, \dots, w_{J+1})$. Ces poids doivent être non négatifs et sommer à 1 pour ne pas permettre l'extrapolation.

Les estimateurs du contrôle synthétique de Y_{1t}^N et τ_{1t} sont par conséquent désignés comme suit :

$$\hat{Y}_{1t}^N = \sum_{j=2}^{J+1} w_j Y_{jt}$$

et

$$\hat{\tau}_{1t} = Y_{1t} - \hat{Y}_{1t}^N$$

En somme, à cause des contraintes posées sur les poids, le contrôle synthétique est une moyenne pondérée des variables des villes du groupe de contrôle. Il en résulte que seul un petit nombre de villes dans ce groupe contribue à estimer le résultat contrefactuel \hat{Y}_{1t}^N .

En outre, la contribution de chaque ville est représentée par son poids de contrôle synthétique. Comme les émissions de GES et les variables explicatives évoluent en fonction de la taille des villes, c'est-à-dire de leur nombre d'habitants, il est important d'effectuer une version pondérée du contrôle synthétique en fonction de la population :

$$\hat{\tau}_{1t} = Y_{1t} - \sum_{j=2}^{J+1} w_j^{pop} Y_{jt}$$

⁵¹ Il s'agit de ce qu'aurait été la valeur des émissions de GES de la ville de Vancouver en l'absence de la mise en service de la Canada Line.

où w_j^{pop} est la population dans la ville j au moment de la mise en service comme fraction de la population totale des autres villes.

Les poids w_2 à w_{j+1} sont choisis de sorte que le contrôle synthétique qui en résulte ressemble au mieux aux valeurs des variables explicatives de la ville traitée et de la variable dépendante avant la mise en service de la Canada Line.

Finalement, étant donnée un ensemble de constantes non négatives (v_1, \dots, v_k) , correspondant à l'importance relative des villes du groupe contrôle du modèle, représenté par les valeurs de chacune des k variables explicatives pour l'unité traitée X_{11} à X_{1k} (où 1 désigne la ville de Vancouver), le contrôle synthétique choisi est le suivant :

$$W^* = (w_2^*, \dots, w_{j+1}^*) \text{ qui minimise } \| X_1 - X_0 W \|^2$$

soit :

$$W^* = \left(\sum_{h=1}^k v_h (X_{h1} - w_2 X_{h2} - \dots - w_{j+1} X_{hj+1})^2 \right)^{1/2}$$

sous la contrainte que (w_2, \dots, w_{j+1}) soient non négatifs et somment à 1.

L'effet total du traitement pour l'unité traitée à une date t sera donc :

$$\hat{\tau}_{1t} = Y_{1t} - \sum_{j=2}^{J+1} w_j^* Y_{jt}$$

Pour un ensemble donné de poids v_1 à v_k , la minimisation de l'équation précédente est réalisée en utilisant l'optimisation quadratique contrainte telle que chaque choix potentiel de V (où $V = (v_1, \dots, v_k)$) produit un contrôle synthétique $W(V) = (w_2(V), \dots, w_{j+1}(V))'$ qui peut être déterminé en minimisant l'équation précédente sous contrainte que les poids dans $w(v)$ soient positifs et somment à 1.

Dans la continuité de cette procédure, un V^* est choisi parmi toutes les matrices positives définies et diagonales telles que l'erreur quadratique moyenne de prédiction (MSPE) de la variable de résultat est minimisée sur l'ensemble de la période avant la mise en service de la Canada Line (Abadie *et al.*, 2015). Cette méthode permet une validation de la pondération de l'estimateur du contrôle synthétique hors échantillon de sorte que les données du modèle pour la période après la mise en service de la Canada Line ne sont pas utilisées dans le calcul des poids de contrôle synthétiques puisque ces derniers ne peuvent être calculés qu'avant que l'effet de la mise en service ne soit observé.

Les poids du contrôle synthétique sont déterminés sur la période avant la mise en service de la Canada Line pour chaque valeur de V telle que $\tilde{w}_2(V), \dots, \tilde{w}_{j+1}(V)$. La MSPE du contrôle synthétique en fonction de Y_{1t}^N est déterminée par :

$$\sum_{t=t_0+1}^{T_0} (Y_{1t} - \tilde{w}_2(V) Y_{2t} - \dots - \tilde{w}_{j+1}(V) Y_{j+1t})^2$$

La valeur optimale V^* équivaut à la valeur minimale de la MSPE.

La valeur optimale W^* est ainsi déterminée par : $W^* = W(V^*)$.

Le contrôle synthétique permet finalement de déterminer $X_1 \approx X_0 W^*$.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES DONNÉES

Ce chapitre vise à présenter les bases de données utilisées dans le modèle de cette recherche, à visualiser les données des variables et à analyser leurs statistiques descriptives.

4.1 Description des bases de données

La base de données s'étend de 2005 à 2017 et contient des données annuelles. L'étendue et la fréquence de la base de données ont été définies en fonction de l'étendue du nombre d'observations disponibles pour la variable dépendante ainsi que du nombre d'observations disponibles pour chacune des variables constituant la matrice des variables explicatives. La couverture temporelle de cette étude s'achève en 2017, l'année durant laquelle une extension d'une des deux autres lignes du *SkyTrain* de Vancouver a été prolongée.

4.1.1 Taux de croissance annuel des émissions de GES à Vancouver

La variable dépendante du modèle contient la variation annuelle des émissions de GES en équivalent CO₂, exprimé en tonnes, à l'échelle d'une ville et de ses activités non seulement municipales, mais aussi industrielles, résidentielles et commerciales en incluant le transport⁵². Cette première base de données

⁵² Mis à part les données des émissions de GES des villes de Montréal et d'Ottawa, la méthodologie employée pour établir le calcul des émissions totales des villes est commune. Il s'agit de la méthodologie issue du Global Protocol for Community Scale Greenhouse Gas Emission Inventories. Ce protocole constitue une norme internationale qui permet de comparer les villes participantes entre elles à partir d'une méthodologie commune. Les émissions des villes sont rapportées à un niveau « Basic + », ce qui signifie qu'elles comprennent : l'utilisation de carburant pour les véhicules, les trains, les bateaux et les avions, le gaz naturel utilisé pour chauffer les bâtiments, l'électricité utilisée à des fins industrielles, commerciales et résidentielles, les émissions provenant des décharges, les émissions provenant des processus industriels et l'utilisation des produits, ainsi que du bétail et des terres, et l'absorption de CO₂ des forêts urbaines et des terres agricoles. Concernant les villes de Montréal et d'Ottawa, pour lesquelles le calcul des émissions totales de GES a été réalisé par des bureaux d'études à la suite de commandes des villes (SNC Lavalin et la Direction de l'environnement du Service des infrastructures, du transport et de l'environnement de la ville de Montréal). Leur évaluation est proche du niveau « Basic + » et comprend : les bâtiments (notamment les émissions provenant des secteurs résidentiel, commercial, institutionnel, industriels), les lampadaires et les émissions fugitives, le transport (notamment les émissions des véhicules routiers, aériens, ferroviaires et hors route), les déchets (comprenant les émissions provenant du traitement des déchets solides et des eaux usées), l'agriculture (comprenant les émissions provenant de la production végétale et des opérations d'élevage), les installations municipales (comprenant les bâtiments, les lampadaires, les feux de circulation et le réseau de métro léger (gares et trains), la flotte (comprenant les flottes municipales, de transport en commun et de police), les déchets solides (comprenant les émissions des décharges de la ville) et enfin le traitement des eaux usées (comprenant les émissions provenant du traitement des eaux usées).

couvre le domaine de l'environnement, en particulier celui des changements climatiques et a été élaborée en répertoriant les données disponibles sur les bases de données fournies en libre accès par les villes du groupe de contrôle.

Ces villes ont été choisies de sorte qu'elles soient similaires à celle de Vancouver en taille (par leur nombre d'habitants) et en attractivité économique. Initialement, 11 des villes les plus peuplées du Canada ont été sélectionnées pour constituer le groupe contrôle du modèle, mais les données sur les émissions de GES pour l'ensemble des activités de la ville (et non des seuls services fournis par la municipalité) n'ont pu être collectées que pour les villes de Toronto, Montréal, Calgary, Ottawa, Edmonton, Hamilton ainsi que pour Vancouver, où a eu lieu la mise en service de la Canada Line. Les données pour les villes de Mississauga, Winnipeg, Brampton et Québec n'étaient pas ou partiellement disponibles. La ville de Surrey présentait quant à elle des données sur les GES, mais les autres données requises pour constituer la matrice des variables explicatives n'étaient pas toutes disponibles. Le même problème est survenu lorsque les villes de New York, Boston, Portland et Washington, les seules villes américaines pour lesquelles les données des émissions de GES étaient disponibles sur l'ensemble de la couverture temporelle requise, ont fait l'objet de tests d'inclusion au groupe contrôle. Au total, seulement sept villes ont donc pu être incluses dans le modèle. Cependant, un plus grand groupe de contrôle n'est pas nécessairement meilleur qu'un plus petit si les villes non traitées présentent des caractéristiques communes à la ville traitée, ce qui permet de réduire les biais de surajustement et d'interpolation (Abadie et Vives-i-Bastida, 2022).

4.1.2 Données composant la matrice des variables explicatives du groupe de contrôle

Le choix des variables explicatives du modèle a consisté en un processus itératif reposant sur des hypothèses que l'on a émises afin de déterminer quelles variables ont le plus d'impact sur la trajectoire des émissions de GES d'une ville. Des tests d'inclusion ont été réalisés afin de déterminer quelle combinaison de variables permettait de reproduire pour toutes les villes du groupe de contrôle la trajectoire de la variable dépendante la plus proche de celle observée empiriquement.⁵³

La matrice des variables explicatives est composée de données couvrant le domaine de la croissance économique et démographique, des politiques publiques et des caractéristiques socio-économiques des

⁵³ Les changements dans les réseaux de transport en commun dans les autres villes ne sont pas contrôlés dans ce modèle, car aucune infrastructure lourde s'apparentant aux caractéristiques de la Canada Line n'a été mise en place au cours de notre période d'étude dans les villes du groupe de contrôle. Par ailleurs, on suppose que si des changements dans les systèmes de transport des villes ont eu lieu, il s'agit de changements marginaux n'impactant pas significativement la trajectoire des émissions de GES de la ville sur le long terme.

villes. Ces données ont été collectées sur le site des données ouvertes de Statistique Canada. Elles recensent les tendances sociales, économiques et démographiques des villes, qui, d'après les analyses des statistiques descriptives, ont un impact significatif sur l'évolution de la variable dépendante de la ville traitée. Les caractéristiques de la population des villes à savoir l'évolution annuelle du nombre d'habitants et les habitudes de transports sont issues des données des recensements de la population canadienne de 2006, 2011 et 2016.

Les données retenues pour constituer la matrice des variables explicatives ont été sélectionnées en raison du fait que les secteurs de l'immobilier et du transport sont les deux principaux secteurs émetteurs de GES d'une ville. En effet, la ville de Vancouver a publié un rapport en 2019 dans lequel elle y expose que près de 35 % des émissions de GES de la ville sont issues de l'utilisation des transports et 26 % découlent de l'énergie consommée par les immeubles de la ville. Ainsi, pour capter l'importance de ces secteurs générateurs de GES, la première série de données ayant été collectée pour chacune des villes du modèle répertorie la valeur des investissements en construction de bâtiments non résidentiels (incluant les immeubles industriels, commerciaux, institutionnels et gouvernementaux) en dollars canadiens courants et pour une série désaisonnalisée. La deuxième série de données collectée contient la valeur des permis de construire de bâtiments résidentiels (incluant les maisons unifamiliales, dont les maisons mobiles, les chalets, les maisons doubles, les maisons rangées, les appartements et les transformations) en dollars canadiens courants et pour une série désaisonnalisée.

Afin de capter l'importance du transport et du comportement de déplacement des individus dans la modélisation des émissions de GES, le nombre d'utilisateurs de véhicules individuels tels que les automobiles, les motocyclettes, les camions ou encore les fourgonnettes (en incluant les conducteurs ainsi que les passagers) a été collecté pour chacune des villes contrôles et de la ville traitée. Le nombre d'utilisateurs de transports en commun (en incluant les autobus, les métros, les trains légers sur rail, les tramways ou encore les trains de banlieue et les traversiers pour passagers) a aussi été collecté ainsi que le nombre de personnes se déplaçant à pied ou à bicyclette.

L'activité économique joue aussi un rôle prépondérant dans les émissions de GES d'une ville, puisque plus il y a de flux de biens, de services ou encore de personnes, plus les émissions de GES ont tendance à augmenter. Ainsi, la valeur du PIB (en dollars canadiens courants) des villes contrôles et de la ville traitée a été collectée afin de capter l'intensité de l'activité économique des villes en termes monétaires.

Le nombre d'habitants dans chacune des villes d'intérêts a aussi été collecté puisque, généralement, plus la population d'une ville augmente, plus des immeubles y sont construits, plus des infrastructures y sont développées et plus les individus utilisent différents modes de transports. Ces hypothèses sont vérifiées avec l'analyse des statistiques descriptives des variables.

Enfin, les données sur les revenus provinciaux de la taxe sur l'essence et les carburants (en dollars canadiens courants) ont été ajoutées à la matrice des variables explicatives afin de prendre en compte l'impact de cette taxe sur la trajectoire des émissions de GES des villes et sur les changements du comportement de déplacement des individus. L'introduction de cette variable dans le modèle vise à représenter à la fois les niveaux de taxe sur l'essence, mais aussi le volume de la flotte de véhicules concernés. Bien qu'il aurait été préférable d'obtenir des données sur ces deux éléments, celles-ci n'étaient pas disponibles pour les villes du modèle sur la période donnée.

D'autres variables ont fait l'objet de plusieurs tests d'inclusion dans la matrice des variables explicatives, telles que : le taux de chômage annuel des villes, le revenu total médian annuel des villes, l'indice des prix à la consommation annuel des villes, les ventes annuelles de carburants destinés aux véhicules automobiles, le prix de la tonne de CO₂ sur les marchés du carbone selon les provinces, l'énergie annuelle produite à partir de combustibles (en GWh) par provinces, l'écoulement annuel d'énergie primaire et secondaire (en TJ) par provinces (en incluant d'abord la production puis seulement les transports), les prix de détail moyens annuels de l'essence et du mazout par ville, ou encore l'évolution des températures moyennes annuelles relevées dans les villes (en degré Celsius). Cependant, ces variables n'ont pas permis d'améliorer la qualité de l'ajustement du modèle. Par ailleurs, l'ajout d'un trop grand nombre de variables dans la matrice peut générer du bruit et entraîner un mauvais ajustement du modèle en introduisant des biais dans son estimation (Vives-i-Bastida, 2023).

4.1.3 Traitement des données manquantes

Les données constituant la variable dépendante du modèle sont parfois manquantes pour une ou deux années. Les émissions de GES pour la ville de Toronto sont disponibles chaque année de 2004 à 2018, de 2003 à 2017 pour la ville de Montréal, de 2005 à 2019 pour la ville de Calgary, de 2004 à 2019 pour la ville d'Ottawa, de 2005 à 2019 pour la ville d'Edmonton et de 2005 à 2019 pour la ville de Vancouver. Quelques données manquantes dans ces séries ont été collectées à partir de sources de données différentes à la première, par exemple dans des rapports sur les inventaires des émissions de GES des villes, mais ces derniers présentaient la même méthodologie de comptabilité des émissions. Toutefois, les données

manquantes n'étant pas acceptées dans le modèle puisqu'il utilise l'intégralité des données des séries temporelles, quelques années manquantes ont été complétées par une interpolation linéaire. Cette méthode d'interpolation peut être utilisée pour traiter les données manquantes dans un contrôle synthétique et préserver la moyenne de la série afin de limiter l'introduction de biais dans le modèle, notamment pour les spécifications en différence première (Engelbrekton, 2021; Little et Rubin, 2019). Un algorithme d'estimation basé sur le voisin le plus proche a aussi été testé, mais les résultats produits sont similaires à ceux de l'interpolation linéaire (Amjad, 2018). L'existence d'une tendance dans l'évolution des séries de données chronologiques permet d'interpoler les données manquantes en utilisant les « voisins les plus proches » ou une interpolation linéaire (Amjad, 2018). La ville d'Hamilton, ayant quant à elle des données disponibles sur ses émissions de GES pour les années allant de 2006 à 2017, a pu être ajoutée au groupe de contrôle en calculant l'année 2005 manquante à la série par un calcul à partir du taux de croissance annuel moyen de celle-ci.

Les données constituant la matrice des variables explicatives sont quant à elles toutes disponibles pour les années 2005 à 2017 à l'exception des données sur le PIB de la ville d'Hamilton de 2005 à 2008, qui ont également été approximées à partir du taux de croissance annuel moyen de cette série. De plus, l'année 2005 pour les données sur le PIB de toutes les autres villes a été définie à partir d'une base de données complémentaire à la première, également produite par Statistique Canada. Le défi était ici de trouver suffisamment de villes contrôles ayant des données avec un impact significatif sur la trajectoire de la variable dépendante, présentant une cohérence structurelle ainsi qu'une méthode d'assemblage similaire et ayant la même couverture temporelle pour chacune des villes du modèle.

