



**Analyse coût-bénéfice en équilibre partiel.
Une étude exploratoire du projet de train à haute
vitesse entre Québec et Windsor.**

Mémoire

Simon Lalancette

Maîtrise en économique
Maître ès arts (M.A.)

Québec, Canada

© Simon Lalancette, 2014

Résumé

Le développement des réseaux de transport requiert d'importants investissements financiers et une étroite collaboration entre les acteurs publics et privés. La viabilité économique de ces projets est souvent explorée à l'aide d'analyses coût-bénéfice. Dans ce mémoire, nous appliquons une nouvelle méthodologie, appelée MOLINO-II, au projet de train à haute vitesse (THV) reliant la ville de Québec à Windsor (Ontario). Par rapport aux approches financières et économiques traditionnelles, cette approche développée notamment par de Palma et collab. (2010) permet de mieux appréhender les comportements stratégiques de l'ensemble des acteurs (opérateurs de trains et des modes de transport concurrents, propriétaires d'infrastructures, gouvernements et utilisateurs) à l'aide d'un système d'équations comportementales et d'équilibres. Ici, nous nous concentrons sur la modélisation du réseau de transport entre les principales villes du réseau (Québec, Montréal, Ottawa, Toronto, Windsor) en considérant le réseau terrestre (train, voiture et autocar) et aérien (avions de ligne). Seul l'aspect « demande » ou « utilisateur » du modèle est exploré. Nous laissons la modélisation de l'offre de transports pour de futures recherches. Ce travail n'est donc qu'une première étape vers l'élaboration d'un modèle plus complet, qui permettrait de convertir notre analyse en un outil d'aide à la décision.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Introduction	1
1 Revue de littérature	3
1.1 Les analyses coût-bénéfice des projets de THV en Amérique du Nord	3
1.2 Modèles d'équilibre partiel/général appliqués au marché du transport	8
2 Application de MOLINO-II au THV entre Québec et Windsor	11
2.1 Flux de voyageurs et demande de services de transport	14
2.2 Coûts du projet	17
3 Méthodologie	21
3.1 Description détaillée du modèle MOLINO-II	21
3.2 Éléments additionnels	27
4 Données	29
4.1 Réseau et hypothèses sous-jacentes.	29
4.2 Hypothèses socioéconomiques	31
4.3 Hypothèses techniques : distances, temps de trajet et vitesses par mode de transport	34
4.4 Valeur des paramètres	37
5 Simulations	41
5.1 Les variables endogènes et exogènes du système MOLINO-II	41
5.2 Scénarios avec l'instauration de la technologie F200+ et E300+	45
Conclusion	51
Bibliographie	53

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques des deux technologies de train représentatives.	11
2.2	Nombre de rames par jour dans chaque direction	14
2.3	Temps de déplacement entre les principales villes du Corridor	14
2.4	Les volumes de voyageurs observés au cours de l'année 2006, tous les modes inclus.	15
2.5	Part occupé par chaque type de transport pour chaque type de voyageur.	15
2.6	Répartition du trafic par tranche horaire et mode de transport.	16
2.7	Coûts des opérateurs et des propriétaires d'infrastructure pour les différentes technologies. En millions de dollars canadiens de 2009.	18
4.1	La population estimée des villes sur le corridor et leurs agglomérations.	32
4.2	Le niveau d'utilisation prédit pour chaque parcours.	34
4.3	Caractéristique de l'automobile et de l'autocar sur chaque tronçon.	35
4.4	Caractéristique du train Via Rail actuel et de l'avion sur chaque tronçon.	35
4.5	Caractéristique prévu du train à haute vitesse sur chaque tronçon.	36
4.6	Prix des billets avec taxes entre les divers tronçons pour différents transports.	36
4.7	Paramètres des fonctions liées à la demande des voyageurs.	37
4.8	Élasticité des dépenses entre les heures de pointe/creuses construites avec les CES.	38
4.9	Paramètres pour les autres agents.	39
4.10	Les opérateurs principaux sur chaque tronçon.	39
4.11	Les propriétaires d'infrastructure sur chaque tronçon.	39
5.1	Variables endogènes.	42
5.2	Variables exogènes.	43
5.3	Système d'équations.	44
5.4	Chocs sur les variables exogènes entre Québec et Montréal.	46
5.5	Résultats des simulations pour les voyageurs non-affaires sur le parcours QM lors des heures creuses.	49
5.6	Résultats des simulations pour les voyageurs non-affaires sur le tronçon QM lors des heures creuses (suite).	50
5.7	Résultats des simulations pour les voyageurs non-affaires sur le parcours QM lors des heures creuses (suite et fin).	50

Liste des figures

2.1	Tracés et gares représentatives entre Québec et Windsor	12
2.2	Surplus du consommateur pour un bien ou un service	16
2.3	Surplus du consommateur généré par la mise en service du THV	17
3.1	Exemple d'un réseau de transport	22
3.2	Les utilisateurs du réseau de transport	23
3.3	L'ensemble des acteurs	25
3.4	Le financement des infrastructures de transport	25
4.1	Réseau représentatif du transport entre Québec et Windsor	30
4.2	Arbre des décisions d'un utilisateur k sur OD.	31
4.3	Les niveaux de populations des villes étudiées entre 1987 et 2055.	33

Introduction

C'est au Japon que les premiers trains à grande vitesse sont apparus. Commencé en 1959, le Shinkansen¹ fut mis en service en 1964, alors même que les ingénieurs japonais débutaient leurs recherches sur le train à sustentation magnétique² (Appelé Maglev). Cette ligne à grande vitesse reliait Tokyo à Osaka. Ce n'est qu'en 1981 qu'un second pays, la France, inaugure son propre TGV³.

La haute vitesse ferroviaire s'est progressivement étendue à plusieurs pays d'Europe et d'Asie. Pour le principal opérateur public français (la SNCF⁴), cette technologie était avant tout un moyen de redresser le déclin inexorable de la fréquentation de ses trains au profit de la voiture. Dans sa première version, le TGV devait être propulsé par des turbines à gaz. À la suite de la crise pétrolière de 1973, le choix fut fait de revenir à la traction électrique. Selon [Lamming \(1995\)](#), les raisons de ce choix furent autant politiques, techniques qu'économiques. Le temps de parcours considérablement réduit par rapport à la situation antérieure permit à la SNCF de reconquérir ses parts de marché, en particulier celles perdues aux dépens du réseau aérien.

Le transport ferroviaire à haute vitesse s'est peu développé en Amérique du Nord. Les projets existent et les analyses coût-bénéfice à leur sujet sont nombreuses. Pourtant, les investissements finaux peinent à se concrétiser. Un cas particulièrement emblématique est le projet de THV (Train à haute vitesse) entre la ville de Québec (province du Québec) et celle de Windsor (province de l'Ontario) au Canada. La récente mise à jour réalisée de la première étude d'impact ([Ontario/Quebec Rapid Train Task Force, 1991](#)) a mobilisé les compétences d'un consortium de cinq entreprises consultantes ([EcoTrain, 2010](#)), mais le débat public sur l'opportunité de réaliser l'investissement reste passionné. Cela démontre le besoin de décideurs en outils d'analyse stratégique susceptibles de guider leurs choix en la matière.

L'analyse coût-bénéfice traditionnelle (voir [Layard et Glaister, 1994](#); [Boardman et collab., 2011](#)) se concentre souvent sur un seul projet et le comportement stratégique des principaux

1. Ce nom se traduit par « nouvelle grande ligne » en japonais.

2. Le principal avantage de cette technologie est que l'absence de résistance liée au frottement des roues lui permet d'atteindre des vitesses largement supérieures aux trains à haute vitesse conventionnels.

3. Acronyme de Train à Grande Vitesse.

4. Acronyme de Société Nationale des Chemins de fer Français

acteurs⁵ n'est généralement pas explicitement traité. Les modèles basés sur de grands systèmes urbains (UrbanSim ou SustainCity, etc) requièrent le regroupement d'importantes bases de données et l'adaptation d'un grand nombre d'équations au contexte local. Une fois ce travail de longue haleine accomplies, le modèle devient difficile à maîtriser. Il existe pourtant des modèles économiques de taille intermédiaire permettant de réaliser une analyse coût-bénéfice de projets d'infrastructure en prenant en compte à la fois les comportements stratégiques des acteurs et en intégrant de manière simplifiée les spécificités des réseaux locaux de transport. Ces approches n'ont pas été appliquées au Canada à notre connaissance. Ce mémoire de maîtrise cherche à utiliser l'un de ces modèles, le modèle MOLINO-II développé par de Palma et collab. (2010), pour évaluer l'impact économique du projet de train à haute vitesse (THV) dans le corridor Québec-Windsor. Il s'agit ici de poser les premiers jalons de l'analyse, en se concentrant (i) sur la modélisation d'un réseau local de transport sur ce corridor qui inclut le transport terrestre et aérien et (ii) sur la récolte de données pour la partie « utilisateurs ». Le but est d'aboutir à une simulation simple du modèle avec le logiciel GAMS. La modélisation détaillée des autres acteurs (gouvernements fédéral et provinciaux, opérateurs, propriétaires d'infrastructures, etc.) est laissée pour un développement ultérieur.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante. Le premier chapitre présente une revue de littérature qui inclut des analyses de projets existants sur le THV au Canada et les résultats obtenus à l'aide de modèles de simulation en équilibre partiel. Au chapitre 3, le modèle MOLINO-II est présenté et adapté à notre cadre d'analyse. Ensuite, les données utilisées dans l'analyse sont décrites. Nous concluons avec quelques simulations, un rappel de la pertinence de la problématique et de l'originalité de la méthodologie, ainsi que quelques mots sur les extensions à réaliser pour aboutir à une évaluation intégrant tous les éléments pertinents.