4.2 Visualisation des données

4.2.1 Taux de croissance annuel des émissions de GES à Vancouver

L'évolution annuelle des émissions de GES en équivalent CO₂, exprimée en milliers de tonnes, est illustrée à la Figure 4.1. Ces émissions de GES sont en baisse depuis 2005 dans la plupart des villes canadiennes. Cela peut éventuellement s'expliquer par le contexte international favorisant l'émergence de lois et la sensibilisation des populations à l'égard des changements climatiques. On constate que les villes émettant le plus d'émissions de GES en 2017 sont Calgary et Edmonton. Cela s'explique par le fait que les deux premières villes sont situées en Alberta, une province réputée pour la richesse de son sol puisque l'une des énergies les plus utilisées de la province est le pétrole. Toronto est la troisième ville la plus émettrice de GES, mais c'est aussi la ville avec le plus grand PIB annuel. Toutefois, les villes les plus peuplées sont en

général celles qui émettent le moins de GES par habitant comme Toronto, Montréal, et Ottawa, alors qu'Hamilton, la ville la moins peuplée, est celle dont les habitants émettent le plus de GES.

La ville émettant le moins d'émissions de GES est celle de Vancouver, qui se trouve aussi être la ville avec le moins d'émissions par habitant. Cette position peut s'expliquer par le fait que la ville est réputée être la quatrième ville la plus verte du monde selon le groupe français Engie⁵⁴. Ainsi, les émissions de GES de la ville de Vancouver sont particulièrement faibles par rapport aux autres grandes villes canadiennes, atteignant un maximum de 2 885 000 tonnes de GES en 2008 pour diminuer légèrement jusqu'à 2 370 000 tonnes de GES en 2015. Sur le long terme, la tendance des émissions de la ville de Vancouver est restée constante, malgré les ambitions de la ville de réduire à 1 300 000 tonnes de GES ses émissions pour 2020, une cible qui n'a pas été atteinte.

Le faible niveau des émissions de GES de Vancouver ainsi que la stabilité de leur trajectoire dans le temps compliquent sa comparaison avec celle des autres villes canadiennes, et ce, même en étudiant l'évolution de la quantité d'émissions de GES annuelles par habitant (voir le troisième graphique de la Figure 4.1). En d'autres termes, le groupe de contrôle ne permet pas de reproduire correctement les caractéristiques de la variable dépendante de la ville traitée avec les variables en niveau. Les séries de données pour chacune des villes ont donc été calculées en variation, dans le but de mieux capter les similarités des trajectoires entre les données du groupe de contrôle et celles de la ville traitée. Le deuxième graphique de la Figure 4.1 permet d'illustrer ces tendances. On constate que les émissions de GES de la ville d'Hamilton ont le plus de variabilité annuelle, suivi de la ville de Calgary, de Toronto et d'Edmonton. Certaines tendances sont aussi révélées. On observe une tendance à la baisse des émissions de GES dans la majorité des villes entre les années 2006 et 2007, 2008 et 2009, 2011 et 2012, ainsi que 2014 et 2016. On peut aussi noter des tendances à la hausse entre les années 2012 et 2014, ainsi que 2016 et 2017. Parfois, les émissions de GES de certaines villes suivent des trajectoires différentes de celle de Vancouver, notamment celles d'Hamilton et de Calgary entre les années 2008 et 2011 et celles de Toronto et d'Edmonton entre les années 2015 et 2016.

⁵⁴ <https://particuliers.engie.fr/pourquoi-choisir-engie/conseils-transition-energetique/conseils-energies-renouvelables/top-5-villes-durables-energie-verte.html>

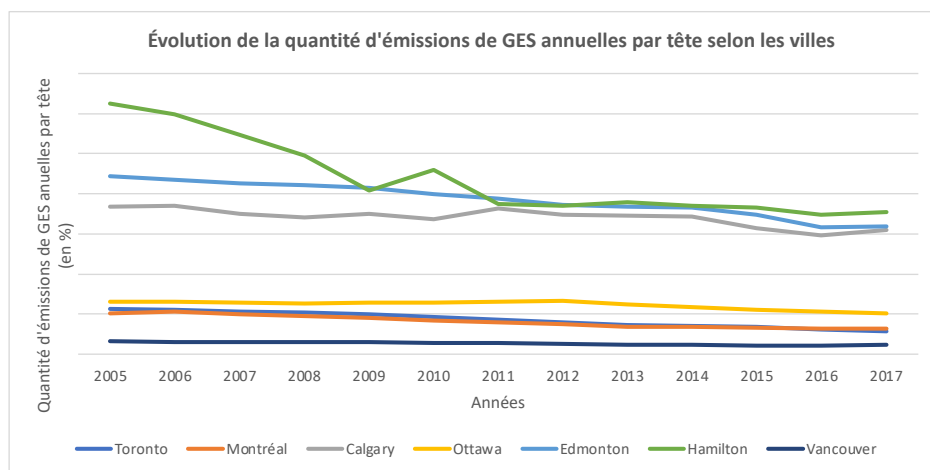
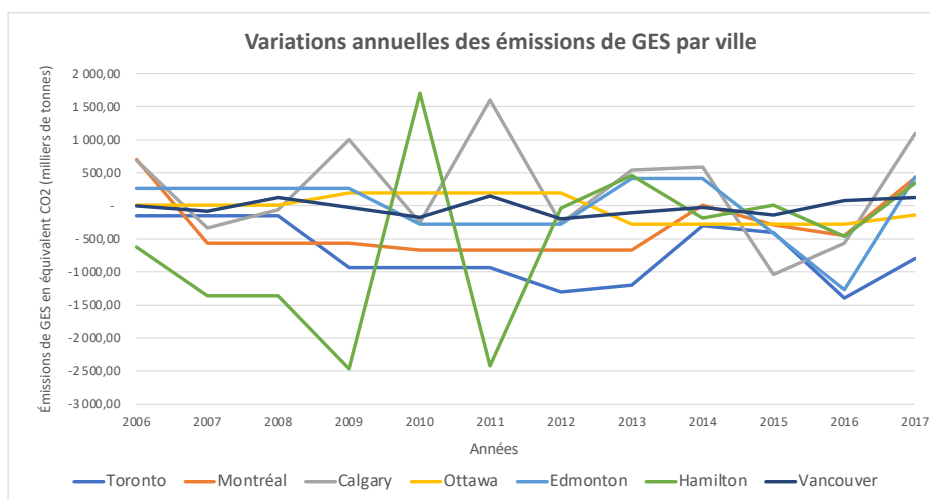
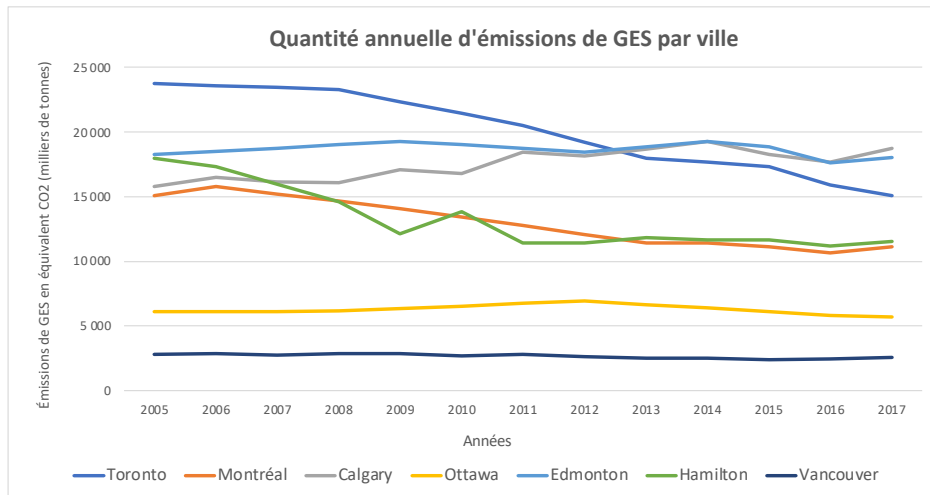


Figure 4.1 : Graphique des données de la variable dépendante

4.2.2 Données composant la matrice des variables explicatives du groupe de contrôle

L'évolution annuelle des séries de données composant la matrice des variables explicatives du modèle est illustrée à la Figure 4.2. On constate que les tendances des variables explicatives sont similaires entre les villes du groupe contrôle et la ville traitée. Le lecteur intéressé peut également consulter l'évolution des variations annuelles de ces données à l'Annexe F. Les données en variation permettent d'obtenir des valeurs plus proches entre les données des villes du groupe contrôle et de la ville traitée, ce qui permet d'améliorer le résultat du contrôle synthétique en réduisant les biais d'interpolation (Abadie et L'Hour, 2021). De plus, on remarque que les séries de données des variables explicatives sont peu volatiles, ce qui permet d'atténuer les risques de surajustement, en particulier sur un court horizon temporel (Abadie et Vives-i-Bastida, 2022).

La valeur des investissements en construction d'immeubles non résidentiels est la plus élevée à Toronto et à Montréal, où la croissance de ces investissements a été la plus importante depuis 2006. On constate que l'évolution de la valeur de ces investissements a augmenté à travers le temps, mais cette croissance a été plus faible dans les villes d'Ottawa, d'Hamilton et de Vancouver. La croissance des investissements, tant dans la construction d'immeubles non résidentiels que résidentiels, dans les villes albertaines a été plus variable⁵⁵.

La valeur du permis de construire des immeubles résidentiels est la plus élevée dans les villes de Toronto, de Vancouver et de Montréal, qui ont connu la plus grande croissance immobilière résidentielle au Canada alors que celle des villes d'Ottawa et d'Hamilton a été plus stable dans le temps. Cette série de données suit l'activité économique de près avec une forte chute suivant la crise de 2007.

La croissance de l'évolution du PIB annuel des villes ne semble pas avoir été particulièrement impactée par les crises économiques. Les villes ayant la plus forte croissance de leur PIB sont Toronto, Montréal et Vancouver. Elles sont suivies par Calgary, Edmonton, Ottawa et Hamilton, dont le PIB est resté plus stable dans le temps.

⁵⁵ Cette instabilité en Alberta peut provenir de la non-diversification et de la volatilité des investissements en structures pétrolières qui sont sensibles au prix du baril. Ainsi, les pics de 2008 et de 2012 correspondent à un pic du prix du baril. Seul celui de 2015 fait fi de ce cours du prix du baril, ce qui peut être expliqué par le projet de pipeline Keystone XXL qui devait fournir du pétrole albertain directement au sud de la frontière.

Le nombre d'habitants des villes demeure en croissance année après année et reflète le classement des principaux centres d'attraction économiques au pays.

Le taux d'utilisateurs d'automobiles par ville est le plus élevé dans les grands centres économiques du pays, qui constatent aussi la plus forte baisse de ce taux entre 2009 et 2010. Le nombre d'utilisateurs d'automobiles est toutefois en légère hausse après 2015.

L'évolution du taux d'utilisateurs de transports en commun par ville est globalement à la hausse dans la plupart des villes, avec une augmentation plus importante entre 2014 et 2015 pour les villes de Toronto, Montréal et Vancouver. Dans ce classement, on constate que les villes les mieux desservies en matière de transport en commun sont les villes ayant le taux d'utilisation le plus élevé.

L'intérêt pour les transports « verts » comme la marche, le vélo, la trottinette ou encore la planche à roulettes a fortement augmenté entre 2014 et 2015 pour les villes de Toronto, Montréal et Vancouver, alors que cette appétence pour les transports « verts » est restée stable dans les autres villes à travers le temps. Rapporté au nombre d'habitants, on constate de manière générale que les individus utilisant le plus les transports verts et les transports en commun résident généralement dans les villes où l'automobile est la moins utilisée.

On constate que les revenus provenant des taxes provinciales sur l'essence et les carburants de l'Ontario sont les plus élevés, suivis du Québec, de la Colombie-Britannique et de l'Alberta. De manière globale, il est possible de constater que ces revenus ont augmenté à travers le temps. Cette croissance est explicable d'une part à cause de celle de la population et d'autre part par à cause de la croissance de l'industrie consommant de l'essence ou des carburants ainsi que des décisions des gouvernements provinciaux consécutives à la hausse de la taxe. Ainsi, il est possible de constater que le gouvernement de l'Alberta taxe de plus en plus la consommation d'essence et de carburants alors qu'au Québec, les revenus sont restés stables depuis 2013. Cela peut peut-être en partie s'expliquer par la création d'un marché du carbone commun avec la Californie.

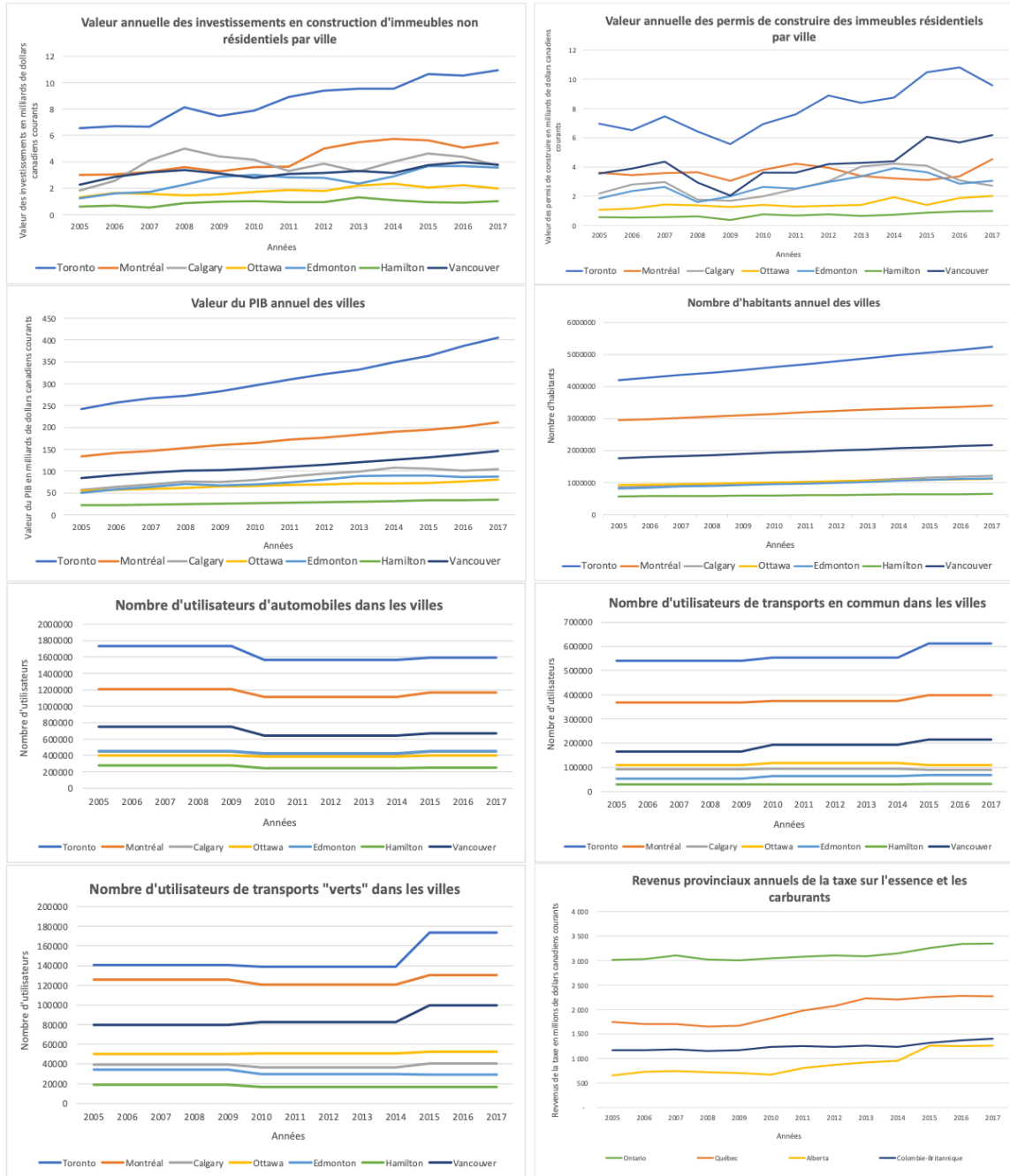


Figure 4.2 : Graphique des données composant la matrice des variables explicatives

4.3 Statistiques descriptives des données du modèle

Les statistiques descriptives des séries de données par variable et par ville permettent d'apprécier avec plus de précisions la tendance, la volatilité et la dispersion des données de chaque série. Elles sont présentées dans le Tableau 4.1. Seules les données utilisées dans le modèle figurent dans ce tableau. Les statistiques descriptives des données n'ayant pu être incluses dans la matrice des variables explicatives

ont été analysées au préalable et ont permis de sélectionner les données effectivement employées dans le modèle. Ces statistiques ont ainsi permis de comprendre des problèmes survenus durant la programmation du modèle.

La moyenne, la médiane, l'écart-type, le minimum et le maximum de chacune des séries de données ont été analysés. On constate que les émissions de GES des villes de Toronto et d'Hamilton sont les données les plus dispersées autour de leur moyenne puisque leur écart-type est important. Les écarts-types des émissions de GES des villes d'Ottawa et d'Edmonton sont les plus faibles, ce qui signifie que ces séries de données sont les moins volatiles. C'est aussi le cas pour la ville de Vancouver. On s'attend donc à ce que les villes d'Ottawa et d'Edmonton détiennent un poids plus important dans le modèle.

Concernant les variables explicatives, on observe que les données des investissements en construction d'immeubles non résidentiels pour les villes de Toronto et de Montréal sont les plus dispersées autour de leur moyenne. L'écart-type le plus faible de cette série de données est celui des villes d'Ottawa et d'Hamilton, similairement à Vancouver. Les données de la valeur des permis de construire d'immeubles résidentiels pour les villes de Toronto et de Vancouver sont les plus dispersées autour de leur moyenne. L'écart-type des données du PIB est le plus élevé pour les villes de Toronto et de Montréal contrairement à celui des données des villes de Calgary et de Vancouver. Les données du nombre d'habitants des villes d'Ottawa et d'Hamilton sont les moins dispersées par rapport à leur moyenne, à l'inverse de la ville de Toronto, tout comme pour les variables sur les comportements de déplacement des individus. Les écarts-types des données du nombre d'habitants pour la ville de Vancouver sont plus proches de ceux des villes de Calgary et de Montréal. Les écarts-types des variables sur le comportement de déplacement des individus pour la ville de Vancouver sont davantage similaires aux données de la ville de Toronto. Les données des revenus de la taxe sur l'essence et les carburants de Vancouver sont les moins dispersées autour de la moyenne, à l'inverse des villes albertaines.

L'analyse de ces statistiques descriptives permet de compléter l'analyse graphique des données. Les investissements en construction d'immeubles non résidentiels, la valeur des permis de construire d'immeubles résidentiels, et les comportements de déplacement des individus sont les plus volatiles pour les villes ontariennes de Toronto et d'Ottawa. La tendance de la plupart de ces séries étant similaire à celle de Vancouver, on s'attend à ce que le contrôle synthétique accorde plus de poids à ces villes. La valeur du PIB et le nombre d'habitants pour la ville de Calgary ont un comportement davantage similaire aux données de Vancouver. On s'attend à ce que le modèle accorde aussi du poids à cette ville.

Tableau 4.1 : Statistiques descriptives des données

	Toronto	Montréal	Calgary	Ottawa	Edmonton	Hamilton	Vancouver
Émissions de GES en équivalent CO₂							
Moyenne	20 123 000	12 993 000	17 515 000	6 293 500	18 670 000	13 244 000	2 677 200
Médiane	20 500 000	12 756 000	17 679 138	6 153 819	18 768 808	11 864 144	2 690 000
Écart-type	3 103 300	1 815 400	1 172 500	364 360	491 820	2 329 000	176 090
Minimum	15 100 000	10 681 000	15 798 474	5 683 000	17 602 549	11 217 626	2 370 000
Maximum	23 750 000	15 795 000	19 286 507	6 951 000	19 290 653	17 349 813	2 885 000
Investissements en construction d'immeubles non résidentiels							
Moyenne	8.6813 ^{e+09}	4.2944 ^{e+09}	3.7887 ^{e+09}	1.8241 ^{e+09}	2.6585 ^{e+09}	9.1504 ^{e+08}	3.2222 ^{e+09}
Médiane	8.9244 ^{e+09}	3.6461 ^{e+09}	4.0046 ^{e+09}	1.7962 ^{e+09}	2.8131 ^{e+09}	9.5412 ^{e+08}	3.1633 ^{e+09}
Écart-type	1.5619 ^{e+09}	1.1004 ^{e+09}	8.6920 ^{e+08}	3.2228 ^{e+08}	7.8115 ^{e+08}	2.0683 ^{e+08}	4.4587 ^{e+08}
Minimum	6.5442 ^{e+09}	3.0078 ^{e+09}	1.8170 ^{e+09}	1.3055 ^{e+09}	1.2447 ^{e+09}	5.4733 ^{e+08}	2.2849 ^{e+09}
Maximum	1.0937 ^{e+10}	5.7564 ^{e+09}	5.0033 ^{e+09}	2.3377 ^{e+09}	3.6715 ^{e+09}	1.3329 ^{e+09}	3.9685 ^{e+09}
Valeur des permis de construire d'immeubles résidentiels							
Moyenne	8.0248 ^{e+09}	3.6096 ^{e+09}	2.8566 ^{e+09}	1.4681 ^{e+09}	2.7220 ^{e+09}	7.0055 ^{e+08}	4.2143 ^{e+09}
Médiane	7.6012 ^{e+09}	3.5774 ^{e+09}	2.7967 ^{e+09}	1.3970 ^{e+09}	2.6463 ^{e+09}	6.7349 ^{e+08}	4.1896 ^{e+09}
Écart-type	1.6180 ^{e+09}	4.3156 ^{e+08}	8.5362 ^{e+08}	2.9763 ^{e+08}	6.8379 ^{e+08}	1.7022 ^{e+08}	1.1917 ^{e+09}
Minimum	5.5527 ^{e+09}	3.0604 ^{e+09}	1.6787 ^{e+09}	1.0762 ^{e+09}	1.6010 ^{e+09}	3.8652 ^{e+08}	2.0556 ^{e+09}
Maximum	1.0806 ^{e+10}	4.5426 ^{e+09}	4.2388 ^{e+09}	2.0268 ^{e+09}	3.9169 ^{e+09}	9.8119 ^{e+08}	6.1856 ^{e+09}
Produit intérieur brut							
Moyenne	3.1420 ^{e+11}	1.7137 ^{e+11}	8.6177 ^{e+10}	6.7373 ^{e+10}	7.5069 ^{e+10}	2.7991 ^{e+10}	1.1276 ^{e+11}
Médiane	3.0998 ^{e+11}	1.7236 ^{e+11}	8.7034 ^{e+10}	6.8671 ^{e+10}	7.3822 ^{e+10}	2.8198 ^{e+10}	1.1040 ^{e+11}
Écart-type	5.1246 ^{e+10}	2.4120 ^{e+10}	1.7059 ^{e+10}	7.6576 ^{e+09}	1.3204 ^{e+10}	4.2246 ^{e+09}	1.8714 ^{e+10}
Minimum	2.4150 ^{e+11}	1.3409 ^{e+11}	5.7303 ^{e+10}	5.4627 ^{e+10}	5.0317 ^{e+10}	2.1638 ^{e+10}	8.3863 ^{e+10}
Maximum	4.0516 ^{e+11}	2.1162 ^{e+11}	1.0763 ^{e+11}	8.0338 ^{e+10}	9.0214 ^{e+10}	3.4673 ^{e+10}	1.4576 ^{e+11}
Nombre d'habitants							
Moyenne	4 706 200	3 185 200	1 032 900	1 024 200	976 830	611 680	1 969 400
Médiane	4 695 800	3 194 000	1 016 500	1 028 700	967 300	609 400	1 972 700
Écart-type	341 610	150 740	115 440	64 846	100 290	26 035	136 910
Minimum	4 193 800	2 954 400	859 500	925 700	822 600	575 000	1 767 100
Maximum	5 239 500	3 402 600	1 211 400	1 117 400	1 128 300	654 000	2 179 100
Nombre d'automobilistes							
Moyenne	1 636 100	1 162 500	433 740	393 850	441 670	257 580	689 670
Médiane	1 595 575	1 166 260	444 310	396 560	452 040	252 845	667 550
Écart-type	79 430	44 695	17 585	6 482	14 536	14 797	49 565
Minimum	1 565 025	1 112 465	412 475	386 380	424 015	243 060	643 790
Maximum	1 731 520	1 210 275	448 670	401 775	453 110	274 935	748 810
Nombre d'utilisateurs des transports en commun							
Moyenne	562 030	377 140	91 877	112 000	60 420	29 019	187 580
Médiane	553 660	374 230	91 370	109 375	63 650	28 345	193 725
Écart-type	29 048	12 047	1 244	3 902	6 288	1 295	19 946
Minimum	540 495	367 755	90 340	108 840	52 995	28 330	165 435
Maximum	611 885	397 625	93 305	116 735	67 410	31 290	214 245
Nombre d'utilisateurs de transports « verts »							
Moyenne	147 440	124 880	38 469	50 746	31 115	17 488	85 473
Médiane	140 315	125 960	39 315	50 525	29 500	16 740	82 565
Écart-type	14 986	3 836	1 670	976	2 421	1 255	8 048
Minimum	138 800	120 665	36 500	49 975	28 925	16 420	80 000
Maximum	173 695	130 105	40 340	52 400	34 045	19 005	99 440
Revenus de la taxe sur l'essence et les carburants							
Moyenne	3.1211 ^{e+09}	1.9670 ^{e+09}	8.8646 ^{e+08}	3.1211 ^{e+09}	8.8646 ^{e+08}	3.1211 ^{e+09}	1.2425 ^{e+09}
Médiane	3.0850 ^{e+09}	1.9800 ^{e+09}	8.0200 ^{e+08}	3.0850 ^{e+09}	8.0200 ^{e+08}	3.0850 ^{e+09}	1.2370 ^{e+09}
Écart-type	1.1893 ^{e+08}	2.6013 ^{e+08}	2.3095 ^{e+08}	1.1893 ^{e+08}	2.3095 ^{e+08}	1.1893 ^{e+08}	7.9812 ^{e+07}
Minimum	3.0040 ^{e+09}	1.6500 ^{e+09}	6.5300 ^{e+08}	3.0040 ^{e+09}	6.5300 ^{e+08}	3.0040 ^{e+09}	1.1510 ^{e+09}
Maximum	3.3470 ^{e+09}	2.2810 ^{e+09}	1.2640 ^{e+09}	3.3470 ^{e+09}	1.2640 ^{e+09}	3.3470 ^{e+09}	1.3990 ^{e+09}

Les coefficients de corrélation entre l'évolution des émissions de GES des villes du groupe contrôle et celles de Vancouver permettent d'évaluer avec plus de précision la force de la corrélation entre ces variables. Ils sont présentés au Tableau 4.2. On observe que les émissions de GES de la ville de Vancouver sont fortement corrélées avec celles des villes de Toronto et de Montréal (environ 87 %). Les émissions des villes de Calgary et d'Hamilton semblent aussi corrélées avec celles de Vancouver bien que ce soit dans une plus faible mesure. Les émissions de GES de Calgary sont corrélées négativement avec celles de Vancouver à près de 68 % et celles d'Hamilton le sont positivement à environ 62 %. On observe que les émissions de GES de Vancouver sont positivement corrélées avec les émissions de GES des autres villes du groupe de contrôle, à l'exception de la ville de Calgary pour laquelle on observe une corrélation négative, puisque ses émissions de GES ont globalement augmenté depuis 2005, tandis que celles de Vancouver (et des autres villes) ont globalement diminué. Sachant que Calgary est située dans une province depuis laquelle le Canada produit et exporte beaucoup de pétrole, ce résultat paraît cohérent. Les émissions des villes d'Ottawa et d'Edmonton ne sont que faiblement corrélées avec celles de Vancouver (respectivement 16 % et 23 %).

Tableau 4.2 : Coefficients de corrélation entre la variable dépendante des villes contrôles et de la ville traitée

Coefficients de corrélation entre les émissions de GES des villes contrôles et de Vancouver					
<i>Toronto</i>	<i>Montréal</i>	<i>Calgary</i>	<i>Ottawa</i>	<i>Edmonton</i>	<i>Hamilton</i>
0.8695	0.8677	-0.6785	0.1627	0.2331	0.6170

Les corrélations entre les variables explicatives du modèle et celle des émissions de GES pour chacune des villes contrôles et de la ville traitée ont aussi été analysées au Tableau 4.3. L'analyse de ces statistiques révèle que le nombre d'utilisateurs d'automobiles, de transports en commun et de transports « verts », le nombre d'habitants, le PIB des villes et les revenus provinciaux annuels de la taxe sur l'essence et les carburants sont des variables en générale très corrélées avec les émissions de GES de leur ville. Toutefois, l'amplitude de ces corrélations varie selon les villes. Par exemple, la valeur des investissements en construction de bâtiments non résidentiels de la ville de Toronto est corrélée négativement à plus de 96 % avec les émissions de GES de la ville. À l'inverse, pour cette même variable, la corrélation avec les émissions de GES pour la ville d'Ottawa est quasiment nulle (1,67 %). C'est le cas également des villes albertaines, mais cela s'explique par le fait que la croissance des investissements en construction de bâtiments non résidentiels a été plus faible à partir de 2010, probablement en réponse à la crise financière de 2008, mais aussi au pic du prix du baril du pétrole qui influence la volatilité des investissements en structures pétrolières. La valeur des permis de construire des immeubles résidentiels est quant à elle très faiblement

corrélée avec les émissions de GES des villes de Montréal et d'Edmonton. Par ailleurs, le PIB et le nombre d'habitants des villes d'Edmonton et d'Ottawa ont également des corrélations plus faibles avec les émissions de GES de ces villes. Les comportements de déplacements des individus sont plus faiblement corrélés avec les émissions de GES des villes albertaines.

Tableau 4.3 : Coefficients de corrélation entre la variable dépendante et les variables explicatives par ville

Coefficients de corrélation entre les émissions de GES et les variables explicatives							
	<i>Toronto</i>	<i>Montréal</i>	<i>Calgary</i>	<i>Ottawa</i>	<i>Edmonton</i>	<i>Hamilton</i>	<i>Vancouver</i>
Investissements en construction d'immeubles non résidentiels	-0.9608	-0.9264	0.1547	0.0167	-0.1277	-0.7603	-0.6511
Valeur des permis de construire d'immeubles résidentiels	-0.8814	-0.0774	0.6709	-0.4198	0.0392	-0.5401	-0.8169
PIB	-0.9869	-0.9601	0.9080	-0.0996	-0.0400	-0.8598	-0.8319
Nombre d'habitants	-0.9876	-0.9795	0.8144	-0.0927	-0.2565	-0.8316	-0.8530
Nombre d'automobilistes	0.7676	0.6601	-0.5974	-0.8957	-0.3222	0.7425	0.6643
Nombre d'utilisateurs de transports en commun	-0.8425	-0.7837	0.2965	0.8145	-0.2930	-0.4262	-0.8545
Nombre d'utilisateurs de transports « verts »	-0.7116	-0.0563	-0.3645	-0.4807	0.2167	0.7813	-0.7585
Revenus de la taxe sur l'essence et les carburants	-0.8703	-0.9590	0.6466	-0.5376	-0.4717	-0.5513	-0.7884

CHAPITRE 5

RÉSULTATS

Ce chapitre vise à présenter les résultats obtenus par le modèle ainsi que les techniques inférentielles utilisées pour juger de la significativité du résultat estimé. Des informations sur les codes informatiques utilisés sont également fournies.

5.1 Précisions sur la programmation du modèle

La méthode du contrôle synthétique a été programmée dans les langages des logiciels Matlab et R⁵⁶, qui utilisent des *packages* différents pour réaliser l'optimisation des pondérations du contrôle synthétique (Kuosmanen *et al.*, 2021; Becker et Klößner, 2018). Pour reproduire une trajectoire synthétique de la variable dépendante la plus similaire à celle observée empiriquement, la fonction `synth()` associée au *package synth* du logiciel R permet de déterminer le vecteur V^* optimal afin de calculer les pondérations des villes du groupe de contrôle en minimisant la MSPE de l'estimateur du contrôle synthétique.

Bien que les logiciels Matlab et R fonctionnent de la même façon, ils emploient des *packages* avec des procédures différentes de sorte que la méthode d'optimisation de chacun des logiciels produit un vecteur V^* différent. Les résultats qui sont présentés dans cette recherche sont issus de la méthode d'optimisation du *package synth* du logiciel R, puisque la racine de la MSPE entre les périodes post-traitement et pré-traitement est la plus faible. Par ailleurs, en complément du *package synth*, le *package MSCMT* est une procédure d'optimisation intelligente et robuste qui permet d'ajouter des contrôles de faisabilité et d'optimalité aux résultats fournis par le *package synth* puisque ce dernier peut échouer à trouver des poids optimaux s'il existe des solutions en coin à l'optimisation (Becker et Klößner, 2018). L'application de ce *package* a permis de confirmer l'optimalité des résultats obtenus dans R (voir Annexe G). Le lecteur intéressé peut consulter les résultats produits par le logiciel Matlab à l'Annexe H.

⁵⁶ Le code source sur le logiciel R utilisé dans cette recherche est disponible ici : <https://cran.r-project.org/web/packages/Synth/Synth.pdf>

Le code source sur le logiciel Matlab utilisé dans cette recherche est disponible ici : <https://www.mit.edu/~jhainm/synthpage.html>. Ce code a été utilisé dans l'article de Abadie, Diamond, and Hainmueller (2010) et a été offert en libre accès par ce dernier.

5.2 Présentation des résultats

Différentes spécifications ont été testées lors de l'estimation par un contrôle synthétique de l'effet du traitement sur la trajectoire de la variable dépendante. La période de pré-traitement utilisée dans l'optimisation s'étend de 2005 à 2010. La période de post-traitement observée s'étend de 2011 à 2017. Le modèle a d'abord été programmé avec les données en niveau, toutefois, les émissions de GES observées de la ville de Vancouver étant bien plus faibles que celles des autres villes du groupe de contrôle, une moyenne pondérée de ces dernières ne permettait pas une bonne estimation de l'effet d'intérêt. Ainsi, d'autres spécifications ont par exemple été réalisées avec des données indexées sur l'année de base 2005, ou bien rapportées en capital par tête et en variation en pourcentage des émissions de GES. Au total, 8 spécifications ont été testées. Le lecteur intéressé peut consulter le résultat de ces spécifications à l'Annexe I.

Puisqu'une trop grande différence entre les magnitudes des variables en niveau n'a pas permis de construire un contrôle synthétique valide, les données ont été calculées en variation annuelle, comme recommandé par Abadie (2021). C'est la spécification qui a été retenue. Bien que les données en variation annuelle amputent une année de pré-traitement dans le modèle, cette spécification a permis de corriger les biais des estimateurs du contrôle synthétique et d'améliorer la MSPE du modèle.