5. En l'occurrence les utilisateurs (individus et firmes), le gouvernement (fédéral et provincial), les opérateurs (de moyens de transport) et les propriétaires d'infrastructures

Chapitre 1

Revue de littérature

Avant de présenter les analyses coût-bénéfice réalisées sur les THV en Amérique du Nord (É.-U. et Canada), rappelons quel est leur principal objectif. Cette approche vise à cataloguer de manière systématique les coûts et bénéfices d'un projet sur l'ensemble de son cycle de vie, à en effectuer une évaluation monétaire, et à établir sa valeur actualisée nette par rapport au statu quo. L'objectif final est donc d'appuyer la prise de décision et d'établir la viabilité économique d'un projet. Lorsque les agents privés évaluent leurs projets d'investissement, ils ont naturellement tendance à ne pas prendre en compte les coûts et bénéfices sociaux de leurs actions. L'analyse coût-bénéfice cherche à inclure toutes les externalités pertinentes dans l'évaluation. L'analyse incorpore ainsi des composantes comme les économies de temps réalisées en fonction de la valeur du temps des individus, les coûts et bénéfices de la pollution, de sécurité publique, les variations de bien-être de tous les acteurs et les effets distributifs. Lorsque toutes les composantes i des bénéfices et j des coûts au temps t sont intégrées dans l'évaluation, le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) du projet se résume à l'application d'une équation simple :

$$\text{VAN du projet}_{t=0} = \sum_{i,j,t} \frac{\text{Bénéfice}_{i,t} - \text{Coût}_{j,t}}{(1 + r_t)}.$$

Lorsque la VAN s'avère positive, alors le projet est rentable, et il permet d'effectuer des transferts compensatoires entre gagnants et perdants. En présence de plusieurs projets, c'est celui qui assurera le gain le plus élevé qui devra être privilégié.

1.1 Les analyses coût-bénéfice des projets de THV en Amérique du Nord

Dans cette section, quatre études principalement américaines et autant d'études canadiennes seront brièvement présentées. Elles mettent en lumière l'hétérogénéité des méthodes employées.

1.1.1 Les projets américains (É.-U.)

Certaines analyses explorent la faisabilité de corridors ferroviaires transfrontaliers entre des villes canadiennes et américaines. Par exemple, l'étude du [Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc. \(2003\)](#) se penche sur l'axe de 530 km entre Boston (MA) – Montréal (QC). Conçu pour rouler à une vitesse commerciale de 151 km/h en moyenne, ce THV éviterait tout transfert (présentement obligatoire) entre ces deux villes et réduirait le temps du trajet de 7 heures (soit 3,5 h contre 10,5 h). L'option considérée comme étant la plus pertinente à l'heure actuelle utiliserait des alignements de rails existants, sans électrification. Elle éliminerait l'arrêt à la frontière canado-américaine et fournirait un service à vitesse modérée à relativement bas prix. Dans ce scénario, le parcours complet serait de 5,8 heures, sachant que le scénario optimal utilise un transport opérant à une vitesse commerciale de 109 km/h. L'achalandage annuel dans le corridor Boston-Montréal a été estimé à 680,000 passagers, dont 220,000 traverseront l'axe entier. Le tout pourrait engendrer 34,6 milliards de dollars US en revenu de passager. Toutefois, jusqu'à présent, les coûts de ce projet n'ont pas été estimés.

D'autres analyses plus complètes existent aux États-Unis. L'étude du [Parsons-Clough Harbour \(2004\)](#) s'intéresse à l'axe de 612 km qui sépare New York (NY) et Montréal (QC). À pleine vitesse (soit à 241,4 km/h), ce THV réduirait le temps de voyage entre ces deux villes de 6 heures par rapport au raccordement ferroviaire actuel (soit un temps de voyage total de 4,08 h contre 10,25 h). L'analyse coût-bénéfice de ce projet montre que le tracé actuellement utilisé limite le nombre de courbes, facilitant ainsi l'atteinte d'une vitesse élevée du train. Il semblerait que l'usage d'une technologie (élévation sous-pression) plus onéreuse à l'installation et à l'entretien soit indiqué pour ce projet. L'investissement de la portion entre Albany et Rouses Point ¹ (306 km), entièrement supporté par l'État de New York, est évalué à 4 milliards de dollars US, tandis que les coûts facturés au Québec pour la section entre Rouses Point et Montréal (66 km) seraient de 80 à 110 millions de dollars US. Face aux coûts élevés de la portion new-yorkaise, l'étude juge préférable d'envisager un allongement progressif du réseau. Toutefois, l'étude laisse la répartition de la charge financière du projet entre les autorités publiques ou privées indéterminée.

Des THV ont également été considérés à l'ouest du continent américain. La [Freight Systems Division \(2006\)](#) du département des transports de l'État de Washington a analysé l'axe Portland (OR) - Vancouver (BC) d'une longueur approximative de 800 km. À l'heure actuelle, voyager de Vancouver jusqu'à Portland dure 7 heures et 25 minutes et requiert un arrêt à Seattle. Le projet prévoit une liaison directe entre les deux villes aux extrémités du réseau, réduisant la durée du parcours à 5 heures et 37 minutes. Ceci conduirait à une économie de temps de plus d'une heure sur la portion Vancouver - Seattle (soit 2,62 h contre 3,92 h) pour répondre aux besoins du système ferroviaire de tous les utilisateurs au cours des vingt prochaines années,

1. Village du comté de Clinton (New York). Il est à moins de deux kilomètres au sud de la frontière canado-américaine.

un investissement de plus de 6,5 milliards de dollars US serait nécessaire. L'État de l'Oregon² (0,42 milliard), de Washington (3,97 milliards), la province de la Colombie-Britannique (0,50 à 1,07 milliard) et le Sound Transit (0,67 milliard) devront supporter les coûts reliés aux opérations, aux nouveaux équipements et à l'entretien sur leur territoire respectif. Par contre, la répartition des coûts entre l'état ou la province, le gouvernement fédéral et les agences de transport régionales comme Amtrak reste indéterminée. Diverses autres dépenses sont estimées à 0,93 milliard. Le rapport conclut que ce THV offrirait une alternative viable à l'automobile et au transport aérien régional, tout en soutenant l'amélioration de la mobilité du fret ferroviaire dans l'État de Washington.

Récemment, sous l'impulsion du président Obama, une politique globale de remise à niveau et d'innovation dans les transports publics émerge aux États-Unis. Simultanément, le premier THV amorce son développement en Californie. Le tracé du California High-Speed Rail prévu par la California High-Speed Rail Authority (2012)³ devrait desservir 25 gares réparties sur approximativement 1200 km, de Sacramento (Au nord) à San Diego (Au sud), en passant par San Francisco et Los Angeles. Ce nouveau THV diminuerait le temps de voyage entre San Francisco et San Diego d'un peu plus de 8 heures par rapport au réseau routier utilisable en ce moment (soit 3,58 h contre 12 h). L'engorgement actuel des autoroutes et aéroports est le résultat d'une population de 37 millions d'habitants. Les coûts finaux s'élèveraient à 68 milliards de dollars US et, selon la planification initiale, le financement serait assuré par l'État fédéral (41.9 milliards), des obligations d'état (8.2 milliards), du capital privé (13.1 milliards) et d'autres acteurs (4.9 milliards répartis entre l'État, le local et le privé). Dans cette étude, le rôle des différents acteurs est bien défini. Le secteur privé s'occuperait de concevoir, construire et opérer le système, tandis que le secteur public apporterait les fonds financiers dans la phase initiale du projet. L'étude estime que le projet créera près de 900,000 emplois à temps plein par année lors de la phase de construction (jusqu'en 2028), dont 400,000 seront des emplois de long terme. Ce chiffre élevé s'obtient en appliquant le multiplicateur d'emploi issu des tableaux entrées-sorties macroéconomiques à l'investissement total de 68 milliards. On estime l'économie de déplacements automobiles sur 40 ans à 515 milliards de km. En d'autres mots, ce THV permettrait une économie de 146 millions d'heures de circulation automobile par année, une fois le réseau en place.

1.1.2 Les projets canadiens

En remontant dans l'Ouest canadien, on tombe sur le projet de THV en Alberta évalué par TEMS (2008). Ce projet vise à faciliter l'intégration des communautés périphériques du corridor Calgary-Edmonton. L'étude anticipe l'émergence d'un important développement régional. Les hautes technologies, l'informatisation des procédés et les télécommunications joueront un rôle particulièrement important. L'Alberta reste un cas particulier puisque son essor dépend

2. Union Station jusqu'à la Columbia River

3. Agence responsable de ce THV.

en grande partie du marché du pétrole. Le prix du pétrole constamment à la hausse fait en sorte que le THV prévu offrirait une alternative efficace (en termes de coût et d'utilisation d'énergie) aux autres déplacements. Le surplus du consommateur d'un tel projet varie à travers les villes concernées par rapport à leur densité de population, leur distance relativement aux autres villes et le prix à la hausse des transports alternatifs. Les rentes économiques sont guidées, quant à elles, par l'augmentation du nombre d'emplois, du revenu des ménages et des prix des logements. Le revenu lié à la hausse des recettes fiscales devrait profiter à tous les paliers du gouvernement. Dans cette province, l'analyse coût-bénéfice pointe vers un projet viable économiquement.