La pondération des villes du groupe de contrôle pour déterminer leur importance relative dans la trajectoire synthétique des émissions de GES de la ville traitée est présentée au Tableau 5.1. Ces pondérations correspondent aux constats des analyses des statistiques descriptives des données. Les villes ayant le plus de poids dans le modèle sont les villes de Toronto et d'Ottawa, suivies des villes d'Edmonton et de Calgary. La dispersion des poids dans le groupe de contrôle et le fait que les villes de Montréal et d'Hamilton ne contribuent pas à la trajectoire du Vancouver synthétique reflètent les caractéristiques géométriques de la solution au problème d'optimisation résolu par un contrôle synthétique (Abadie et Vives-i-Bastida, 2022). Autrement dit, il est fréquent que des poids nuls soient attribués par l'optimisation du contrôle synthétique à certaines unités d'un groupe de contrôle. Cela s'explique par les similarités entre les caractéristiques des données de la ville traitée et celles des villes du groupe de contrôle qui composent la matrice des variables explicatives (voir la section 4.3 du mémoire).

Tableau 5.1 : Répartition des poids du contrôle synthétique dans le groupe de contrôle

Pondération du contrôle synthétique					
<i>Toronto</i>	<i>Montréal</i>	<i>Calgary</i>	<i>Ottawa</i>	<i>Edmonton</i>	<i>Hamilton</i>
0,239	0,000	0,039	0,561	0,162	0,000

Les résultats obtenus par la spécification utilisant des données en variation annuelle sont exposés à la Figure 5.1. L’ajustement des données empiriques par le Vancouver synthétique n’a pas permis de reconstituer parfaitement les données empiriques pour les années 2007 et 2008. Cela peut s’expliquer par le fait qu’au cours de cette période, la phase de construction de l’infrastructure et les préparatifs des Jeux olympiques d’hiver de Vancouver étaient à leur apogée comme l’a souligné le chef de la direction du comité organisateur des jeux.⁵⁷ Par ailleurs, l’impact économique et touristique des Jeux olympiques d’hiver a été ombragé par la crise financière, de sorte que l’attractivité de Vancouver a atteint des records durant l’année 2007⁵⁸.

Ainsi, on constate que l’ajustement du modèle sur la période de pré-traitement est plus ou moins bon malgré les points aberrants mentionnés, mais on estime que ces variations ne se répercutent pas dans le temps étant donné le caractère singulier de l’évènement. Le point majeur que l’on peut noter est que l’effet de la mise en service de la Canada Line est positif sur les émissions de GES de la ville, si bien qu’en l’absence de cette infrastructure (comme c’est le cas dans le Vancouver synthétique) les émissions de GES de Vancouver auraient été plus faibles. La même tendance est constatée dans la plupart des spécifications testées. On constate aussi que l’effet de la mise en service de la Canada Line augmente avec le temps.

⁵⁷ <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/340665/vancouver-horloge>

⁵⁸ <https://www.lapresse.ca/affaires/economie/canada/201402/07/01-4736749-les-quatre-lecons-economiques-des-jeux-de-vancouver.php>

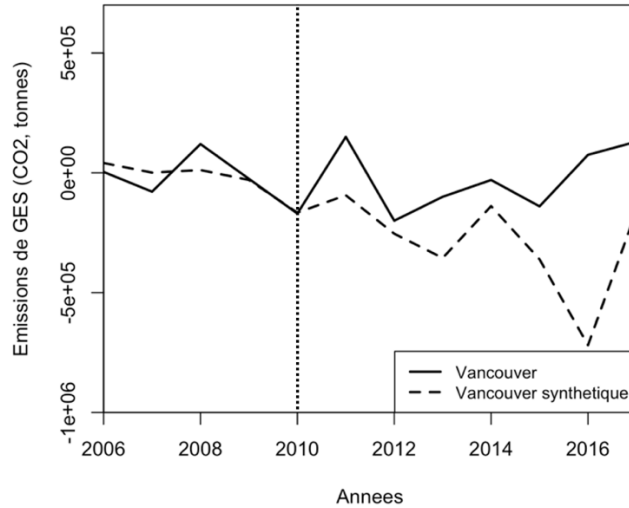


Figure 5.1 : Résultat du contrôle synthétique sur le logiciel R

L'amplitude de l'écart entre les émissions de GES du Vancouver synthétique et du Vancouver empirique est illustrée à la Figure 5.2. En 2011, la mise en service de la Canada Line à Vancouver a engendré une augmentation des émissions de GES de la ville de 243 603 tonnes de CO₂ après sa mise en service, soit près de 8,6 % des émissions de GES de la ville en 2011. Cet impact perdure dans le temps et atteint en 2017 288 310 tonnes de CO₂. En moyenne, la ville de Vancouver aurait économisé près de 281 000 tonnes de CO₂ en l'absence de la Canada Line. Toutefois, ce chiffre peut être surestimé à cause de facteurs ponctuels non observés que les variables explicatives n'auraient pas permis de contrôler. Pour confirmer la significativité statistique de ces résultats, des tests d'inférence ont été réalisés.

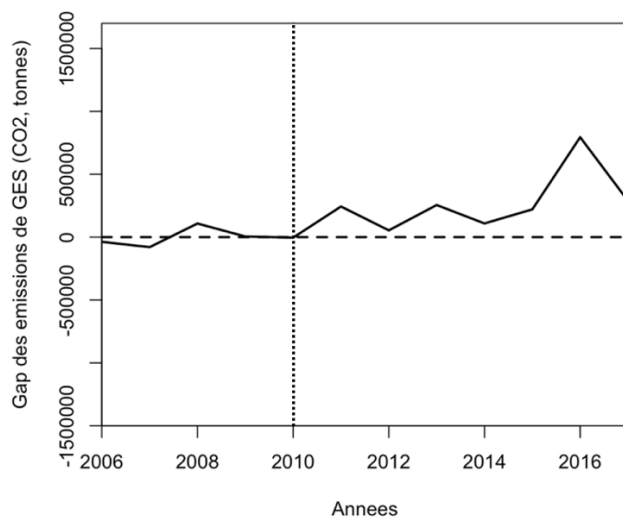


Figure 5.2 : Écart entre le Vancouver synthétique et le Vancouver empirique

5.3 Inférence

Les tests de vérification du contrôle synthétique utilisent des techniques inférentielles consistant à réassigner la méthode du contrôle synthétique à la fois dans le temps et dans l'espace, aux autres villes du groupe de contrôle (Abadie *et al.*, 2010). Ces tests sont ainsi des méthodes de permutation qui produisent des effets placebo en appliquant de manière itérative la méthode de contrôle synthétique et en réaffectant au hasard l'intervention dans les unités de contrôle où le traitement n'a pas eu lieu pour produire des effets placebo. L'ensemble de ces effets placebo est ensuite comparé à l'effet estimé par le contrôle synthétique pour l'unité traitée et l'année à laquelle le traitement a eu lieu. Cette comparaison permet de vérifier la validité de la rareté de l'ampleur de l'effet de la mise en service de la Canada Line qui a été observé à Vancouver. Pour valider ces tests codés manuellement, le *package* *SCtools* a été utilisé et a permis de confirmer les résultats obtenus.

Les effets placebo temporels qui ont été produits sont illustrés à la Figure 5.3. Si l'effet d'intérêt pour la ville traitée est significatif, alors on s'attend à ce que l'amplitude soit liée à la distribution de la réassignation du contrôle synthétique aux villes du groupe de contrôle (Abadie, 2021). Il est à noter que les effets placebo de toutes les villes du groupe de contrôle apparaissent dans le graphique en raison de la petite taille du groupe de contrôle du modèle, cependant, certains auteurs excluent les villes pour lesquelles la MSPE est cinq fois supérieure à celle de la ville traitée (Abadie *et al.*, 2010). C'est le cas de deux des villes du groupe de contrôle, pour lesquelles les effets placebo présentés à la Figure 5.3 sont les plus volatiles. En l'absence de ces villes, on remarque que l'amplitude de l'effet estimé pour la ville traitée (ligne noire) est la plus élevée à partir de l'année 2014. Cependant, on constate que les effets placebo temporels dans l'ensemble des villes du groupe de contrôle ne permettent pas de confirmer la validité de l'effet mesuré pour la variable dépendante sur la période de pré-traitement. Cela peut s'expliquer par trois raisons.

Premièrement, les variables explicatives du modèle ne permettraient pas de contrôler certains facteurs non observés, ce qui pourrait biaiser les estimateurs du contrôle synthétique. Deuxièmement, le nombre de villes du groupe de contrôle pourrait ne pas être assez suffisant pour que la pondération du modèle soit assez diffuse et permette au contrôle synthétique de reproduire correctement la trajectoire de la variable dépendante. Troisièmement, le nombre de périodes pré-traitement n'est pas assez important pour permettre un ajustement plus précis à la trajectoire de la variable dépendante. C'est l'hypothèse la plus probable puisque le biais de l'estimateur du contrôle synthétique dépend d'une fonction inversement

proportionnelle au nombre de périodes précédant l'intervention (Abadie *et al.*, 2010). Ces trois raisons sont toutes dépendantes de la disponibilité des données. Toutefois, les résultats des effets placebo spatiaux sont moins ambigus.

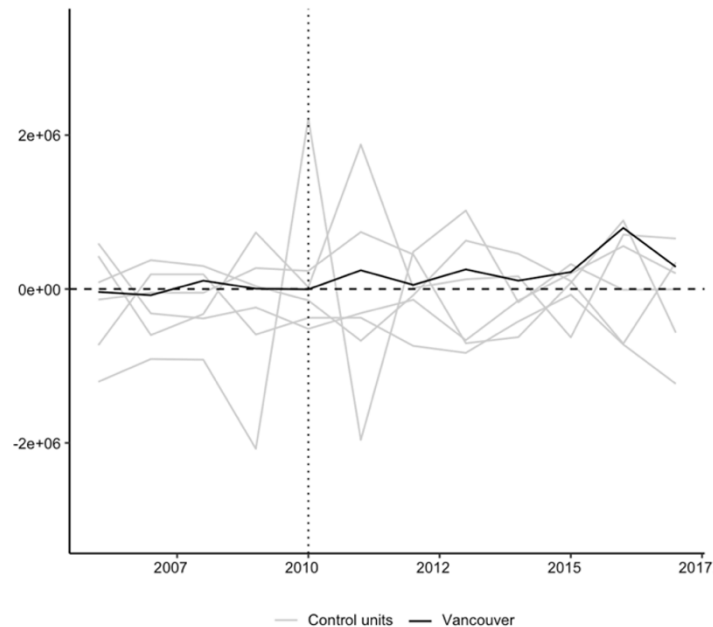


Figure 5.3 : Effets placebo temporels pour chaque ville du groupe de contrôle

La réassignation du traitement aux autres villes du groupe de contrôle peut produire des effets placebo difficiles à interpréter puisque chacune des trajectoires des variables dépendantes des villes s'adapte de façon différente au traitement (Abadie *et al.*, 2010). Pour ce faire, une statistique de test permet d'avoir une meilleure interprétation des résultats de cette technique d'inférence. Cette statistique consiste à mesurer le ratio de l'ajustement entre les périodes post-traitement et pré-traitement. Il s'agit du ratio de la MSPE de l'estimateur du contrôle synthétique pour la période post-traitement par rapport à la période pré-traitement (Abadie, 2021). Autrement dit, il s'agit d'évaluer statistiquement la distribution de la réassignation de l'effet d'intérêt aux autres villes du groupe de contrôle. Ce ratio permet d'évaluer la qualité de l'ajustement du Vancouver synthétique au Vancouver empirique avant et après la mise en service de la Canada Line en produisant des effets placebo spatiaux pour chacune des villes du groupe de contrôle.

La rareté de l'effet du traitement estimé par le contrôle synthétique est illustrée à la Figure 5.4. On constate que cet effet a une plus grande probabilité de survenir à Vancouver plutôt que dans les autres

villes du groupe de contrôle, de sorte que l'effet estimé n'est pas le simple résultat d'un ajustement hasardeux à la variable dépendante du modèle. La probabilité que la statistique de ce test d'inférence produise des valeurs aussi extrêmes pour les autres villes du groupe de contrôle a été calculée. Avec une marge d'erreur de 10 %, l'hypothèse nulle selon laquelle l'effet estimé pour la ville traitée est fréquent pour les autres villes du groupe de contrôle peut être rejetée de sorte que l'effet estimé est statistiquement significatif. Cette marge d'erreur étant relativement élevée, les raisons évoquées pour expliquer l'ambiguïté des effets placebo temporels peuvent de nouveau être mentionnées.

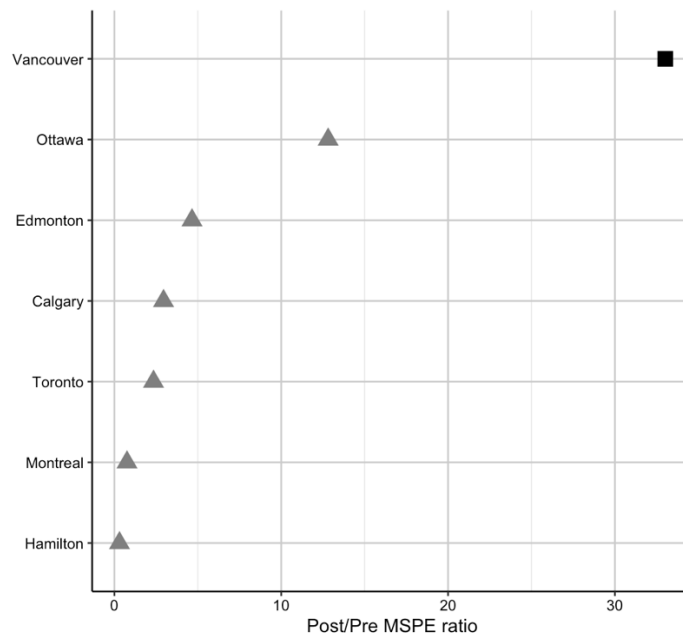


Figure 5.4 : Effets placebo spatiaux pour chaque ville du groupe de contrôle

CHAPITRE 6

DISCUSSION

Ce chapitre a pour objectif de discuter des résultats obtenus par le modèle. Une interprétation des résultats est tout d'abord proposée, puis des recommandations pour les politiques publiques de verdissement de la mobilité sont ensuite suggérées. Les limites de la présente étude sont ensuite soulignées et les implications pour les futures recherches sont enfin exposées.

6.1 Interprétation des résultats

Les résultats de l'application du contrôle synthétique sur les émissions de GES de Vancouver pour évaluer l'impact de la mise en service d'une infrastructure de transport en commun comme la Canada Line montrent que cette dernière aurait contribué à l'augmentation des émissions de GES de la ville. Cet effet aurait persisté dans le temps et aurait entraîné une augmentation moyenne des émissions de la ville de Vancouver de 280 000 tonnes de GES en équivalent CO₂ par année entre 2011 et 2017⁵⁹. Cela correspond à environ 11 % des émissions moyennes totales de GES de la ville de Vancouver sur cette même période⁶⁰. Ces résultats contredisent ceux des précédentes études ayant été réalisées sur le sujet (Poudenx et Merida, 2007; Louie, 2008; Boutron *et al.*, 2020; Bleviss, 2020; Gamiz *et al.*, 2021; Van Sang, 2015; Translink, 2022). Cependant, d'autres articles de la littérature permettent d'interpréter ces résultats aux premiers abords contre-intuitifs (Devlin, 2010; Liu, 2017; Holz-Rau et Scheiner, 2019).

Malgré une marge d'erreur conséquente qui laisse supposer qu'une partie de la variabilité de l'effet estimé est attribuable à des facteurs non observés, la tendance de cet effet montre que l'impact cumulé des effets directs et indirects de la mise en service de la Canada demeure positif dans le temps. Ce constat peut tout d'abord s'expliquer par une élasticité de la demande en véhicule individuel plus importante que l'élasticité de la demande en transport en commun pour les individus utilisant un véhicule individuel avant la mise en service de l'infrastructure en raison des coûts irrécupérables déjà engagés par les individus et d'une aversion au changement de leur habitude de transport (Litman, 2023; Liu *et al.*, 2017). L'arrivée des

⁵⁹ On peut se demander si le modèle permet d'obtenir les mêmes résultats avec d'autres variables dépendantes. Ce sont des spécifications qui ont été testées sans toutefois mener à des résultats concluants, car les villes du groupe de contrôle n'arrivaient pas à reproduire correctement la trajectoire du Vancouver empirique (voir Annexe I).

⁶⁰ On peut s'attendre à ce que la trajectoire de la variation annuelle des émissions de GES du Vancouver synthétique suive la trajectoire réelle des émissions de la ville, car ayant des émissions en niveau déjà très basses, on peut supposer que Vancouver dispose de moins de possibilités que les autres villes pour les diminuer davantage.

nouveaux modes de transport tels que les systèmes d'autopartage auraient aussi pu contribuer à modifier le coût d'opportunité des individus qui privilégient le meilleur rapport entre le temps et l'effort dépensé ainsi que les GES émis dans une plus grande proportion à Vancouver que dans les villes contrôles (Gamiz *et al.*, 2021). Une autre explication au résultat de l'effet estimé par le contrôle synthétique est l'étalement urbain.

La forte croissance de la population dans les villes canadiennes a entraîné une forte attraction et densification des centres-villes. Cette demande croissante de logements a incité les individus à s'installer dans des zones périphériques, voir dans des municipalités voisines, encourageant l'étalement urbain et intensifiant le nombre de déplacements quotidiens vers les centres-villes au détriment des émissions de GES des villes (Holz-Rau et Scheiner, 2019). Par ailleurs, les individus quittant les centres-villes pour s'installer en périphérie ont tendance à continuer d'y travailler, contribuant ainsi à une augmentation des distances parcourues par les individus (Liu *et al.*, 2017; Scheiner, 2012). Or, si le développement de l'offre en transport en commun dans les villes permet de répondre à ces besoins, une extension des infrastructures de transport en commun, comme cela est le cas pour la Canada Line, offre une meilleure accessibilité à de nouveaux espaces en conservant le même temps de trajet à un coût similaire, ce qui incite les individus à résider toujours plus loin des centres-villes et renforce leur dépendance aux véhicules individuels (Mattioli, 2014; Wegener, 2021; Holz-Rau et Scheiner, 2019). L'augmentation du nombre de véhicules dans les stationnements situés en bout de l'axe principal de la Canada Line après sa mise en service est un exemple de ce phénomène (Van Sang, 2015). De surcroît, cet étalement urbain a été amplifié par l'embourgeoisement engendré par le redéveloppement urbain des quartiers situés autour des stations de la Canada Line (Jones et Ley, 2016; Devries, 2016; Ngo, 2012), qui peut être une explication aux résultats de l'effet estimé par le contrôle synthétique.

Plusieurs articles ont analysé le phénomène d'embourgeoisement causé par le développement des transports en commun et les modifications qu'ils entraînent dans le tissu urbain, engendrant de multiples impacts sociaux, économiques et environnementaux (Jones, 2015; Rayle, 2014; Quastel, 2013; Billings, 2011; Chatman, 2012; Atkinson-Palombo, 2010). Cela a notamment été le cas à Vancouver⁶¹, autour des stations des différentes lignes du *SkyTrain* comme dans d'autres villes, par exemple en Californie. La densification et le développement de quartiers complets et compacts autour des stations de l'infrastructure de transport en commun ont permis d'encourager des changements d'habitudes de

⁶¹ <https://www.journaldemontreal.com/2023/05/30/vancouver-quand-le-train-devient-pour-les-millionnaires>

transport des individus (Alves, 2017) et de générer des déplacements moins complexes qui produisent moins d'émission de GES par rapport à des déplacements s'effectuant dans des zones moins denses (Krizek, 2003; Devlin, 2010). Ce redéveloppement urbain autour des transports en commun s'accompagne aussi d'une hausse des émissions de GES liée à la démolition, à la reconstruction et à la rénovation des bâtiments, bien que des études aient démontré que le rendement sur le long terme de ces investissements permet une meilleure efficacité énergétique et une réduction des émissions de GES. Toutefois, ce redéveloppement urbain autour des stations de l'infrastructure de transport en commun, encouragé par des contrats entre les municipalités et les promoteurs, a également généré un processus d'embourgeoisement des quartiers, contribuant à l'étalement urbain en repoussant les individus aux revenus modestes en périphérie des villes (DeVries, 2016; Jones et Ley, 2016; Jones, 2015) et en alimentant le cercle vicieux de l'étalement urbain et de la dépendance à la voiture (Holz-Rau et Scheiner, 2019). Par ailleurs, des individus aux revenus plus élevés contribueraient à une augmentation du niveau des émissions de GES associées à leurs déplacements et à leur mode de vie tandis qu'une hausse de la densité en périphérie des centres-villes pourrait avoir un impact limité sur les émissions de GES liées aux déplacements (Barla, 2011). En outre, l'embourgeoisement, causé par l'introduction d'une infrastructure de transport en commun (Grube-Cavers et Patterson, 2018; Au, 2007; DeVries, 2016), contribuerait aussi à modifier la composition des quartiers, amenant plus de services publics et marchands ainsi que de nouveaux investissements industriels et immobiliers générant davantage d'émission de GES (Rice, 2020). Ce processus d'embourgeoisement a notamment été observé avec la construction de l'espace Montmorency au bout de la ligne orange du métro de Montréal ou encore avec la construction de l'espace Solar Uniquartier au bout du nouveau REM⁶². Ces quartiers offrant une qualité de vie supérieure et une accessibilité au centre-ville grâce aux infrastructures de transport les desservant, contribuent à faire augmenter les prix des propriétés avoisinantes, en particulier avec la pénurie de logements et la hausse de la demande des individus à travailler en centre-ville. Le bénéfice de la densification autour des stations de transport en commun permet aux quartiers d'accueillir un plus grand nombre d'individus et ainsi plus de richesse, augmentant l'assiette fiscale et les revenus d'impôts, ce qui est avantageux au niveau politique pour élargir l'électorat, mais aussi au niveau économique pour générer davantage de création de valeur et rehausser le rayonnement d'une ville, au détriment des économies de GES. Ainsi, de multiples changements sociaux, économiques et environnementaux sont introduits dans l'environnement urbain et

⁶² <https://www.journaldemontreal.com/2022/06/28/voici-le-prix-median-des-maisons-pres-des-futures-stations-du-rem>; <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1030633/leffet-rem-se-fait-sentir-a-deux-montagnes>

ses caractéristiques socio-économiques après l'arrivée d'une méga-infrastructure de transport en commun comme la Canada Line ou le REM.

Enfin, la modification des habitudes de travail depuis le début des années 2000, notamment avec les nouvelles technologies, contribuerait aussi à une hausse des émissions de GES des transports en favorisant des déplacements physiques sur de plus longues distances, autant pour des raisons professionnelles que privées (Holz-Rau et Scheiner, 2019). Les nouveaux modes de vie favorisant des lieux de vie délocalisés (comme la garde partagée des enfants ou encore les couples vivant à distance) développeraient ainsi une complémentarité dans les déplacements virtuels et physiques (Lee, 2017). L'impact de la COVID-19 sur les émissions de GES est cependant encore ambigu (Bleviss, 2020). D'après les derniers chiffres de fréquentation du *SkyTrain* de Vancouver publiés par Translink pour l'année 2022, le nombre de passagers de l'infrastructure aurait considérablement diminué pour atteindre son niveau de 2009.

6.2 Recommandations pour les politiques publiques

L'interprétation des résultats de cette étude implique quelques recommandations pour les politiques publiques de verdissement de la mobilité. Pour qu'un investissement dans un moyen de transport durable puisse répondre efficacement à son objectif de réduction d'émission de GES sur le long terme, plusieurs variables doivent donc être prises en compte, notamment les interactions entre le transport, le patrimoine urbain et les caractéristiques socio-économiques d'un environnement bâti (Profillidis *et al.*, 2014). Pour ce faire, certaines solutions se sont déjà avérées efficaces.

La mise en place de tarification pour modifier le coût d'opportunité des agents les incitant à changer de moyen de transport est un exemple d'incitatif efficace (comme la taxe carbone, la limitation des places de stationnement et la hausse du prix de ces dernières ou bien la tarification en fonction de la distance parcourue) (Petrunoff, 2015; Parkopedia, 2020). Certaines villes, à l'instar de Londres, ont par exemple mis en place des frais aux automobilistes pour limiter l'affluence des véhicules vers des zones congestionnées en heures de pointe. Cependant, une étude sur les effets des élasticités croisées des prix sur la consommation des transports des ménages espagnols semble nuancer l'efficacité d'une taxe encourageant l'usage des transports publics, révélant une baisse de leur consommation et une hausse des émissions de CO₂ des ménages (Romero-Jordan *et al.*, 2017). Améliorer l'efficacité et la qualité d'un transport durable est aussi nécessaire pour favoriser son utilisation de même que son entretien et son maintien. Cependant, la complémentarité et la fluidité des transports (tant physique que tarifaire) ainsi que la mise en place de

politiques favorisant leurs avantages (rapidité, faible coût, propreté, sécurité, etc.) sont des éléments majeurs pour qu'un moyen de transport durable le soit effectivement et sur le long terme (Bleviss, 2020).

La gestion de l'enjeu de l'étalement urbain, amplifié par l'embourgeoisement découlant du redéveloppement immobilier des quartiers autour des stations d'une infrastructure de transport en commun est primordiale pour que cette dernière puisse diminuer de façon efficiente les émissions de GES d'une ville sur le long terme, sans décaler le problème dans l'espace et le temps. Pour qu'un cercle vertueux s'établisse entre la mise en service d'une infrastructure de transport en commun, l'environnement bâti, l'équilibre socio-économique des villes et la réduction des émissions de GES en résultant, la littérature sur le sujet souligne l'importance de l'abordabilité du logement (Andong et Sajor, 2017). Afin d'éviter l'embourgeoisement et les processus complexes qu'elle entraîne, les décideurs devraient être vigilants à favoriser le maintien de loyers abordables dans les logements faisant partie des projets de redéveloppement urbain autour des stations d'une infrastructure de transport en commun. Il importe d'éviter que les locataires aux revenus faibles et moyens, qui sont plus susceptibles de faire usage des transports en commun, soient déplacés vers des zones toujours plus excentrées du centre-ville et de sa périphérie (Melchor et Lembcke, 2020; Kloepper, 2017). L'élaboration de politiques garantissant aux locataires existants ayant des faibles revenus l'accès à des logements avec des prix et une localisation similaires devrait accompagner tout projet de redéveloppement urbain autour des stations d'une infrastructure de transport en commun (Grube-Cavers et Patterson, 2018; Bleviss, 2020).

La coordination entre les interventions effectuées par les différents paliers gouvernementaux (municipaux, provinciaux et fédéraux) ainsi que la consultation des diverses parties prenantes concernées sont aussi des éléments importants à considérer lors de l'élaboration d'un plan de redéveloppement urbain pour accueillir une nouvelle infrastructure de transport en commun afin d'atteindre des réductions significatives des émissions de GES grâce à ce nouveau mode de transport (Creutzig, 2015). Or, dès la phase de conception de la Canada Line, des problèmes de gouvernance multiniveau ont perturbé le projet à cause des divergences d'intérêts et des problèmes de gestion de risque (voir section 3.4 du mémoire)⁶³. Une bonne interaction et communication entre les politiques mises en place par les différents paliers gouvernementaux est ainsi primordiale pour s'assurer que la résolution d'un problème visée par une

⁶³ Le lecteur intéressé est invité à consulter à l'Annexe J qui illustre l'ensemble des enjeux à la mise en service d'une infrastructure de transport en commun.

politique n'induit pas d'autres répercussions négatives sur les intérêts des parties prenantes externes de la politique (Förg, 2020; Newman et Perl, 2014).

Le choix du type d'infrastructure de transport en commun est aussi déterminant dans l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de GES d'une ville ainsi que dans la gestion des retombées sociales, économiques et environnementales sur l'environnement urbain, en incluant les individus et le territoire naturel le composant. Certains articles préconisent davantage la technologie du tramway, qui serait plus efficient en termes de coûts économiques et environnementaux sur le long terme et qui inciterait les individus à effectuer des trajets plus courts (Condon et Dow, 2011).

6.3 Limites de l'étude

La significativité statistique des résultats est plus ou moins satisfaisante avec une marge d'erreur élevée de 10 %. Il en résulte qu'il est probable qu'une part des facteurs non observés par les variables explicatives ne soient pas uniquement attribuables aux effets directs et indirects de la mise en service de la Canada Line, bien que l'effet estimé total sur les émissions de GES de la ville demeure positif dans le temps. Cela peut s'expliquer par un nombre limité de villes composant le groupe de contrôle, ce qui a pour résultat de contraindre la pondération du modèle à être moins dispersée en ne reposant que sur les caractéristiques des quelques villes du groupe de contrôle. Toutefois, un risque de surajustement est plus important lorsque la taille du groupe de contrôle augmente alors que la période de pré-traitement est courte (Abadie et Vives-i-Bastida, 2022). La courte période de pré-traitement est une limite importante dans cette étude alors qu'elle joue un rôle important dans la qualité de l'ajustement du modèle puisque l'estimateur du contrôle synthétique est une fonction inversement proportionnelle au nombre de périodes disponibles avant le traitement (Abadie *et al.*, 2010). En ce sens, une plus grande période pré-traitement dans le contrôle synthétique permet d'atténuer les biais induits par les facteurs non observés par les variables explicatives. Cela explique les résultats ambigus des effets placebo temporels obtenus. Ce problème peut, cependant, être atténué par des variables explicatives permettant de contrôler une grande partie de la volatilité de la trajectoire de la variable dépendante et ainsi réduire le risque de surajustement. Les variables explicatives sont aussi importantes pour déterminer la pondération des villes du groupe de contrôle. Or, il ne faut pas exclure que les co-mouvements des variables explicatives du modèle ne permettent pas de contrôler certains phénomènes non observés dans les co-mouvements de la variable dépendante et ayant une persistance temporelle, ce qui peut augmenter le risque de biais du modèle (Abadie, 2021). L'impact des préparatifs des Jeux olympiques d'hiver ainsi que de la construction de la

Canada Line sur la trajectoire des émissions de GES de la ville peuvent aussi expliquer les problèmes d'ajustement rencontrés dans la période de pré-traitement, en particulier pour les années 2007 et 2008, durant lesquelles les travaux de construction des infrastructures dédiés à l'accueil des Jeux olympiques d'hiver étaient à leur apogée. Pour résoudre ce problème, il est possible d'antidater le traitement sur la période de pré-traitement, l'estimateur du contrôle synthétique ne limitant pas la variation temporelle de l'effet du traitement, toutefois cette procédure n'était pas envisageable dans le modèle réalisé dans cette étude puisque la période pré-traitement était déjà très courte (Abadie, 2021). De surcroît, l'anticipation des agents économiques à l'annonce de la construction d'une infrastructure de transport en commun pourrait également avoir lancé, en amont de sa mise en service, des modifications de la trajectoire des émissions de GES par la construction de nouveaux projets immobiliers. Cet effet d'anticipation pourrait aussi introduire des biais dans l'estimateur du contrôle synthétique. Par ailleurs, le faible niveau d'émissions de GES de la ville de Vancouver par rapport aux autres villes du groupe de contrôle a nécessité d'avoir recours à une spécification avec des données en variation pour permettre au modèle de réaliser une moyenne pondérée permettant d'ajuster l'effet estimé à la variable dépendante empirique. Cette spécification peut toutefois augmenter les risques de biais de l'estimateur puisque la variation des données peut augmenter le bruit dans la variance du résultat estimé par le modèle (Abadie, 2021). Une autre limite de cette étude est la forte dépendance du contrôle synthétique au contexte de la recherche, qui limite la reproductibilité de l'étude en employant les mêmes données et en utilisant la même spécification. La limite de la couverture temporelle de la période post-traitement qui se termine en 2017 soit sept ans après la mise en service de la Canada Line, peut également être soulignée parmi les limites de l'étude puisque la durée de vie d'une telle infrastructure de transport en commun est très longue et que son impact sur les émissions de GES semble se prolonger dans le temps. Enfin, le manque de disponibilité des données est un frein avéré à cette étude, d'une part pour la variable dépendante, pour laquelle la plupart des villes n'ont commencé à collecter les données qu'à partir de 2005, et d'autre part pour les variables explicatives, dont l'enjeu était d'abord de faire correspondre la couverture temporelle de ces variables avec celle de la variable dépendante et ensuite d'avoir des données ayant une structure d'assemblage ou de collecte homogène pour chacune des villes du modèle afin de pouvoir les comparer.

6.4 Implications pour les futures recherches

Cette recherche pourrait être améliorée en appliquant des méthodes d'apprentissage automatique pour retirer l'impact des Jeux olympiques et de la construction de la Canada Line sur les émissions de GES observées de Vancouver, ce qui permettrait de réduire le biais de l'estimateur du contrôle synthétique

(Liu, 2023). D'autres recherches complémentaires pourraient aussi être pertinentes pour identifier les canaux qui régissent la composition des facteurs de l'effet estimé. En ce sens, il s'agirait d'identifier l'amplitude des effets directs et indirects de la mise en service d'une infrastructure de transport en commun qui composent l'effet total estimé par le contrôle synthétique. Des études avec plus de précision spatiale, c'est-à-dire avec un niveau d'agrégation plus fin, permettraient de mieux comprendre les processus découlant de la mise en service de la Canada Line et les changements qu'ils engendrent sur les dimensions sociales, économiques et environnementales affectant les émissions de GES de la ville de Vancouver. D'autres études pourraient répliquer l'évaluation de l'impact de la mise en service d'une infrastructure de transport en commun telle que la Canada Line en fonction d'autres contextes géographiques, politiques, énergétiques et socio-économiques. L'évaluation de la persistance temporelle de l'impact de la COVID-19 sur les émissions de GES des transports en commun d'une ville pourrait aussi s'avérer pertinente.