En général, tant dans les analyses financières que celles de type coût-bénéfice, l'État fédéral contribue significativement au financement de la part publique des coûts. Dans le cas du projet de THV Québec-Windsor que nous allons développer ci-après, la contribution financière publique est de 50 % pour le gouvernement fédéral, 25 % pour le gouvernement du Québec et 25 % pour celui de l'Ontario. Dans toutes les études se posent la question du choix du taux d'actualisation à utiliser pour calculer la valeur actualisée nette des coûts et avantages sociaux. Il existe des écarts considérables dans les taux utilisés au niveau des différentes juridictions. Aucune recommandation ne semble exister en Ontario ou au Québec à ce sujet. Ce taux fut finalement fixé à 5 %. Historiquement, la viabilité des grands projets d'infrastructures s'est souvent faite sur la base d'analyses purement financières. C'est notamment le cas de la première analyse effectuée par le *Ontario/Quebec Rapid Train Task Force (1991)* pour le THV Québec-Windsor. L'objectif initial du projet était de réduire la congestion des routes sur le corridor reliant la ville de Québec à celle de Windsor en Ontario. Sans pour autant être très approfondie, l'étude aboutit à d'importantes recommandations qui seront fréquemment reprises et actualisées postérieurement. Les projections montrent que les voyageurs pourraient opter pour le THV si le gain de temps était réduit significativement entre les principales villes du réseau. À l'époque, le groupe de travail croyait déjà au potentiel du THV dans le secteur du transport de passagers et de marchandises. Le projet, sujet à d'importants investissements, devait cependant être développé progressivement, en commençant par les régions densément peuplées. La phase initiale nécessite un réarrangement des connexions intermodales, des adaptations du tracé ferroviaire existant et du matériel permettant d'accueillir la technologie de la haute vitesse. Rappelons également que le contexte québéco-ontarien nécessite l'adoption de technologies supportant les hivers rigoureux, la pluie verglaçante, etc.

Ce n'est qu'en 1995 qu'apparaît la terminologie « analyse coût-bénéfice » dans le cadre du THV Québec-Windsor. Le document de l'*EPTRQO (1995)*, présenté au gouvernement fédéral et aux gouvernements provinciaux du Québec et de l'Ontario, utilise cette approche plus globale que l'approche purement financière. Le groupe de travail fait remarquer que l'instauration d'un THV dans le corridor Québec-Windsor engendre des dépenses en recherche et développement afin d'atteindre un avancement technologique rendant l'outil utilisable sous des conditions

climatiques extrêmes. Le cas échéant, ces nouvelles installations permettraient un déplacement nettement plus rapide qu'auparavant grâce à une vitesse de croisière aux alentours de 200 km/h jusqu'à 300 km/h. Dans cette étude, on place en avant-plan les différences non significatives de coûts d'installation et d'entretien entre les différents types de train envisagés⁴. Par contre, le temps de déplacement reste grandement affecté. Le tout entraînera en une compétition plus prononcée entre les divers types de transport, soit l'aérien, le ferroviaire et le routier. Le document ultérieur de *EcoTrain* (2010) traite également cette concurrence et y intègre même un aspect apparemment plus superficiel : l'intérieur du train. L'apparence, le confort et la qualité du service sont donc perçus comme d'importantes composantes de concurrence intermodale, que le service ferroviaire doit soigner pour attirer une plus grande clientèle.

L'actualisation du projet de *EPTRQO* (1995) fut réalisée par *EcoTrain* (2010) en raison de l'évolution de la technologie et des systèmes de trains à haute vitesse (THV) et des importants changements démographiques et économiques intervenus sur ce corridor au cours des 15 dernières années (forte densification dans l'occupation des sols, croissance des grandes villes et de leurs abords, hausse de la congestion routière entre ces grandes villes, augmentation de l'intérêt public pour un réseau de transport écologiquement durable). La mise en service du THV vise principalement à accroître la capacité de transport de voyageurs, à soulager l'engorgement du secteur routier et à revitaliser le secteur ferroviaire. Les objectifs des politiques relatives au THV ont mis l'accent surtout sur la réduction des temps de parcours et l'amélioration de la qualité du transport public quant à la fréquence, la fiabilité, le confort et la sécurité. Tout comme l'*EPTRQO* (1995), l'étude de 2010 évalue deux technologies représentatives fondées essentiellement sur des vitesses d'exploitation minimales de 200 km/h et de 300 km/h, que l'on nommera respectivement F200+ et E300+⁵. L'analyse porte sur huit scénarios, qui considèrent chacun deux technologies représentatives et quatre tronçons : Québec/Windsor, Québec/Toronto, Montréal/Windsor, Toronto/Windsor. L'approche coût-bénéfice utilise des données exprimées en dollars constants, contrairement à l'analyse financière qui se fait à dollars courants. Elle fait l'usage d'un taux d'actualisation social pour calculer la valeur actualisée nette des avantages et de coûts du projet. Pour estimer l'économie d'un déplacement réalisée par un ancien usager du mode ferroviaire, *EcoTrain* prend en compte les trois éléments suivants : la réduction du temps de déplacement, une hausse de prix payés pour le voyageur en raison de son passage de Via Rail au THV et une valeur ajoutée pour le voyageur en raison d'un horaire plus pratique. Au final, les différents projets analysés sont supposés rentables à long terme, le court terme impose des investissements trop lourds⁶. Évidemment, on doit d'abord analyser quelles villes à l'intérieur de ce réseau sont les plus susceptibles d'en accepter les coûts. Le projet devrait d'abord se développer entre Montréal et Toronto, puis s'étendre

4. Trains à différentes vitesses de croisière.

5. La traction diesel a été sélectionnée pour la technologie F200+ et la traction électrique pour la technologie E300+. Ces deux technologies correspondent aux limites inférieures et supérieures de l'exploitation actuelle des THV.

6. Pour plus de détail, il faut consulter le rapport final d'*EcoTrain* à partir de la page 147.

au reste du corridor en privilégiant l’extension vers Québec.

Toutes les études nord-américaines citées partagent des conclusions similaires. Le THV est vu comme un moyen de transport alternatif qui permettrait de favoriser la compétition entre les différents modes de transport, d’éliminer certaines lignes ferroviaires désuètes entre les grands axes, et d’améliorer grandement le bien-être des voyageurs (temps de trajet, confort et sécurité). En plus, le THV devrait grandement diminuer le niveau de congestion dans les milieux urbains denses et améliorer la liaison entre les villes éloignées des grands centres. Néanmoins, ces études utilisent des bases de données et des méthodologies bien différentes, ce qui les rend difficilement comparables. C’est pourquoi, ce mémoire se basera uniquement sur la base de données et les hypothèses adoptées dans *EcoTrain* (2010).

1.2 Modèles d’équilibre partiel/général appliqués au marché du transport

Le département d’ingénierie des transports et de l’aménagement de l’Université de Toronto développe un modèle de simulation nommé ILUTE (Integrated Land Use, Transportation, Environment modeling system). Il s’agit d’un système de modélisation urbaine intégrée qui se compose d’un « noyau comportemental » qui relie le développement territorial, les choix de localisation des agents, l’activité économique et de transport, et la demande de voiture. Chacune de ses composantes implique un ensemble complexe de sous-modèles interagissant entre eux et qui intègrent les interactions d’offre et de demande. Pour construire un modèle global représentant chacune de ces composantes, le projet ILUTE spécifie les actions des individus et des entreprises, puisque ces deux acteurs prennent des décisions qui influent directement sur la demande de voyages. Les ménages sont également modélisés comme une entité spécifique au sein du modèle étant donné que certains choix comme le lieu de résidence et la possession d’une automobile sont généralement pris par eux. Dans la représentation des voyages, le modèle adopte une approche explicite basée sur les activités, dans laquelle le voyage est dérivé du besoin de participer dans les activités, et la tendance à voyager est le résultat dynamique de la planification de chaque personne. Ce modèle de microsimulation de la région du Grand Toronto sera possiblement appliqué dans d’autres centres urbains canadiens, y compris la ville de Québec et Edmonton.

Le modèle MOLINO-II⁷ est une approche plus macroéconomique qui permet d’évaluer les investissements dans un projet et les comportements stratégiques des opérateurs par l’intermédiaire d’ajustement de quantités de voyage offerts et du prix, et de la modélisation d’un réseau simplifié. Ce réseau peut contenir différents types de transport (passagers/marchandises), pour différentes catégories de voyageurs (loisir/professionnel) à différentes périodes de la journée (heures de pointe/heures creuses). Il permet de gérer la répartition du financement de

7. Des informations sur MOLINO-I sont disponibles dans de Palma, Lindsey, Proost, Van der Loo (2007).

différents projets d'infrastructures de transport par l'intermédiaire de fonds de financement auxquels participent des agents aussi divers que les voyageurs, les entreprises, les pouvoirs publics, les propriétaires d'infrastructures et les opérateurs de différents moyens de transport. Ces mêmes agents interagissent sur le réseau par des mécanismes d'offre et de demande, en maximisant leur utilité/profit. Toute modification de l'offre ou de la demande se répercute sur le réseau et amène les agents à réajuster leur demande/offre de transports pour chaque mode (voiture, autocar, train, avion).