CONCLUSION

Ce mémoire de recherche avait pour objectif d'évaluer l'impact d'une infrastructure de transport en commun sur l'évolution dans le temps des émissions de GES d'une ville, en prenant pour cas la Canada Line du *SkyTrain* de Vancouver. À cette fin, un contrôle synthétique a été utilisé pour reconstituer la trajectoire des émissions de GES d'un Vancouver synthétique, dans laquelle la Canada Line n'a pas été mise en service, afin de comparer ces émissions de GES à celles observées dans la ville empirique de Vancouver. L'usage de cette méthodologie constitue l'une des principales contributions de cette recherche à la littérature existante sur le sujet puisque les études préalablement effectuées sur de tels problèmes n'estiment souvent que les émissions dues au transfert modal des passagers, soit les effets directs de la mise en service d'une infrastructure de transport en commun (Soni et Chandel, 2018; Van Sang, 2015; Poudenx et Merida, 2011; Litman, 2007). Ainsi, cette recherche avait pour ambition d'évaluer l'impact cumulé des effets directs et indirects d'une infrastructure de transport en commun et leur persistance temporelle sur les émissions de GES d'une ville, deux éléments qui ne sont pas traités par les méthodologies employées par les articles parus dans la littérature sur le sujet. Or, l'arrivée d'un nouveau mode de transport en commun dans un environnement urbain génère des changements dans cet environnement ainsi que dans ses caractéristiques socio-économiques, entraînant du même coup un changement dans le comportement de déplacements des individus et provoquant des effets indirects sur les émissions de GES du transport en commun qui persistent dans le temps (Liu *et al.*, 2017; Holz-Rau et Scheiner, 2019; Elkind, 2022).

Les données analysées dans cette étude ont été collectées sur les bases de données en libre accès de plusieurs villes canadiennes et de Statistique Canada. Il s'agit des émissions de GES en équivalent CO₂, du PIB, des revenus de la taxe sur l'essence et les carburants, des investissements en constructions résidentielles et non résidentielles, des habitudes de transport des habitants et du nombre d'habitants de chacune des villes du groupe contrôle établi. Ces données ont été collectées pour plusieurs villes canadiennes pour lesquelles les données sur les émissions de GES étaient disponibles et coïncidaient avec les variables explicatives sélectionnées malgré certains manques de données selon les années. Celles-ci ont été approximées par une interpolation linéaire telle que préconisée dans l'élaboration de la matrice des variables explicatives dans un contrôle synthétique (Engelbrektsen, 2021; Little et Rubin, 2019; Amjad, 2017). D'autres variables explicatives ont fait l'objet de tests d'inclusion dans la matrice des variables de contrôles, sans apporter de pertinence à la qualité de l'ajustement du modèle. Dans un effort d'inclure davantage de villes dans le groupe contrôle, des données ont été collectées pour quatre villes américaines,

dont les émissions de GES étaient disponibles depuis 2005, mais le manque d'homogénéité en termes d'unité de mesure des données constituant la matrice des variables explicatives pour ces villes n'a pas permis de les inclure aux villes canadiennes dans les différentes spécifications réalisées. En raison du faible niveau des émissions de GES de la ville de Vancouver par rapport à celles des autres villes du groupe de contrôle, la spécification retenue pour appliquer la méthode du contrôle synthétique est celle utilisant des données en variation annuelle (Abadie, 2021). Les résultats de l'effet estimé sont statistiquement significatifs avec une marge d'erreur de 10 % d'après les tests d'inférence appliqués et l'analyse des effets placebo spatiaux en découlant (Abadie *et al.*, 2010). Ils montrent que la mise en service de la Canada Line à Vancouver a engendré une augmentation des émissions de GES de la ville de 244 000 tonnes de CO₂ après sa mise en service, atteignant près de 8,6 % des émissions de GES de la ville en 2011. Cet effet aurait persisté dans le temps et aurait entraîné une augmentation moyenne des émissions de la ville de Vancouver de 280 000 tonnes de GES en équivalent CO₂ entre 2011 et 2017, ce qui correspond à environ 11 % des émissions moyennes totales de GES de la ville sur cette même période.

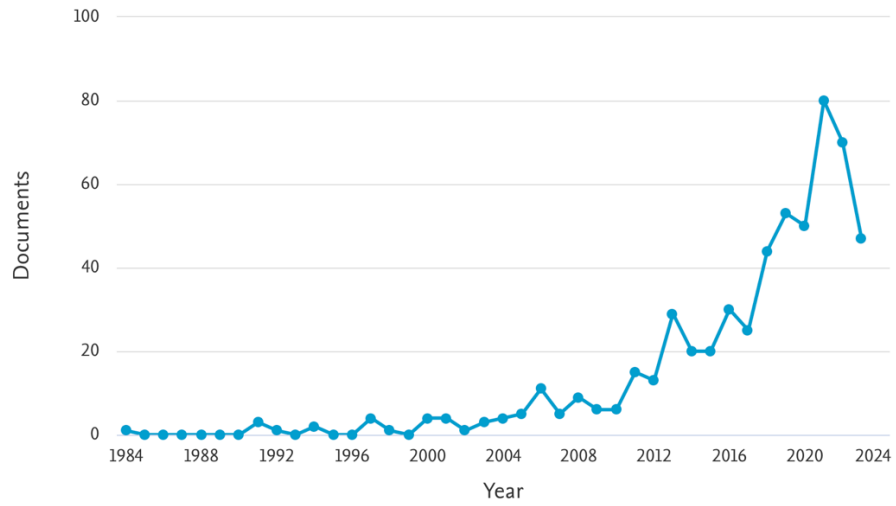
La disponibilité des données est une limite importante à cette recherche. Par ailleurs, le nombre de périodes pré-traitement n'est pas assez important pour permettre un ajustement plus précis à la trajectoire de la variable dépendante. Or, le biais de l'estimateur du contrôle synthétique dépend d'une fonction inversement proportionnelle au nombre de périodes précédant l'intervention (Abadie *et al.*, 2010). Le nombre de villes du groupe de contrôle pourrait aussi ne pas être assez suffisant pour que la pondération du modèle soit assez diffuse et permette au contrôle synthétique de reproduire correctement la trajectoire de la variable dépendante. En outre, les variables explicatives du modèle pourraient ne pas suffire à contrôler certains facteurs non observés, ce qui pourrait biaiser les estimateurs du contrôle synthétique. L'impact des préparatifs des Jeux olympiques d'hiver ainsi que celui de la construction de la Canada Line sur la trajectoire des émissions de GES de la ville sont des éléments pouvant aussi expliquer les problèmes d'ajustement rencontrés dans la période de pré-traitement, en particulier pour les années 2007 et 2008, durant lesquelles les travaux de construction des infrastructures dédiés à l'accueil des Jeux olympiques d'hiver étaient à leur apogée. De futures recherches pourraient appliquer des méthodes d'apprentissage automatique pour retirer l'impact des Jeux olympiques et de la construction de la Canada Line sur les émissions de GES observées de Vancouver, ce qui permettrait de réduire le biais de l'estimateur du contrôle synthétique (Liu, 2023). Des études avec davantage de précision spatiale permettraient de mieux comprendre les processus découlant de la mise en service de la Canada Line et les changements qu'ils engendrent sur les dimensions sociales, économiques et environnementales affectant les émissions de GES de la ville de Vancouver.

L'intuition derrière les résultats de cette recherche est que l'élasticité de la demande en véhicule individuel pourrait être plus importante que l'élasticité de la demande en transport en commun pour les individus utilisant un véhicule individuel avant la mise en service de l'infrastructure (Litman, 2023; Liu et Cirillo, 2016). Cette dépendance aux véhicules individuels serait amplifiée par l'étalement urbain qu'engendre une nouvelle infrastructure de transport en commun (Mattioli, 2014; Wegener, 2021; Holz-Rau et Scheiner, 2019) et par le redéveloppement urbain des quartiers aux alentours des stations de la ligne, favorisant des quartiers complets et compacts au détriment de leur embourgeoisement (Jones et Ley, 2016; Devries, 2016; Ngo, 2012; Quastel, 2013; Barla, 2011; Grube-Cavers et Patterson, 2018; Rice, 2020). Ainsi, pour qu'un investissement dans un moyen de transport durable puisse répondre efficacement à son objectif de réduction d'émission de GES sur le long terme, plusieurs variables devraient être prises en compte, notamment les interactions entre le transport, son environnement bâti et les caractéristiques socio-économiques de ce dernier (Profillidis *et al.*, 2014). Les politiques mises en place par les différents paliers gouvernementaux devraient privilégier une bonne interaction et communication entre elles. Les décisions d'investissement dans une infrastructure de transport en commun sont importantes puisqu'elles impactent de multiples variables interdépendantes sur le long terme et entraînent des changements irrémédiables dans l'environnement urbain et social des villes. Ces décisions nécessitent une vision écosystémique de l'environnement urbain se basant sur les principes de la pensée complexe. « La pensée complexe aide à affronter l'erreur, l'illusion, l'incertitude et le risque » (Morin, 1990).

ANNEXE A

ÉVOLUTION TEMPORELLE DES ARTICLES PUBLIÉS SUR LE SUJET

Documents by year



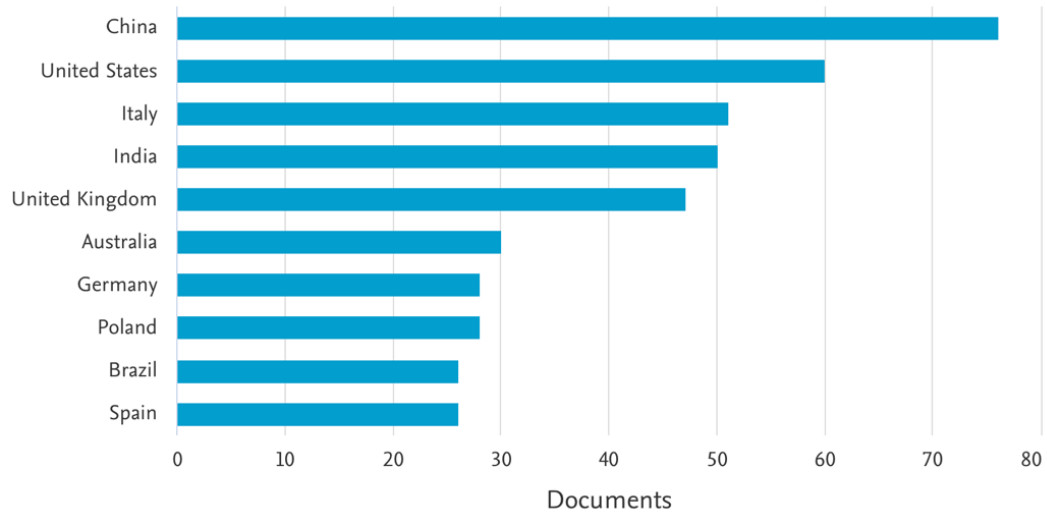
Source : Scopus

ANNEXE B

PUBLICATION DES ARTICLES SUR LE SUJET SELON LES PAYS

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

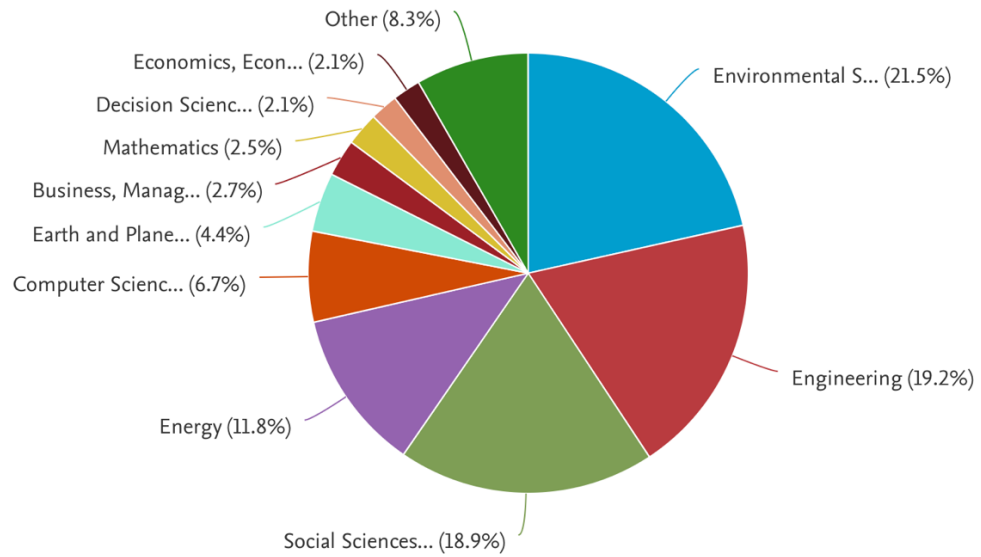


Source : Scopus

ANNEXE C

PUBLICATION DES ARTICLES SUR LE SUJET PAR DISCIPLINES

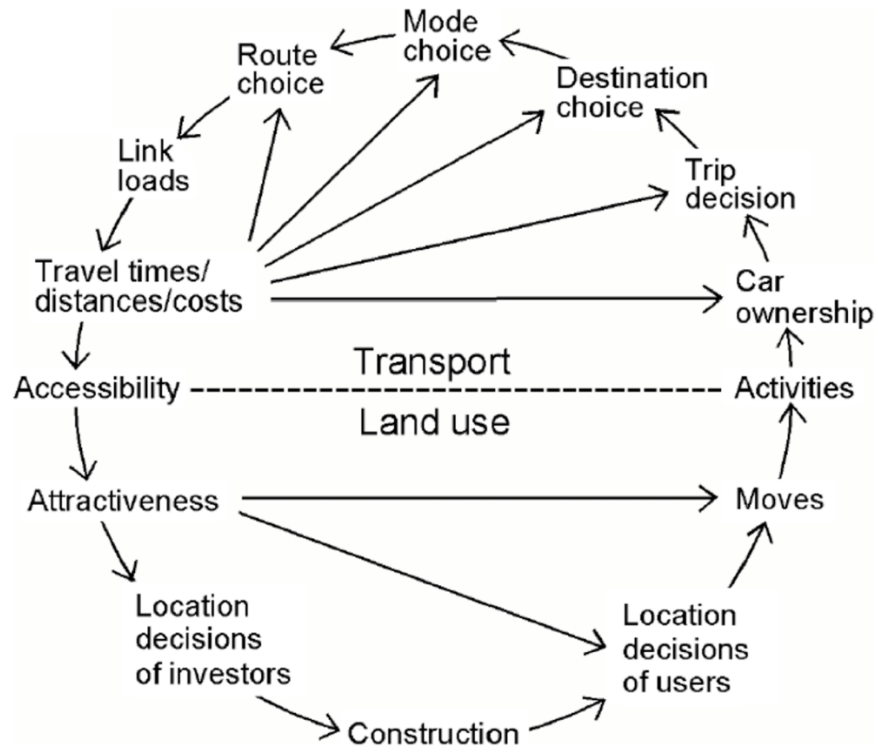
Documents by subject area



Source : Scopus

ANNEXE D

LE CYCLE DE RÉTROACTION DE L'INTERDÉPENDANCE ENTRE L'ENVIRONNEMENT BÂTI ET LES TRANSPORTS



Source : Holz-Rau et Scheiner, 2019, extrait de Wegener, 2004

ANNEXE E

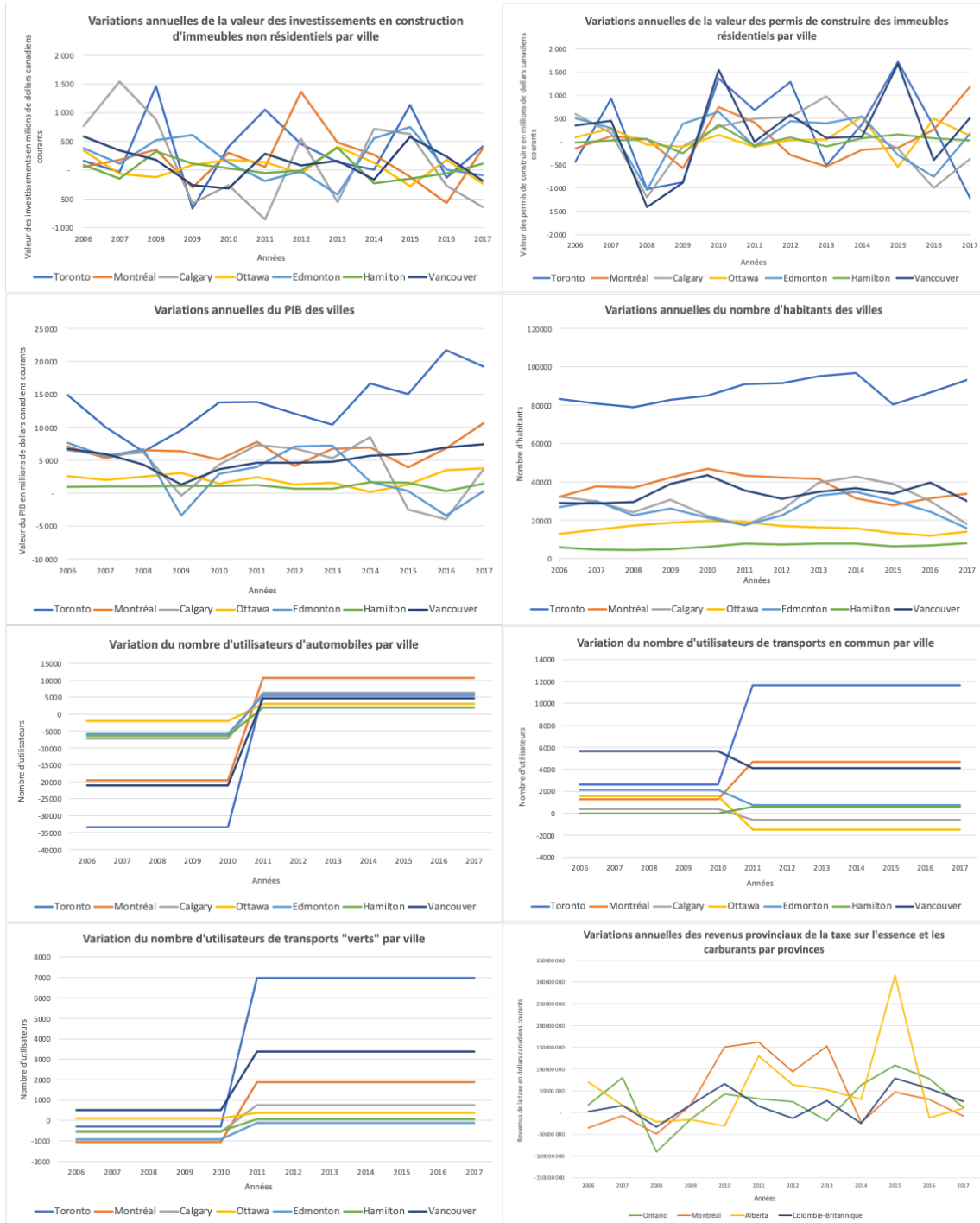
CARTE DU TRACÉ DE LA CANADA LINE



Source : Wikimedia Creative Commons

ANNEXE F

GRAPHIQUES DES DONNÉES EN VARIATION COMPOSANT LA MATRICE DES VARIABLES EXPLICATIVES



ANNEXE G

RÉSULTAT DE LA PROCÉDURE D'OPTIMISATION AVEC L'AJOUT DES CONTRÔLES DE FAISABILITÉ ET D'OPTIMALITÉ

Feasibility of $W^*(V)$

=====

GOOD: $W^*(V)$ is (essentially) optimal (new loss W: 0.220668761966205).