MOLINO-II a déjà été testé à plusieurs reprises par ses créateurs, voir notamment Proost et collab. (2007). En tant qu'outil décisionnel, il a été appliqué à certains projets faisant partie des trente projets prioritaires à l'horizon 2020 du réseau de transport transeuropéen (RTE-T). Il a été appliqué par exemple à la ligne de la Betuwe, connue aussi sous le nom de Betuweroute, une nouvelle ligne ferroviaire néerlandaise longue de 160 km et affectée au transport de marchandises. Cette ligne relie le port de Rotterdam à la frontière allemande. MOLINO a permis d'évaluer 4 scénarios pertinents. La situation initiale (avec les péages routiers en place et sans la ligne ferroviaire) est comparée à des scénarios de tarification au coût marginal social appliqué sur la route, et à différents projets avec la nouvelle ligne. Le modèle concluait que la nouvelle ligne ferroviaire prévue aboutirait à une réduction du bien-être social. Une subvention de plus de 100% du montant de l'investissement était nécessaire pour rendre ce projet économiquement rentable.

MOLINO-II a également été appliqué au tunnel du Brenner. Ce projet de tunnel ferroviaire à travers les Alpes devait passer sous le col du Brenner pour relier l'Italie et l'Autriche. La longueur du tunnel devait avoisiner les 55 km de long, ce qui le classait comme deuxième plus long tunnel du monde. Son financement n'est cependant toujours pas assuré en 2011, le coût du projet à supporter par l'Autriche et l'Italie étant particulièrement élevé. Ainsi, à l'aide d'un réseau simplifié, MOLINO a servi à y évaluer 4 scénarios d'investissement et de prix différents.

D'autres applications du modèle, comme outil d'analyse de bien-être et d'aspects financiers d'un investissement en transport, incluent l'axe ferroviaire Gdańsk-Varsovie-Brno-Bratislava-Vienne et la liaison Seine-Scheldt par exemple, chacune d'elles est aussi présentée dans Proost, Dunkerley et van der Loo (2007).

Chapitre 2

Application de MOLINO-II au THV entre Québec et Windsor

Cette section s'appuie sur les études réalisées par EPTRQO (1995) et EcoTrain (2010) sur le projet de THV Québec-Windsor. Ces travaux évaluent l'impact économique du projet selon deux scénarios de vitesse (ou technologies représentatives) : 200 km/h (noté F200+) et 300 km/h (noté E300+). Le détail de ces deux scénarios est décrit dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Caractéristiques des deux technologies de train représentatives.

Caractéristique	F200+	E300+
Niveau technologique	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse maximale	200 km/h	300 km/h
Type de traction	Diesel	Électrique
Nombre de voitures attelées	de 6 à 8 pour une rame de 200 m	
Nombre de voitures articulées	de 8 à 10 pour une rame de 200 m	
Capacité pour un voyage	400 voyageurs	

Résumé de la p. 92 à 99 du Livrable 4 d'EcoTrain

Les technologies F200+ et E300+ correspondent aux limites inférieures et supérieures des THV adaptés à ce corridor. La technologie F200+ nécessiterait le recours à des locomotives bimodes (équipées de traction électrique et diesel) sur le tronçon Québec-Montréal. En effet, les études antérieures ont démontré que le coût d'une ventilation adéquate dans le tunnel Mont-Royal en vue de recevoir des locomotives diesel serait prohibitif. Un train pourrait comporter une ou deux rames, selon la capacité requise et la longueur des quais dans les gares. Des systèmes modernes de signalisation ferroviaire, embarqués dans la cabine de conduite plutôt qu'en bordure de la voie, comme dans le cas de signaux classiques, seraient utilisés pour l'exploitation du THV. On a supposé qu'il n'y aurait aucun croisement de voies du THV avec d'autres voies ferrées, avec des routes principales ou secondaires, ou avec des passages de ferme privés. Ainsi, le schéma utilisé dans les études sur le projet de THV Québec-Windsor pour

l'extension des infrastructures routières et ferroviaires est présenté dans la Figure 2.1.

FIGURE 2.1 – Tracés et gares représentatives entre Québec et Windsor

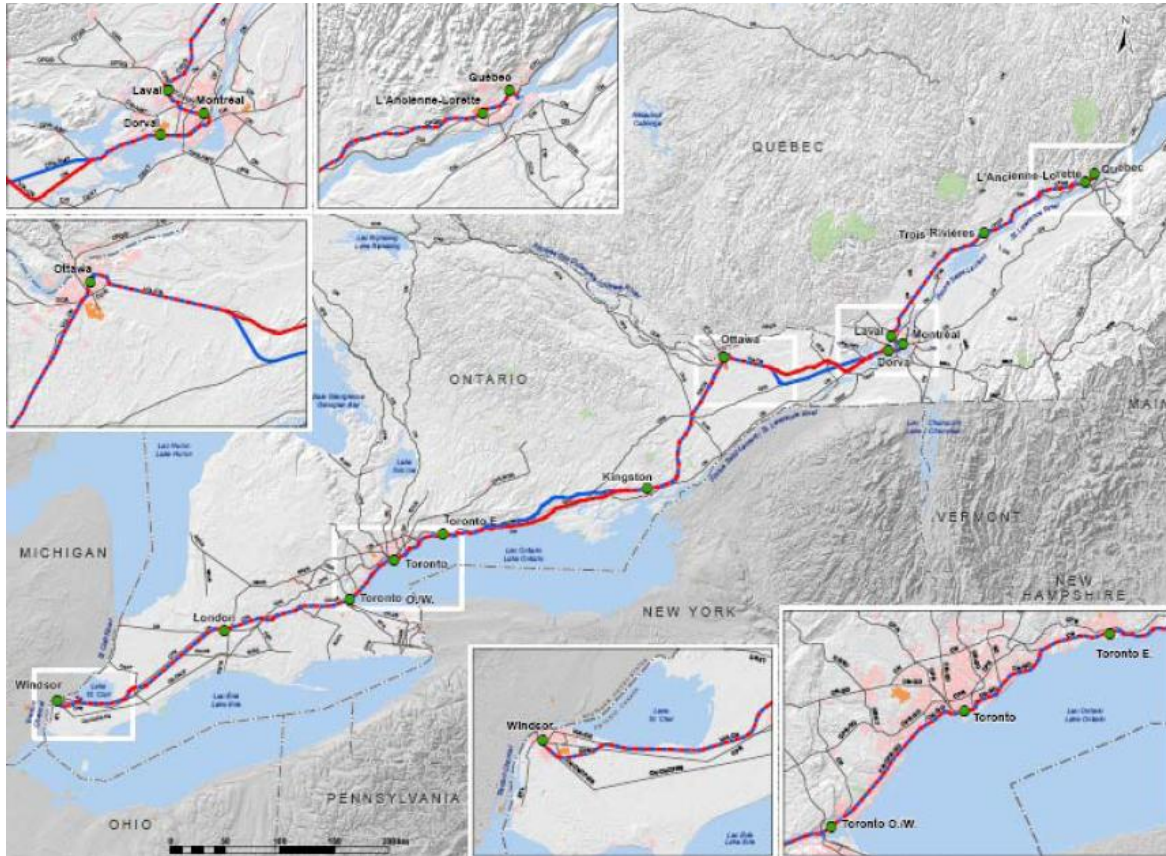


Figure S-1, p. S-6 du Livrable 13 d'EcoTrain

Le réseau ferroviaire envisagé est composé de différents nœuds ou gares (en vert sur la figure 2.1) définis comme les principales gares d'arrêt de l'axe Québec-Windsor. En survolant de droite à gauche (d'est en ouest), les principales villes desservies sont Québec, Montréal, Ottawa, Kingston, Toronto, London et Windsor¹. Chacune de ces villes sera ainsi reliée à ses voisins par différents liens représentant les divers types de transport utilisable. Notamment, on retrouvera un réseau routier (autocar et automobile), ferroviaire et aérien. Notons que l'information présentée ci-dessous est parfois agrégée au niveau des tronçons qui relient Québec, Montréal, Ottawa, Toronto et Windsor. Les quatre principaux tronçons étudiés sont les suivants :

- Québec-Montréal (comprenant la gare du Palais, les gares de L'Anceinne-Lorette, de Trois-Rivières et de Laval, et le dépôt central de maintenance de Québec) ;

1. Rappelons que Windsor se trouve à ~2 km de Detroit, à ~70 km de Ann Arbor et à ~460 km de Chicago. Le corridor Québec-Windsor est donc un axe qui ouvrirait les perspectives d'un corridor ferroviaire canado-américain à haute vitesse entre Québec et Chicago.

- Montréal-Ottawa (comprenant la gare Centrale et les gares de Dorval et d'Ottawa, le centre de commande de l'exploitation (CCE), le bâtiment d'administration centrale, les ateliers d'entretien et l'entrepôt central d'entretien de Montréal) ;
- Ottawa-Toronto (comprenant les gares de Kingston, de Toronto Est et Union, les ateliers d'entretien et l'entrepôt central d'entretien de Toronto) ;
- Toronto-Windsor (comprenant les gares de Toronto Ouest, de London et de Windsor, et l'entrepôt central d'entretien de Windsor).

De plus, un service représentatif correspondant à chacune des technologies représentatives et à leurs tracés respectifs a été mis au point avec les objectifs suivants :

- aux fins de la présente étude, il a été supposé que le THV remplacerait tous les services de Via Rail à l'intérieur du corridor. Pour assurer les services régionaux en dehors du corridor, Via Rail pourrait partager certaines voies avec le THV ;
- le THV offrirait un service réellement concurrentiel par rapport aux autres modes de transport interurbain dans le corridor ;
- le service offert devrait tenir compte de l'expérience pertinente acquise dans d'autres pays dans la prestation de services comparables, modernes et rentables.

L'exploitation hivernale de THV a fait ses preuves au Japon, en Corée, en Finlande et en Suède. [EcoTrain \(2010\)](#) a fait l'hypothèse que les technologies représentatives pourraient être adaptées aux conditions hivernales locales, ce qui ne devrait pas poser de problèmes majeurs dans le corridor Québec-Windsor. À l'étape de l'ingénierie préliminaire, les conditions météorologiques particulières comme les basses températures et les fortes accumulations de neige seraient évaluées pour s'assurer qu'elles n'auraient pas d'impact sur l'exploitation du THV.

Les hypothèses sur les cadences et les horaires sont établies de façon à permettre des temps de transfert inférieurs à 15 minutes. En cas d'écart important entre les volumes de trafic, des trains supplémentaires pourraient être mis en service sur les tronçons les plus fréquentés. En pratique, un exploitant ferroviaire pourrait mettre au point un horaire plus sophistiqué, comportant des trains directs desservant plus d'un tronçon et des trains semi-directs. Afin d'assurer la compétitivité du THV, une fréquence minimale moyenne de 12 départs de trains par jour à partir de chaque gare a été fixée au début de l'étude d'[EcoTrain \(2010\)](#) (voir le tableau 2.2). Les changements apportés dans les temps de déplacement entre les principales villes du corridor, estimé dans l'étude de l'[EPTRQO \(1995\)](#), sont représentés au tableau 2.3.

Les services représentatifs à bord offerts aux voyageurs en THV devraient normalement comporter : des repas servis sur place (service similaire à celui des sociétés aériennes et de Via Rail) ou dans une voiture-restaurant, selon la durée du parcours, pour les voyageurs de première classe ; des collations offertes à partir d'un chariot de service aux voyageurs de classe Écono-

TABLE 2.2 – Nombre de rames par jour dans chaque direction

Tronçon	Service de Via Rail existant	F200+		E300+	
		2025	2055	2025	2055
Québec/Montréal	4	15	19	19	20
Montréal/Ottawa	6	20	22	20	25
Ottawa/Toronto	5	22	29	25	32
Montréal/Toronto	7	20	22	20	25
Toronto/London	5	13	20	14	20
London/Windsor	4	8	10	8	10

Tableau S-2, p. S-8 du Livrable 13 d'EcoTrain

TABLE 2.3 – Temps de déplacement entre les principales villes du Corridor

Tronçon	Service de Via Rail existant	F200+	E300+
Québec/Montréal	3 h 9	1 h 49	1 h 26
Montréal/Ottawa	1 h 55	1 h 11	0 h 57
Ottawa/Toronto	4 h 36	2 h 25	1 h 50
Montréal/Toronto	5 h 12	3 h 38	2 h 47
Toronto/London	2 h 7	1 h 5	0 h 51
Toronto/Windsor	3 h 59	2 h 12	1 h 33

Tableau S-1, p. S-7 du Livrable 13 d'EcoTrain

mique ; une connexion Internet à chaque place assise ; et dans chaque voiture, des espaces de rangement des bagages (aucun bagage non accompagné dans le THV).

Les autres services représentatifs offerts aux voyageurs des THV comportent habituellement la réservation et l'achat de billets par Internet, par téléphone et dans les gares de départ et des services d'information dans toutes les gares. Les ressources nécessaires pour assurer ces services ont été calculées dans l'estimation des coûts d'exploitation. La gamme réelle des services offerts devrait être améliorée durant la phase de conception et perfectionnée pendant l'exploitation, en fonction des attentes et des besoins exprimés par les voyageurs. (voir p. 87 du Livrable 13 d'EcoTrain)

2.1 Les flux de voyageurs et la demande de services de transport

On distingue en général deux grands groupes de voyageurs selon le motif du déplacement : affaires et loisir (ou autres). Ces deux types de voyageurs possèdent des caractéristiques et des sensibilités au déterminants de la demande qui leur sont propres. Par exemple, un voyageur d'affaires est plus flexible quant aux types de transport qu'il choisit d'utiliser et il est en

général moins sensible au prix. Le tableau 2.4 présente le nombre de voyageurs observés en 2006, incluant tous les différents modes de transports sur les tronçons du réseau Québec-Windsor.

TABLE 2.4 – Les volumes de voyageurs observés au cours de l’année 2006, tous les modes inclus.

Origine	Destination	Voyageur autres	Voyageur d’affaires
Québec	Montréal	4 437 639	3 068 435
Québec	Ottawa	279 885	93 546
Québec	Toronto	141 855	111 712
Québec	London	4 073	2 933
Québec	Windsor	2 049	1 637
Montréal	Ottawa	3 799 839	1 584 043
Montréal	Kingston	264 478	47 573
Montréal	Toronto	1 753 228	1 543 368
Montréal	London	96 647	30 272
Montréal	Windsor	22 732	9 741
Ottawa	Kingston	938 254	269 555
Ottawa	Toronto	2 152 395	1 273 425
Ottawa	London	142 880	54 269
Ottawa	Windsor	74 714	7 007
Kingston	Toronto	2 393 573	444 124
Kingston	London	107 097	18 503
Kingston	Windsor	16 507	2 497
Toronto	London	4 595 461	1 218 418
Toronto	Windsor	1 307 114	295 721

Tableau 5-18, p. 96 du Livrable 7 d’EcoTrain

L’étude d’EcoTrain (2010) donne les parts modales de chaque type de transport (voiture, autocar, train et avion) dans les provinces de Québec et d’Ontario en 2006 (voir le tableau 2.5). Ces parts peuvent se combiner à celles présentées au tableau 2.6 pour ainsi encore désagréger les volumes de trafic. Les heures du matin et de l’après-midi désignent les heures de pointe. Là où une congestion arrive à ralentir la circulation. Les implications liées à la congestion sont explicitées à la section 4.

TABLE 2.5 – Part occupé par chaque type de transport pour chaque type de voyageur.

Transport	Autres	Affaires
Automobile	0.88	0.72
Avion	0.01	0.18
Train	0.05	0.06
Autocar	0.06	0.04

Tableau 5-15, p. 89 du Livrable 7 d’EcoTrain

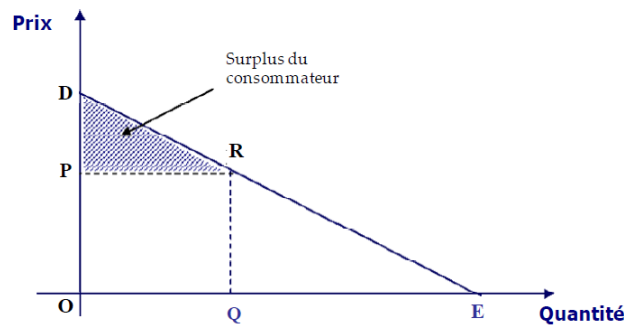
TABLE 2.6 – Répartition du trafic par tranche horaire et mode de transport.

Transport	Matin (7 h - 10 h)	Journée (10 h - 15 h)	Après-mid (15 h - 18 h)	Nuit (18 h - 7 h)
Automobile	0,30	0,40	0,16	0,14
Avion	0,35	0,44	0,01	0,20
Train	0,27	0,39	0,19	0,15
Autocar	0,26	0,41	0,15	0,18

Adaptation de la Figure 8, p. 57 du Livrable 7 d'EcoTrain

Le changement dans le niveau d'utilité des utilisateurs lié à l'introduction d'un moyen de transport ferroviaire plus rapide (le THV) correspond à la variation de surplus du consommateur que génère la nouvelle situation d'équilibre sur le marché des transports. Ce dernier est défini comme étant l'écart entre le prix de marché d'un bien ou d'un service et le prix le plus élevé qu'un consommateur serait disposé à payer pour cet éventail de services de transport. La figure 2.2 fournit une représentation simplifiée de la fonction de demande pour un bien ou un service. La droite DE illustre la quantité de services de transport que les consommateurs achèteraient à divers prix. Pour une quantité demandée d'un niveau OQ (avant l'introduction du THV au Québec par exemple), le prix que les consommateurs sont disposés à payer varie entre les montants représentés par leurs segments $QR = OP$ et OD en raison de la pente négative de la fonction de demande. Autrement dit, certains consommateurs sont prêts à payer un prix plus élevé pour un bien ou un service qui se vend au prix OP , si l'on considère OQ comme la quantité d'équilibre de marché. La mesure du montant du surplus du consommateur correspond à l'aire du triangle PRD .

FIGURE 2.2 – Surplus du consommateur pour un bien ou un service

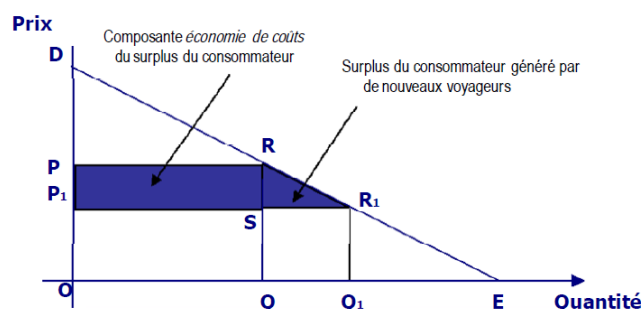


La figure 2.3 fournit une représentation simplifiée de la variation de l'équilibre de marché des services de transport suite à l'accroissement de l'offre (mise en service du THV par exemple) pour une demande fixe². On remarque que le surplus du consommateur s'accroît. Cet accroissement se scinde en deux parties. La première partie constitue la composante économie de

2. La figure omet volontairement la représentation de la courbe d'offre, car celle-ci n'est pas explicitement

coûts pour des voyageurs historiques (avant l'introduction du THV) et elle est représentée par l'aire du rectangle PP_1SR . On quantifie cette première portion en multipliant l'économie réalisée sur le prix (distance PP_1) par le nombre original de voyages observé avant l'introduction du THV (OQ). L'autre composante constitue le surplus du consommateur des nouveaux passagers qui profitent de la baisse de prix pour voyager, alors qu'ils ne le faisaient pas auparavant. Cette valeur se calcule en multipliant le nombre de nouveaux voyages (QQ_1) par la distance PP_1 , puis en divisant ce chiffre par deux. La valeur de ce second surplus de consommation est représentée sur la figure 2.3 par l'aire du triangle SR_1R .

FIGURE 2.3 – Surplus du consommateur généré par la mise en service du THV



Pour estimer la baisse de prix du voyage suite à l'introduction du THV, EcoTrain a pris en compte les trois éléments suivants :

- La réduction du temps de déplacement pour le voyageur en raison de son passage de Via Rail au THV. L'estimation de cet élément s'appuie sur les données concernant les temps de déplacement et la valeur du temps des voyageurs (par heure) utilisées pour les prévisions de l'achalandage ;
- Une valeur ajoutée pour le voyageur en raison d'un horaire plus pratique. Cette valeur est estimée en multipliant l'augmentation du nombre de départs quotidiens par la valeur d'un départ additionnel.
- La hausse du prix du billet payé par le voyageur qui effectue un de transfert de Via Rail vers le THV.

Pour estimer les effets sur chaque moyen de transport des variations de prix du billet de train suite à l'introduction du THV, EcoTrain (2010, livrable 7, chapitre 6) a utilisé diverses estimations d'élasticité prix croisées.

2.2 Coûts du projet

Aux fins de l'analyse financière, les coûts du projet ont été répartis en trois phases :

modélisée dans notre application. Rappelons que, dans sa version complète, MOLINO-II prend en compte l'offre. De même, des coûts sont calculés également par EcoTrain pour modéliser l'offre de services ferroviaires.

- une période de conception (c.-à-d. la phase précédant la construction) de six ans pour réaliser des activités telles qu’une étude de définition du concept, un avant-projet sommaire, des études techniques détaillées et des évaluations environnementales ;
- une période de quatre ans pour exécuter des travaux de génie civil, de systèmes de rail, et des travaux topographiques, géotechniques et études hydrologiques ainsi que des achats de terrains et de propriétés, en plus d’une période de construction de quatre ans pour exécuter des activités comme le terrassement, le drainage, la construction de tunnels, de ponts, de gares et de voies, ainsi que l’installation de systèmes de signalisation et de télécommunications, la construction de lignes de transmission, de sous-stations énergétiques et de caténaires pour le système E300 ;
- une période d’exploitation de 30 ans débutant à l’achèvement des travaux de construction et à leur approbation par les autorités compétentes. Les coûts durant la phase d’exploitation comprennent les charges d’exploitation et les coûts de renouvellement liés au remplacement des actifs sur leur cycle de vie.

TABLE 2.7 – Coûts des opérateurs et des propriétaires d’infrastructure pour les différentes technologies. En millions de dollars canadiens de 2009.

		Tronçon			
		Québec Montréal	Montréal Ottawa	Ottawa Toronto	Toronto Windsor
F200+	Coût d’immobilisation	4 911,93	3 350,56	6 064,55	4 600,19
	Coût d’entretien du réseau	58,6	150,4	219,3	63,5
	Frais d’utilisation de l’infrastructure	5,4	3,6	8,0	7,1
	Valeur résiduelle après 30 ans	556,83	379,52	687,52	0
E300+	Coût d’immobilisation	4 872,01	3 474,69	7 585,79	5 367,25
	Coût d’entretien du réseau	68,6	158,2	220,3	73,1
	Frais d’utilisation de l’infrastructure	4,2	2,8	6,3	5,6
	Valeur résiduelle après 30 ans	552,33	393,92	859,98	0

Résumé du Livrable 6-1 et 6-2 d’EcoTrain

Aucun changement n’a été apporté aux coûts estimés par EcoTrain, affichés dans le tableau 2.7, dans nos simulations. Les coûts d’immobilisation comprennent l’acquisition des emprises, le terrassement et drainage, les travaux d’aménagement et de constructions (ponts, tunnels,

gares), l'achat de matériel roulant, etc.³. Les coûts d'entretien du réseau sont payables annuellement qu'à partir de 2025, le moment où le THV devient opérationnel⁴. Ils comprennent l'exploitation du train, les services à la clientèle, les maintenances de l'équipement et de l'infrastructure, des dépenses en gestion et marketing, des assurances, impôts et frais d'utilisation. Ces derniers représentent le transfert entre les opérateurs et les propriétaires d'infrastructures, afin d'acquiescer le droit d'utiliser l'infrastructure. Comme il s'agit de transferts cela n'affecte pas les résultats agrégés, mais est utile pour déterminer la répartition du surplus. L'impôt foncier est une taxe municipale due tous les ans par le propriétaire d'un bien immobilier.

La valeur résiduelle est calculée selon la méthode de capitalisation des flux de trésorerie⁵. Cette méthode applique un facteur de capitalisation de 15 fois les flux de trésorerie annuels normalisés du projet au cours de la dernière année de la période prévisionnelle. Les flux de trésorerie annuels normalisés sont calculés comme étant les recettes après déduction de l'ensemble des coûts d'exploitation et des coûts de renouvellement normalisés. Ces derniers doivent être normalisés en raison de leur irrégularité, car le montant encouru au cours de l'année visée risque de ne pas être représentatif de la dépense moyenne. Pour résoudre ce problème, les coûts de renouvellement liés au projet ont été répartis sur une longue période de manière à obtenir un taux de dépense annuel moyen. Cependant, les valeurs résiduelles restent basées sur des prévisions. La valeur résiduelle est réputée être nulle entre Toronto et Windsor, du fait que la valeur des flux de trésorerie normalisés du projet au cours de la dernière année de la période prévisionnelle y est négative.

Les coûts d'investissement du projet sont évalués, pour l'instant, aux alentours de 20 milliards de dollars canadiens. Pour de plus amples informations, il est possible de consulter les annexes des livrables concernant les coûts d'EcoTrain.

3. Chaque tronçon est détaillé dans l'annexe E à H du livrable 6.1 d'EcoTrain

4. Chaque tronçon est détaillé dans l'annexe J du livrable 6.2 d'EcoTrain

5. La section 11.3.3 du livrable 13 d'EcoTrain concerne la structure du projet et de ces risques inhérents.

Chapitre 3

Méthodologie

3.1 Description détaillée du modèle MOLINO-II

Le modèle économique de de Palma, Proost et van der Loo (2010), appelé MOLINO-II, se caractérise par une intégration relativement simple des infrastructures locales de transport dans un modèle d'équilibre partiel. Nous en faisons ci-dessous un résumé. L'approche en équilibre partiel se justifie du fait que le modèle se concentre sur les équilibres du marché des transports. Le prix des autres biens et services de l'économie, ainsi que les prix des facteurs de production sont exogènes.

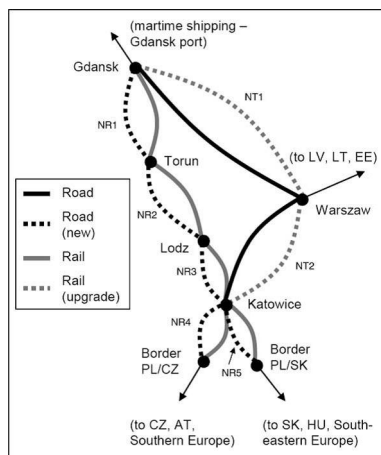
3.1.1 Représentation du réseau de transport

La représentation du réseau a pour objectif d'explicitier à la fois les principales alternatives de transport offertes aux utilisateurs et les projets d'extension, tout en minimisant la quantité d'information à collecter. Cette représentation consiste en une série de chemins composés de liens intermédiaires qui connectent tous les points du réseau de transport étudié. À titre d'exemple, la figure 3.1 montre le schéma utilisé pour l'extension des infrastructures routières et ferroviaires du corridor Gdansk-Vienne/Bratislava en Europe centrale.

Le réseau ci-dessous se concentre sur le transport routier et ferroviaire, mais son extension à d'autres modes de transport (liaisons aériennes) est aisée. Nous n'entrons pas ici sur la formalisation des différents trajets de l'ensemble des couples origine-destination¹. Quatre grands acteurs clés participent à ce réseau : les utilisateurs (individus et firmes), le gouvernement (fédéral et local), les propriétaires des infrastructures et les opérateurs des différents modes de transport. Le modèle permet une certaine multiplicité dans le rôle des agents, de sorte que les gouvernements locaux peuvent être à la fois propriétaires de l'infrastructure et/ou opérateurs de différents modes de transport sur l'ensemble ou une portion du réseau. La distinction

1. Pour l'illustrer, on définit $X_{mi}^{dk}(t)$ (ou $X_{mr}^{dk}(t)$) comme étant le volume total de transport d'un utilisateur de type k voyageant sur d en passant par le lien intermédiaire l (ou parcours r) pendant la sous-période m à l'année t . Ici d représente un couple origine-destination.

FIGURE 3.1 – Exemple d’un réseau de transport



Voir de Palma, Proost et van der Loo (2010).

entre individus et firmes permet la modélisation simultanée du transport de personnes et de marchandises. Le choix des utilisateurs ne repose pas sur une modélisation économétrique en choix discrets (de type logit) entre différents modes de transports, mais bien sûr des fonctions d'utilité et de production CES imbriquées (constant elasticity of substitution)².

3.1.2 Comportement des utilisateurs

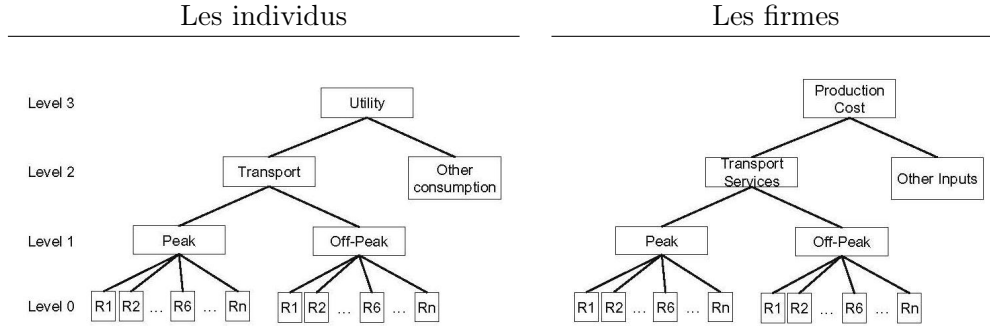
Le comportement des utilisateurs est représenté sous la forme d'arbres de décision comme sur la Figure 3.2. La lecture de ces arbres s'effectue de haut en bas : au fur et à mesure que l'utilisateur-consommateur descend sur les différents embranchements de l'arbre, il précise ses préférences. La demande de transport des passagers et des firmes (niveau 3) est modélisée sous forme agrégée, à l'aide de fonctions d'utilité et de production imbriquée de type CES. L'élasticité de substitution choisie pour chaque niveau de l'arbre déterminera la facilité à substituer les options disponibles à ce niveau ainsi que leur élasticité prix croisée³. Comme il est courant dans ce type de modèle, le passager type répartit son budget entre consommation et déplacement (niveau 2) en fonction du prix généralisé du transport (indice composite), puis il continue le processus de décision jusqu'à ce qu'il choisisse la meilleure combinaison de modes de transport en fonction des alternatives offertes (notées R1, R2, . . . , Rn au niveau 0 des arbres de décision), de leur prix et de ses préférences.

Le prix du service de transport est un prix généralisé pour l'utilisateur de type k au temps t (et sous-période m) sur un ensemble de tronçons $l \in r$ qui composent le parcours r . Ce prix

2. Néanmoins, les hypothèses de choix sont conformes au concept de «Stochastic Choice Equilibrium» généralement adopté dans ce type de problématique ; voir de Palma, Proost, van der Loo, 2010, p. 836.

3. L'élasticité prix croisée se définit comme le rapport entre le pourcentage de variation de la quantité demandée de bien A et le pourcentage de variation du prix d'un bien B. Lorsqu'elle est positive, on parle de biens substitués, lorsqu'elle est négative, on parle de biens complémentaires, sinon on parle de biens indépendants. Définir l'élasticité de substitution revient à fixer l'élasticité prix croisée entre les biens.

FIGURE 3.2 – Les utilisateurs du réseau de transport



est composé de deux termes définis dans l'équation (3.1).

$$P_{mr}^k(t) = \sum_{l \in r} \left[T_{ml}^k(t) + tt_{ml}^k(t) \right], \quad \text{avec} \quad (3.1)$$

$$tt_{ml}^k(t) = \text{VOT}_{ml}^k(t) \frac{d_l(t)}{v_{lk}^{max}(t)} \left[1 + A_l(t) \left(\frac{\sum_{k', \{d;l\}} \mu_{ml}^{k'} X_{ml}^{dk'}(t)}{s_l(t)} \right)^{B_l(t)} \right] \quad (3.2)$$

Le terme monétaire $T_{ml}^k(t)$ est la somme des coûts monétaires liés au voyage sur chaque tronçon l qui compose le parcours r durant la sous-période m . Pour la voiture par exemple, il s'agit du coût de l'essence (taxes incluses), des éventuels péages à payer sur chaque tronçon l du parcours r selon l'heure/la période du voyage m par l'utilisateur de type k (professionnel ou loisir). Le terme $tt_{ml}^k(t)$ repris dans l'équation (3.2) correspond au coût du temps de voyage sur ce même parcours. Ce dernier terme se scinde également en plusieurs composantes. La valeur du temps est généralement mesurée en termes monétaires. Elle correspond au coût d'opportunité, soit la valeur de la meilleure utilisation qui aurait pu être faite de ce temps en d'autres circonstances. Cette valeur correspond en théorie à la valeur qu'un consommateur serait prêt à payer pour augmenter son budget-temps d'une unité à un revenu donné. C'est donc la valeur marginale du temps. Le passager associe une valeur au temps passé dans un mode de transport en fonction aussi du confort, du risque, de sa possibilité de travailler dans le mode de transport choisi, etc. La valeur finale du temps passé dans un certain mode de transport ($tt_{ml}^k(t)$) est influencée par des facteurs de vitesse $v_{lk}^{max}(t)$, de distance $d_l(t)$ à parcourir, de congestion/capacité⁴.

Notons que d'autres types de classification auraient pu être envisagés au niveau 1 des figures 3.2. Par exemple, on pourrait plutôt distinguer les passagers en suivant leur classe de revenu ou leurs motivations de déplacement et classer les firmes suivant le type de marchandise expédiée.

4. On utilise les paramètres $A_l(t)$ et $B_l(t)$ de l'équation 3.2 pour définir le flux de circulation approprié de certains secteurs et $\mu_{ml}^{k'}$ pour déterminer la contribution relative à la congestion de ce passager supplémentaire.

La logique comportementale de l'aspect « demande » du modèle et les composantes des prix ayant été décrites, nous pouvons maintenant formellement présenter les fonctions d'utilité et de production imbriquées. En effet, les entreprises répartissent leur coûts de production selon la même logique que le consommateur (voir l'arbre de décision des firmes dans la figure 3.2). Ces fonctions sont calibrées sur les quatre niveaux de l'arbre en utilisant des flux agrégés de transport et des coûts globaux pour chaque couple origine-destination, selon le type d'utilisateur. Au n^{ieme} niveau, la composante de l'utilité $q_{n,i}$ ($\forall n > 1$) est donnée par :

$$q_{n,i} = \left[\sum_{j \in i} (\alpha_{n-1,j})^{1-\rho_{n,i}} (q_{n-1,j})^{\rho_{n,i}} \right]^{\frac{1}{1-\rho_{n,i}}}, \quad \rho_{n,i} = \frac{\sigma_{n,i} - 1}{\sigma_{n,i}}, \quad (3.3)$$

où $\alpha_{n-1,j} \geq 0$, $0 \leq \sigma_{n,i} \leq \infty$ et $\sum_{j \in i} \alpha_{n-1,j} = 1$. Le paramètre $\sigma_{n,i}$ représente l'élasticité de substitution entre les différents choix à un niveau précis de l'arbre et le paramètre $\alpha_{n-1,j}$ désigne une part d'utilité en provenance du niveau inférieur. La notation $j \in i$ identifie les j éléments pour lesquelles $q_{n-1,j} \in q_{n,i}$. Au niveau n , l'équation (3.3) fournit la i^eme composante de l'utilité à ce niveau, et elle correspond à une somme pondérée de l'utilité retenu à chaque niveau inférieur⁵. On peut associer à chaque quantité $q_{n,i}$ un prix $p_{n,i}$ donné par l'expression (3.4). Cette expression se dérive grâce aux propriétés des fonctions CES.

$$p_{n,i} = \left[\sum_{j \in i} \alpha_{n-1,j} (p_{n-1,j})^{\rho'_{n,i}} \right]^{\frac{1}{\rho'_{n,i}}}, \quad \rho'_{n,i} = \frac{\sigma'_{n,i} - 1}{\sigma'_{n,i}}, \quad \sigma'_{n,i} = \frac{1}{\sigma_{n,i}}, \quad \forall n, i. \quad (3.4)$$

Partant d'un niveau de revenu donné, l'utilisateur répartit son revenu entre du voyage et de la consommation d'autres biens. Ensuite, son budget voyage est réparti aux niveaux inférieurs. Les dépenses sont données par le produit entre le prix et de la quantité qui entre dans l'utilité, comme indiqué dans l'équation (3.5).

$$y_{n,i} = \sum_{j \in i} y_{n-1,j} = p_{n,i} q_{n,i}, \quad \forall n, i. \quad (3.5)$$

La demande finale de services de transport⁶ sur le parcours r (volume total de voyageurs ayant fait les mêmes choix jusqu'au niveau 0) se construit donc sur la base d'une suite de décisions basées sur les prix relatifs à tous les niveaux, et elle est donnée par (3.6).

$$q_{0,i} = \frac{y}{p^3} \prod_{n=1}^3 \alpha_{n-1,i} \left(\frac{p_{n,i}}{p_{n-1,i}} \right)^{\sigma_{n,i}}, \quad \forall i. \quad (3.6)$$

5. Les indices d , k et t sont omis pour alléger la notation.

6. On se réfère ici à la demande agrégée des utilisateurs de type k pendant la période $m \in t$.

3.1.3 Comportement des opérateurs, des propriétaires d'infrastructures et des gouvernements

Tous les participants au réseau de transport sont liés entre eux par des flux monétaires représentés dans la figure 3.3. Par exemple, l'utilisateur final (individu ou firme) s'acquitte non seulement du prix d'un voyage entre l'origine et la destination, mais également d'impôts sur la consommation qu'il verse aux gouvernements (local, provincial ou fédéral). L'opérateur du service de transport supporte les coûts opérationnels de son service, les frais d'utilisation des infrastructures, ainsi que l'impôt sur les bénéfices demandés par différents niveaux gouvernementaux. Les propriétaires d'infrastructure sont également imposés sur leurs bénéfices et doivent assurer les coûts d'entretien et d'investissement pour les infrastructures. Les gouvernements utilisent ces recettes fiscales pour des dépenses en infrastructure de transport. Ils redistribuent une portion de leurs revenus sous la forme de subvention dans un fond d'infrastructure (Figure 3.4). Ce fond commun sert à compenser les charges des opérateurs et des propriétaires d'infrastructures, chacun d'eux peut aussi y apporter sa contribution.

FIGURE 3.3 – L'ensemble des acteurs

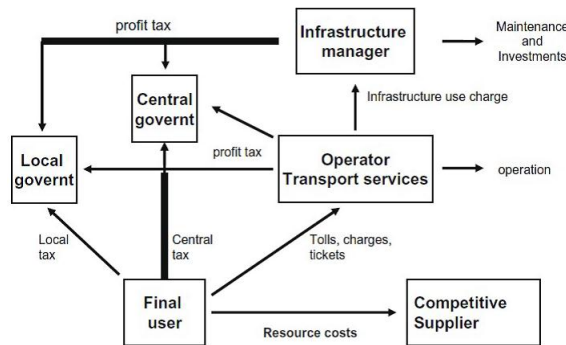
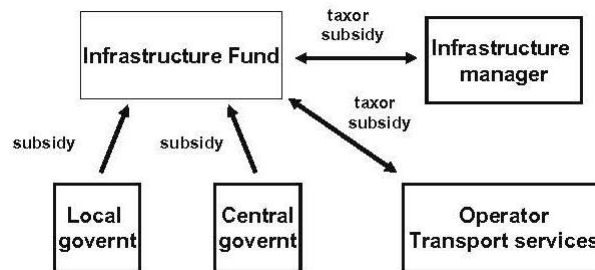


FIGURE 3.4 – Le financement des infrastructures de transport



Ainsi, la différence entre le coût d'opérer (coût opérationnel + compensation au propriétaire) un mode de transport sur une portion du réseau et les revenus encaissés (prix du billet, subventions, etc.) constitue le profit des opérateurs (3.7). La différence entre les coûts d'infrastructures (coût d'investissement et d'entretien) et les recettes provenant des subventions, de

la compensation versée par les opérateurs et d'une valeur résiduelle⁷ composent le profit des propriétaires d'infrastructures (3.8). À noter que les paramètres exogènes θ_l^{or} et θ_l^{inf} déterminent l'efficacité de l'agent selon l'organisation du marché dans lequel il déploie son activité. Une valeur de 1 se réfère à une efficacité comparable à celle du marché.

$$\Pi_l^{or} = \text{Tollrev}_l - \text{INFC}_l - \theta_l^{or} \cdot \text{OPC}_l + \text{sub}_l^{or}, \quad (3.7)$$

$$\Pi_l^{inf} = \text{INFC}_l - \theta_l^{inf} \cdot \text{INVC}_l - \theta_l^{inf} \cdot \text{MC}_l + \text{sub}_l^{inf} + \text{Salvage value} \quad (3.8)$$

Notons que chaque nœud du réseau de transport de la figure 3.1 tombe sous la juridiction d'autorités gouvernementales locales et nationale⁸. Chaque autorité publique compétente peut instaurer des taxes ou péages sur les liens intermédiaires. La fonction objectif de chaque gouvernement est représentée par une fonction de bien-être social qui est une somme pondérée des bénéfices des acteurs du modèle. Si le bien-être de tous les participants reçoit un poids équivalent, on obtient le total des coûts et des bénéfices traditionnellement utilisés dans les analyses coût-bénéfice. Dans le cas contraire, on a une approche politique de notre économie puisque la fonction objectif traduira le poids de différents électeurs ou groupe de pression, comme dans un modèle d'agence commune.

3.1.4 La fonction de bien-être social

La fonction de bien-être social (3.9) décrit les facteurs économiques qui influencent, positivement ou négativement, la qualité de vie de la société. Elle est une somme pondérée de plusieurs termes qui capturent la contribution au bien-être de chaque membre de la société :

$$\begin{aligned} \text{SWF} = & \sum_{k \in p} w^k U^k - \sum_{k \in f} w^k PC^k + f_C(w^k) \Gamma_C \text{Tax}_{cen} + f_L(w^k) \Gamma_L \text{Tax}_{ioc} \quad (3.9) \\ & + \sum_l f_l^{or}(w^k) \Pi_l^{or} + \sum_l f_l^{inf}(w^k) \Pi_l^{inf} - w^{\text{ext}} \text{EXTC} + \text{Fund}. \end{aligned}$$

Dans l'équation (3.9), U^k dénote l'utilité de l'utilisateur de type k , PC^k représente les coûts de production d'une firme de type k , w^k exprime leur importance relative accordé par le preneur de décision aux intérêts des différents types d'individus et de firmes. Les troisième et quatrième termes de l'équation (3.9) désignent le total des revenus de taxes collecté par les gouvernements central (C) et local (L). Chaque acteur public se voit associer deux poids Γ_C ou Γ_L , le coût marginal des fonds publics et une fonction de distribution de poids social $f_C(w^k)$ ou $f_L(w^k)$. Ces fonctions de distribution traduisent les revenus de taxation en changement d'utilité pour différents groupes de revenu liés aux entreprises. Toujours dans l'équation (3.9), les cinquième et sixième termes capturent l'impact du profit des opérateurs et des gestionnaires de l'infrastructure sur le bien-être social. Le septième terme capture l'effet des coûts externes

7. Valeur à laquelle l'infrastructure pourrait être revendue après la dépréciation.

8. Dans le contexte canadien, il s'agit d'un gouvernement provincial et fédéral.

autre que la congestion, puisque celle-ci est déjà comptabilisée dans le temps de déplacement. Enfin, le dernier terme est le compte net du fond d'infrastructure. Cette mesure globale de bien-être - somme de tous les termes de l'équation (3.9) - permet de mesurer l'impact de différentes politiques économiques en termes de bien-être. L'utilisation de poids uniforme pour les différentes composantes revient à considérer une simple analyse coût-bénéfice. Le planificateur social peut changer ces poids en fonction de ses objectifs.

3.2 Éléments additionnels

Notre application ajoute au réseau un nouveau mode de transport : le transport aérien. Il s'agit de modéliser la concurrence train-route-avion. Dans notre application, le transport routier inclut deux modes de transport : l'automobile (privé) et l'autocar (public). L'intérêt de l'extension au secteur aérien est de pouvoir représenter davantage le choix du voyageur sur ce corridor, qui comporte un aéroport pour chacune des villes. Ainsi, il sera important d'ajouter les équations pertinentes pour ce type d'opérateur.

Les fonctions de coûts des opérateurs n'étant pas estimées dans notre application, les opérateurs n'ajusteront pas leur offre suite à la maximisation du profit, ou d'un quelconque autre mécanisme d'ajustement. Les chocs simulés n'affecteront que la demande, qui s'adaptera aux nouvelles conditions de marché.

Chapitre 4

Données

Notre application de MOLINO-II utilise les flux de passagers fournis par l'étude [EcoTrain \(2010\)](#). Cette analyse coût-bénéfice catégorise les données de manière particulièrement pertinente pour notre contexte (ex. : voyageur d'affaire *vs* avec autres motifs, heures de pointe *vs* creuses, parts modales par tronçon, etc.). Dans MOLINO-II, chaque utilisateur se voit attribuer un type (voyageur d'affaire ou avec autres motifs), un parcours (entre une origine et une destination) réalisé à l'aide d'un (ou d'une combinaison de) moyen(s) de transport et un moment durant lequel le voyage est effectué (heure de pointe *vs* creuse). Nous adaptons les données originales aux besoins du modèle. Le premier pas de la modélisation consiste à définir le réseau. Nous construisons ensuite les catégories de passagers pertinentes pour notre analyse, et effectuons des projections de croissance de population qui devraient se traduire par un accroissement de la demande par tronçon (que nous estimons également sur la base des flux réels de 2006).