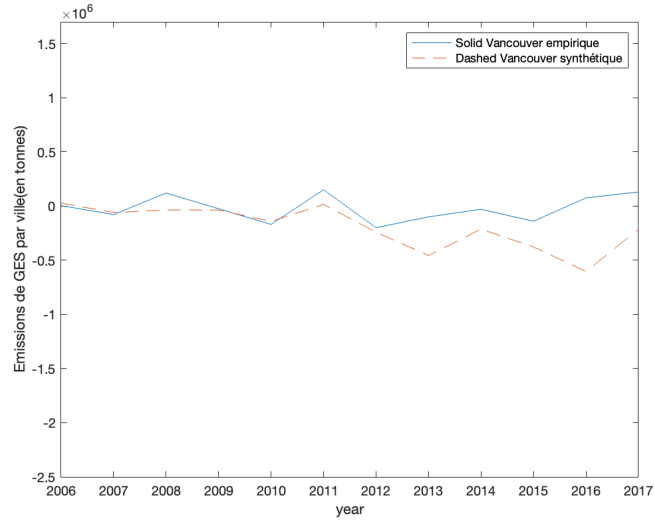
Optimality of V

=====

GOOD: V is (essentially) optimal (new loss V: 3904331792.53372).

ANNEXE H

RÉSULTATS DU CONTRÔLE SYNTHÉTIQUE SUR LE LOGICIEL MATLAB

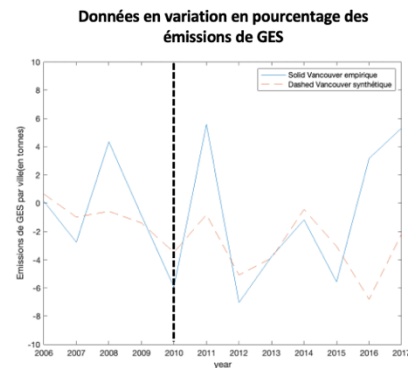
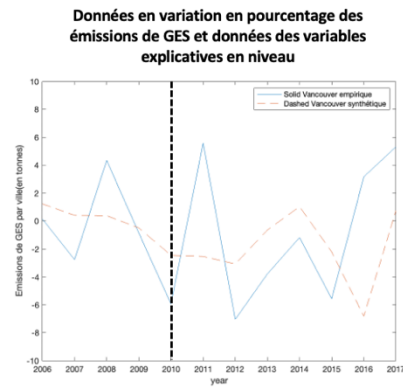
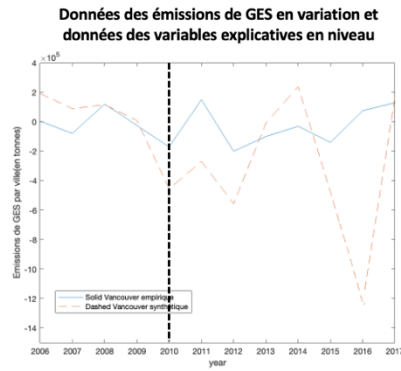
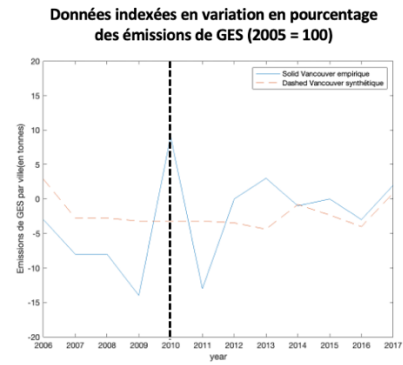
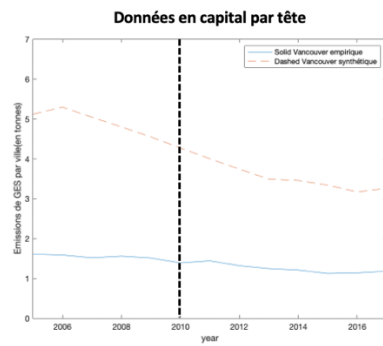
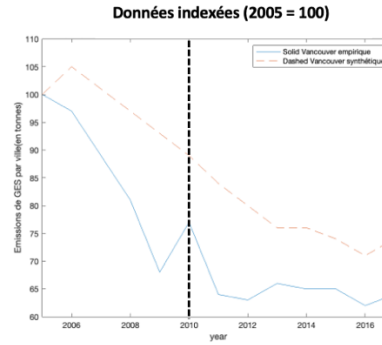
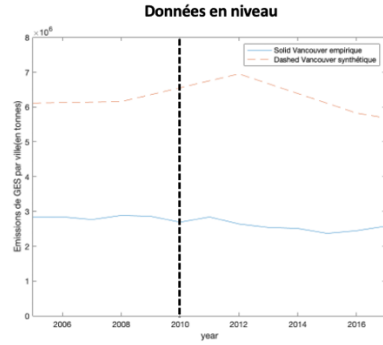


Pondération du contrôle synthétique

<i>Toronto</i>	<i>Montréal</i>	<i>Calgary</i>	<i>Ottawa</i>	<i>Edmonton</i>	<i>Hamilton</i>
0,268	0,000	0,085	0,648	0,000	0,000

ANNEXE I

SPÉCIFICATIONS DU CONTRÔLE SYNTHÉTIQUE AYANT ÉTÉ TESTÉES



ANNEXE J

MATRICE DES ENJEUX DE LA MISE EN SERVICE D'UNE INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT EN COMMUN

Challenge	Elements of system interventions		
	Land use: mix, density, integration	Overall network capacity – moving people and goods	Tailoring the solutions to the local needs
Congestion, network efficiency, air pollution	De-centralization. Development of well inter-connected local activity centres. Infill development , with nearby destinations and efficient PT.	Development of alternatives that increase the overall capacity and travel demand management , encouraging the use of the most efficient modes.	Provision of alternatives to driving with the right levels of service , attractive for users to choose. Main characteristics: travel times, PT frequencies, accessibility, legibility, continuity, affordability.
Transport system affordability	De-centralization and urban infill (see above); for the end user - lesser need to own or use a car; for the authorities - PT patronage and revenues increase, lesser traffic capacity investment, leverage of incremental developer fees.	Good understanding of the needs (geographic, or by user – surveys, interventions monitoring); prioritisation of space to address them the most efficiently – for instance bus lanes providing efficiency for direct routes, servicing specific origin-destination connections.	
Growth and sprawl	Infill development (see above); TODs (transit-oriented developments), with easy access to major PT connections.	Growth coordinated with multi modal systems , providing efficient solutions for different journeys / needs (efficiency for the user but also from the system perspective).	Good understanding of the needs of the new residents in terms of destinations or parameters of modal choice, and provision of transport solutions that are likely to be chosen.
Affordability – housing	Considering overall affordability of housing and transport – development of housing in areas where a car is not necessary and the transport costs can be reduced.	Efficient and attractive alternatives to car. PT, high quality walking environment and bicycle network, for short trips.	Suppression of parking minima , allowing for buildings with low or no parking provision; provision of attractive alternatives to driving (left)
Public health and road safety	Mix and density - local activity/service centres, allowing for short trips from home, together with an environment that encourages walking and cycling as everyday means of transport, or as access to PT.	Leveraging active modes and PT (use correlated with higher walking), achieving less sedentary lifestyles, less air pollution and less road trauma.	Walking and cycling networks actively encourage movement (attractive to wider demographics), linked with traffic management (lower stress, more comfort for walking and cycling). Targeted safety interventions – traffic speed and complexity reduction, prioritization taking into account pedestrian and bicycle volumes (context).

Source : Bozovic, 2018

BIBLIOGRAPHIE

- Abadie, A., & Gardeazabal, J. (2003). The economic costs of conflict: A case study of the Basque Country. *American economic review*, 93(1), 113-132.
- Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2010). Synthetic control methods for comparative case studies: Estimating the effect of California's tobacco control program. *Journal of the American statistical Association*, 105(490), 493-505.
- Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2015). Comparative politics and the synthetic control method. *American Journal of Political Science*, 59(2), 495-510.
- Abadie, A. (2021). Using synthetic controls: Feasibility, data requirements, and methodological aspects. *Journal of Economic Literature*, 59(2), 391-425.
- Abadie, A., & L'hour, J. (2021). A penalized synthetic control estimator for disaggregated data. *Journal of the American Statistical Association*, 116(536), 1817-1834.
- Abadie, A., & Vives-i-Bastida, J. (2022). Synthetic controls in action. *arXiv preprint arXiv:2203.06279*.
- Aguiléra, A., & Voisin, M. (2014). Urban form, commuting patterns and CO2 emissions: What differences between the municipality's residents and its jobs?. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 69, 243-251.
- Alves, C., Silva, A. J., Reis, L. G., Freitas, M., Rodrigues, L. B., & Alves, D. E. (2010). Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. *Journal of cleaner production*, 18(4), 313-327.
- Amjad, M., Shah, D., & Shen, D. (2018). Robust synthetic control. *The Journal of Machine Learning Research*, 19(1), 802-852.
- Andong, R. F., & Sajor, E. (2017). Urban sprawl, public transport, and increasing CO 2 emissions: The case of Metro Manila, Philippines. *Environment, development and sustainability*, 19, 99-123.
- Athey, S., & Imbens, G. W. (2017). The state of applied econometrics: Causality and policy evaluation. *Journal of Economic perspectives*, 31(2), 3-32.
- Atkinson-Palombo, C. (2010). Comparing the capitalisation benefits of light-rail transit and overlay zoning for single-family houses and condos by neighbourhood type in metropolitan Phoenix, Arizona. *Urban studies*, 47(11), 2409-2426.
- Au, Y. P. (2007). *Analysis of residential property value before and after the opening of the SkyTrain Millennium Line*. Simon Fraser University.
- Bailey, L., Mokhtarian, P. L., & Little, A. (2008). *The broader connection between public transportation, energy conservation and greenhouse gas reduction* (No. TCRP Project J-11/Task 3). Fairfax, VA: ICF International.

- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy*, 15(2), 73-80.
- Barla, P., Miranda-Moreno, L. F., & Lee-Gosselin, M. (2011). Urban travel CO2 emissions and land use: A case study for Quebec City. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(6), 423-428.
- Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214, 481-518.
- Bharadwaj, S., Ballare, S., & Chandel, M. K. (2017). Impact of congestion on greenhouse gas emissions for road transport in Mumbai metropolitan region. *Transportation research procedia*, 25, 3538-3551.
- Becker, M., & Klößner, S. (2018). Fast and reliable computation of generalized synthetic controls. *Econometrics and Statistics*, 5, 1-19.
- Bernick, M., & Cervero, R. (1997). *Transit villages in the 21st century*.
- Bleviss, D. L. (2020). Transportation is critical to reducing greenhouse gas emissions in the United States. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 10(2), e390.
- Billings, S. B. (2011). Estimating the value of a new transit option. *Regional Science and Urban Economics*, 41(6), 525-536.
- Boarnet, M. G. (2011). A broader context for land use and travel behavior, and a research agenda. *Journal of the American Planning Association*, 77(3), 197-213.
- Boisjoly, G., Grisé, E., Maguire, M., Veillette, M. P., Deboosere, R., Berrebi, E., & El-Geneidy, A. (2018). Invest in the ride: A 14 year longitudinal analysis of the determinants of public transport ridership in 25 North American cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 116, 434-445.
- Boutron, C., Chicoine-McKenzie, R., Tarvydas, M., Hinojosa, R. (2020). *UBC Transportation and Parking*. University of British Columbia.
- Bozovic, T. (2018). *Urban challenges-inspiration from American NW*. IPENZ Transportation Group conference, Queenstown, New-Zealand.
- British Columbia Construction Roundtable. (2023). *Canada Line Rapid Transit Project*. SNC Lavalin. <https://bccr.net/resources/Documents/CanadaLine-SNC.pdf>
- Buliung, R. N., & Kanaroglou, P. S. (2007). Activity–travel behaviour research: conceptual issues, state of the art, and emerging perspectives on behavioural analysis and simulation modelling. *Transport Reviews*, 27(2), 151-187.
- Cairncross, J., Hall, J. D., & Palsson, C. (2022). *VancUber: The Long-Run Effect of Ride-hailing on Public Transportation, Congestion, and Traffic Fatalities*. Working paper.
- Cao, X., Mokhtarian, P. L., & Handy, S. L. (2009). Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour: a focus on empirical findings. *Transport reviews*, 29(3), 359-395.

- CCMM. (2011). *Le transport en commun au cœur du développement économique de Montréal*. Chambre de commerce du Montréal métropolitain.
https://www.ccm.ca/documents/etudes/2010_2011/10_11_26_ccmm_etude-transport_fr.pdf
- Cervero, R., & Duncan, M. (2006). Which reduces vehicle travel more: jobs-housing balance or retail-housing mixing?. *Journal of the American planning association*, 72(4), 475-490.
- Cervero, R., & Murakami, J. (2010). Effects of built environments on vehicle miles traveled: evidence from 370 US urbanized areas. *Environment and planning A*, 42(2), 400-418.
- Cervero, R. (2013). Transport infrastructure and the environment: Sustainable mobility and urbanism. *Urban development for the 21st century: Managing resources and creating infrastructure*, 155-182.
- Chan, K. (2016). Short platforms and trains: Is the SkyTrain Canada Line under-built and near capacity. *Daily Hive*.
- Chatman, D. G., Tulach, N. K., & Kim, K. (2012). Evaluating the economic impacts of light rail by measuring home appreciation: A first look at New Jersey's River Line. *Urban studies*, 49(3), 467-487.
- Chester, M. V. (2008). *Life-cycle environmental inventory of passenger transportation in the United States*. University of California, Berkeley.
- Chernoff, A. W., & Craig, A. (2018). *Housing price network effects from public transit investment: Evidence from Vancouver* (No. 2018-18). Bank of Canada Staff Working Paper.
- Chou, S. (2010). *The 2010 Olympic downtown transportation experience: lessons for Vancouver and future host cities of mega-Events*. Simon Fraser University.
- Colli, S. D. (2013). Aspects of contemporary urban and landscape redevelopment applying sustainable building methods and principles. *Nano, bio and green—technologies for a sustainable future* (pp. 577-584).
- Condon, P. M., & Dow, K. (2011). Transportation for Sustainable Communities: A cost and impact comparison between alternative transportation modes.
- Craig, M. (2011). TransLink and the 2010 Olympic Winter Games. *Institute of Transportation Engineers. ITE Journal*, 81(1), 56.
- Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., Vuuren, D. P. V., McCollum, D., & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation?. *Science*, 350(6263), 911-912.
- Del Pero, F., Delogu, M., Pierini, M., & Bonaffini, D. (2015). Life Cycle Assessment of a heavy metro train. *Journal of Cleaner Production*, 87, 787-799.
- Devlin, A. J. (2010). *Structural effects of the built environment on vehicle greenhouse gas emissions: evidence from Vancouver, Canada*. University of British Columbia.

- DeVries, D. N. (2019). Household income composition changes with rapid transit implementation: A natural experiment study of SkyTrain, Metro Vancouver, 1981-2016. Simon Fraser University.
- Dirgahayani, P. (2013). Environmental co-benefits of public transportation improvement initiative: the case of Trans-Jogja bus system in Yogyakarta, Indonesia. *Journal of cleaner production*, 58, 74-81.
- Dittmar, H., & Ohland, G. (Eds.). (2012). *The new transit town: Best practices in transit-oriented development*. Island Press.
- Doerr, L., Dorn, F., Gaebler, S., & Potrafke, N. (2020). How new airport infrastructure promotes tourism: evidence from a synthetic control approach in German regions. *Regional Studies*, 54(10), 1402-1412.
- Dong, D., Duan, H., Mao, R., Song, Q., Zuo, J., Zhu, J., ... & Liu, G. (2018). Towards a low carbon transition of urban public transport in megacities: A case study of Shenzhen, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 149-155.
- Dridi, A. (2017). *Analyse du processus d'émergence et de développement des indicateurs du bâtiment durable: le cas du Québec* [Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal].
- Edwards, T., & Smith, S. (2008). *Transport problems facing large cities* (No. 6/08). NSW Parliamentary Library Research Service.
- Elldér, E. (2014). Residential location and daily travel distances: The influence of trip purpose. *Journal of Transport Geography*, 34, 121-130.
- Elkind, E. (2022). Sustainable Transportation. *Interdisciplinary Approaches to Climate Change for Sustainable Growth* (pp. 199-216). Cham: Springer International Publishing.
- Engelbrektson, O. (2021). Why Synthetic Control estimators are biased and what to do about it: Introducing Relaxed and Penalized Synthetic Controls. *arXiv preprint arXiv:2111.10784*.
- Ewing, R., & Rong, F. (2008). The impact of urban form on US residential energy use. *Housing policy debate*, 19(1), 1-30.
- Falocchchio, J. C., & Levinson, H. S. (2015). *Road traffic congestion: a concise guide* (Vol. 7). Cham: Springer.
- Förg, F. (2020). Simulating the impact of multi-level government policy mixes on Metro Vancouver greenhouse gas emissions. Simon Fraser University.
- Forsyth, A., Oakes, J. M., Schmitz, K. H., & Hearst, M. (2007). Does residential density increase walking and other physical activity?. *Urban studies*, 44(4), 679-697.
- Foth, N. M. (2010). Long-term change around skytrain stations in Vancouver, Canada: A demographic shift-share analysis. *The Geographical Bulletin*, 51(1), 37.
- Frank, L., Bradley, M., Kavage, S., Chapman, J., & Lawton, T. K. (2009). Urban form, travel time, and cost relationships with tour complexity and mode choice. *Transportation*, 35(1), 37-54.

- Gallivan, F., Rose, E., Ewing, R., Hamidi, S., & Brown, T. (2015). *Quantifying transit's impact on GHG emissions and energy use—The land use component* (No. Project H-46).
- Gamiz, M., Planner, T., Braglewicz, M., & Blair, E. (2021). Environmental Impacts of Shared Mobility Services in Metro Vancouver. UBC Sustainability Scholar.
- Golub, A., Brown, A., Brakewood, C., MacArthur, J., Lee, S., & Ziedan, A. (2022). Equity and exclusion issues in cashless fare payment systems for public transportation. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 15, 100628.
- Gouvernement du Canada. (2021). *Chronologie : les grandes étapes de la lutte contre les changements climatiques du Canada au pays et à l'étranger*. Environnement et Changement climatique Canada. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/campagnes/50-ans-action-environnementale/eccc-chronologie/changement-climatique.html>
- Grazi, F., & Van den Bergh, J. C. (2008). Spatial organization, transport, and climate change: Comparing instruments of spatial planning and policy. *Ecological Economics*, 67(4), 630-639.
- Greene, D. L., Baker Jr, H. H., & Plotkin, S. E. (2010). *Reducing greenhouse gas emissions from US transportation*. United States Department of Transportation.
- Grube-Cavers, A., & Patterson, Z. (2014). In order to keep mass transit accessible, we must understand the relationship between gentrification and public transportation. *LSE American Politics and Policy*.
- Halsnæs, K., Shukla, P. R., & Garg, A. (2008). Sustainable development and climate change: lessons from country studies. *Climate Policy*, 8(2), 202-219.
- Handy, S., Cao, X., & Mokhtarian, P. (2005). Correlation or causality between the built environment and travel behavior? Evidence from Northern California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(6), 427-444.
- Hankey, S., & Marshall, J. D. (2010). Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions. *Energy Policy*, 38(9), 4880-4887.
- Holden, M. (2011). Public participation and local sustainability: Questioning a common agenda in urban governance. *International Journal of Urban and Regional Research*, 35(2), 312-329.
- Holz-Rau, C., & Scheiner, J. (2019). Land-use and transport planning—A field of complex cause-impact relationships. Thoughts on transport growth, greenhouse gas emissions and the built environment. *Transport Policy*, 74, 127-137.
- IEA. (2023). *Energy system : Transport*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

- Jiangying, L., Na, X., Lieyun, D., & Ying, Z. (2011, April). Study on Life-cycle carbon emissions of urban traffic system. *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)* (pp. 1585-1590). IEEE.
- Johnson, L. J. (1971). The spatial uniformity of a central place distribution in New England. *Economic Geography*, 47(2), 156-170.
- Jones, C. E. (2015). Transit-oriented development and gentrification in Metro Vancouver's low-income SkyTrain corridor. *Cities Centre: University of Toronto*.
- Jones, J. N. (2015). *Expanding the skytrain: multi-level governance of mass public transit in metro Vancouver*. Université d'Ottawa.
- Jones, C. E., & Ley, D. (2016). Transit-oriented development and gentrification along Metro Vancouver's low-income SkyTrain corridor. *The Canadian Geographer/Le Géographe Canadien*, 60(1), 9-22.
- Kitamura, R., Nakayama, S., & Yamamoto, T. (1999). Self-reinforcing motorization: can travel demand management take us out of the social trap?. *Transport Policy*, 6(3), 135-145.
- Kloepper, K. (2017). *On the Wrong Track?: Perspectives on Affordable Housing and Transit Oriented Development in Metro Vancouver*. University of British Columbia.
- Krizek, K. J. (2003). Neighborhood services, trip purpose, and tour-based travel. *Transportation*, 30, 387-410.
- Kuosmanen, T., Zhou, X., Eskelinen, J., & Malo, P. (2021). Design flaw of the synthetic control method. *Munich Personal RePEc Archive*, Paper No. 106390.
- Lee, J. (2012). *Parking at the Vancouver International Airport: Before and After the Canada Line*. University of British Columbia.
- Lefèvre, B. (2009). Urban Transport Energy Consumption: Determinants and Strategies for its Reduction.. An analysis of the literature. *SAPI EN. S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, (2.3).
- Litman, T. (2007). Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning. *Transportation Research Record*, 2017(1), 10-15.
- Litman, T. (2009). Transportation cost and benefit analysis. *Victoria Transport Policy Institute*, 31, 1-19.
- Litman, T. (2011). *Evaluating public transit as an energy conservation and emission reduction strategy*. Victoria, BC, Canada: Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. (2023). *TDM Success Stories-Examples of Effective Transportation Demand Management Policies and Programs, and Keys to Their Success*. Victoria Transport Policy Institute.
- Little, R. J., & Rubin, D. B. (2019). *Statistical analysis with missing data* (Vol. 793). John Wiley & Sons.
- Liu, Y., & Cirillo, C. (2016). Measuring transit service impacts on vehicle ownership and use. *Public transport*, 7, 203-222.

- Liu, Z., Ma, J., & Chai, Y. (2017). Neighborhood-scale urban form, travel behavior, and CO2 emissions in Beijing: implications for low-carbon urban planning. *Urban Geography*, 38(3), 381-400.
- Liu, B., Bryson, J. R., Sevinc, D., Cole, M. A., Elliott, R. J., Bartington, S. E., ... & Shi, Z. (2023). Assessing the Impacts of Birmingham's Clean Air Zone on Air Quality: Estimates from a Machine Learning and Synthetic Control Approach. *Environmental and Resource Economics*, 1-29.
- Louie, T., Wan, C., & Ying, J. (2008). *Greenhouse Gas Emissions Analysis of Future UBC Transportation Options*. University of British Columbia.
- Maldini, S. (2019). *La perception du rôle de l'immobilier dans la co-construction de la mobilité durable* [Mémoire de recherche, Université du Québec à Montréal].
- Mattioli, G. (2014). Where sustainable transport and social exclusion meet: Households without cars and car dependence in Great Britain. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 16(3), 379-400.
- McClelland, R., & Mucciolo, L. (2022). An update on the synthetic control method as a tool to understand state policy. *Tax Policy Center*.
- McGuckin, N., Zmud, J., & Nakamoto, Y. (2005). Trip-chaining trends in the United States: understanding travel behavior for policy making. *Transportation Research Record*, 1917(1), 199-204.
- Melchor, O. H., & Lembcke, A. C. (2020). *Developing transit-oriented communities for better accessibility and affordability: The case of the Metro Vancouver Region*. OECD Regional Development Papers.
- Mokhtarian, P. L., & Cao, X. (2008). Examining the impacts of residential self-selection on travel behavior: A focus on methodologies. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(3), 204-228.
- Moore, J., Kissinger, M., & Rees, W. E. (2013). An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver. *Journal of environmental management*, 124, 51-61.
- Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. Paris: Editions du Seuil.
- Murphy, R., Boyd, K., & Jaccard, M. (2016). *Evaluation of Actions and Policies to Reduce Urban GHG Emissions Using Multiple Criteria: A Contribution Towards Energy Efficiency in British Columbia's Built Environment*. Pacific Institute for Climate Solutions, University of Victoria.
- Næss, P. (2005). Residential location affects travel behavior—but how and why? The case of Copenhagen metropolitan area. *Progress in Planning*, 63(2), 167-257.
- Næss, P. (2011). 'New urbanism' or metropolitan-level centralization? A comparison of the influences of metropolitan-level and neighborhood-level urban form characteristics on travel behavior. *Journal of Transport and Land Use*, 4(1), 25-44.
- Nahlik, M. J., & Chester, M. V. (2014). Transit-oriented smart growth can reduce life-cycle environmental impacts and household costs in Los Angeles. *Transport policy*, 35, 21-30.
- Newman, J., & Perl, A. (2014). Partners in climate: Public-private partnerships and British Columbia's capacity to pursue climate policy objectives. *Canadian Public Administration*, 57(2), 217-233.

- Ngo, V. (2012). Identifying areas for transit-oriented development in Vancouver. *Trail Six: An Undergraduate Journal of Geography*, 6.
- Noland, R. B., & Lem, L. L. (2002). A review of the evidence for induced travel and changes in transportation and environmental policy in the US and the UK. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 7(1), 1-26.
- Nolon, J. R., & Bacher, J. A. (2007). Climate change, zoning and transportation planning: Urbanization as a response to carbon loading. *Real Estate Law Journal*, 36, 211.
- Parkopedia. (2020). *2019 Global Parking Index Report*. <https://business.parkopedia.com/2019-global-parking-index>
- Petrunoff, N., Rissel, C., Wen, L. M., & Martin, J. (2015). Carrots and sticks vs carrots: Comparing approaches to workplace travel plans using disincentives for driving and incentives for active travel. *Journal of Transport & Health*, 2(4), 563-567.
- Poudenx, P., & Merida, W. (2007). Energy demand and greenhouse gas emissions from urban passenger transportation versus availability of renewable energy: The example of the Canadian Lower Fraser Valley. *Energy*, 32(1), 1-9.
- Preece, M. (2006). Canada Line Opens in November 2009. *Metro Report: A Railway Gazette Yearbook*, 162.
- Profillidis, V. A., Botzoris, G. N., & Galanis, A. T. (2014). Environmental effects and externalities from the transport sector and sustainable transportation planning—A review. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 4(4), 647-661.
- Qi, F., Abu-Rumman, A., Al Shraah, A., Muda, I., Huerta-Soto, R., Hai Yen, T. T., ... & Michel, M. (2023). Moving a step closer towards environmental sustainability in Asian countries: focusing on real income, urbanization, transport infrastructure, and research and development. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, 36(2), 2111317.
- Quastel, N., Moos, M., & Lynch, N. (2012). Sustainability-as-density and the return of the social: The case of Vancouver, British Columbia. *Urban Geography*, 33(7), 1055-1084.
- Rammner, S. (2014). Reinventing Mobility. *Braunschweig: Institute for Transportation Design*.
- Rayle, L. (2014). Housing Policy Debate Investigating the Connection Between Transit-Oriented Development and Displacement: Four Hypotheses. *Housing Policy Debate*, 25(3), 531-548.
- Rice, J. L., Cohen, D. A., Long, J., & Jurjevich, J. R. (2020). Contradictions of the climate-friendly city: new perspectives on eco-gentrification and housing justice. *International journal of urban and regional research*, 44(1), 145-165.
- Rohács, J., & Rohács, D. (2020). Total impact evaluation of transportation systems. *Transport*, 35(2), 193-202.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., Slack, B., 2009. *The Geography of Transport Systems*. Routledge, New York.

- Romero-Jordán, D., Sanz, J. F., & Burguillo, M. (2014). Is it environmentally desirable to encourage public transport through taxes? Evidence for Spanish households. *Cogent Economics & Finance*, 2(1), 946999.
- Say, K., Csereklyei, Z., Brown, F. G., & Wang, C. (2023). The economics of public transport electrification: A case study from Victoria, Australia. *Energy Economics*, 120, 106599.
- Shapiro, R.J., Hassett, K.A., & Arnold, F.S. (2002). Conserving energy and preserving the environment: the role of public transportation. *American Public Transportation Association*.
- Scheiner, J., 2012. A century of motorisation in urban and rural contexts: paths of motorisation in German cities. *Erdkunde* 66(4), 313–328.
- Shifan, Y., & Suhrbier, J. (2002). The analysis of travel and emission impacts of travel demand management strategies using activity-based models. *Transportation*, 29, 145-168.
- Shifan, Y. (2008). The use of activity-based modeling to analyze the effect of land-use policies on travel behavior. *The Annals of Regional Science*, 42, 79-97.
- Siedentop, S., & Fina, S. (2010). Monitoring urban sprawl in Germany: towards a GIS-based measurement and assessment approach. *Journal of Land Use Science*, 5(2), 73-104.
- Siemiatycki, M. (2006). Message in a metro: building urban rail infrastructure and image in Delhi, India. *International Journal of Urban and Regional Research*, 30(2), 277-292.
- Soni, A. R., & Chandel, M. K. (2018). Assessment of emission reduction potential of Mumbai metro rail. *Journal of cleaner production*, 197, 1579-1586.
- Spadaro, J. V., Langlois, L., & Hamilton, B. (2000). Assessing the difference. *IAEA Bull*, 42(2), 19-24.
- Sroka, R. (2021). Mega-events and rapid transit: evaluating the Canada line 10 Years after Vancouver 2010. *Public Works Management & Policy*, 26(3), 220-238.
- Stan, A. I. (2013). Morphological patterns of urban sprawl territories. *Urbanism. Arhitectura. Construcción*, 4(4), 11-24.
- Stevens, M. R. (2017). Does compact development make people drive less?. *Journal of the American Planning Association*, 83(1), 7-18.
- Tamaki, T., Nakamura, H., Fujii, H., & Managi, S. (2019). Efficiency and emissions from urban transport: Application to world city-level public transportation. *Economic Analysis and Policy*, 61, 55-63.
- Timmermans, H. J., & Zhang, J. (2009). Modeling household activity travel behavior: Examples of state of the art modeling approaches and research agenda. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(2), 187-190.
- Translink. (2019). *Annual Statutory Report*. Translink. https://www.translink.ca/-/media/translink/documents/about-translink/corporate-reports/statutory_annual_report/2019-statutory-annual-report-with-appendix-a.pdf

- Translink. (2022). *Transit Service Performance Review*. Translink. <https://view.publitas.com/translink/2022-transit-service-performance-review/page/1>
- Urban Transportation Task Force. (2012). *The high cost of congestion in canadian cities*. Council of Ministers Transportation and Highway Safety.
- Vahedi, J., Shams, Z., & Mehdizadeh, M. (2021). Direct and indirect effects of background variables on active commuting: mediating roles of satisfaction and attitudes. *Journal of Transport & Health, 21*, 101054.
- Van Sang, E. N., Oram, M., & Perl, A. (2015). Assessing the GHG Emissions Effects of the Canada Line in Vancouver and Tramway T2 in Paris. *Canadian Transportation Research Forum 50th Annual Conference-Another 50 Years: Where to From Here?//Un autre 50 ans: qu'en est-il à partir de maintenant? Montreal, Quebec, May 24-26, 2015*.
- Vance, C., & Hedel, R. (2007). The impact of urban form on automobile travel: disentangling causation from correlation. *Transportation, 34*, 575-588.
- VandeWeghe, J. R., & Kennedy, C. (2007). A spatial analysis of residential greenhouse gas emissions in the Toronto census metropolitan area. *Journal of industrial ecology, 11(2)*, 133-144.
- Ville de Vancouver. (2022). *Vancouver Plan 2050*. City of Vancouver. <https://vancouverplan.ca/wp-content/uploads/Vancouver-Plan-2022-06-27.pdf>
- Vives-i-Bastida, J. (2022). Predictor Selection for Synthetic Controls. *arXiv preprint arXiv:2203.11576*.
- Wang, A., Stogios, C., Gai, Y., Vaughan, J., Ozonder, G., Lee, S., ... & Hatzopoulou, M. (2018). Automated, electric, or both? Investigating the effects of transportation and technology scenarios on metropolitan greenhouse gas emissions. *Sustainable cities and society, 40*, 524-533.
- Wegener, M. (2021). Land-use transport interaction models. *Handbook of regional science, 229-246*.
- Xu, E. (2005). *A transit-friendly community: integrating a SkyTrain station into the neighborhood* [Doctoral dissertation, University of British Columbia].
- Yang, W., Wang, S., & Zhao, X. (2018). Measuring the direct and indirect effects of neighborhood-built environments on travel-related CO2 emissions: a structural equation modeling approach. *Sustainability, 10(5)*, 1372.
- Zamir, K. R., Nasri, A., Baghaei, B., Mahapatra, S., & Zhang, L. (2014). Effects of transit-oriented development on trip generation, distribution, and mode share in Washington, DC, and Baltimore, Maryland. *Transportation Research Record, 2413(1)*, 45-53.
- Zegras, P. C. (2005). *Sustainable urban mobility: exploring the role of the built environment* [Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology].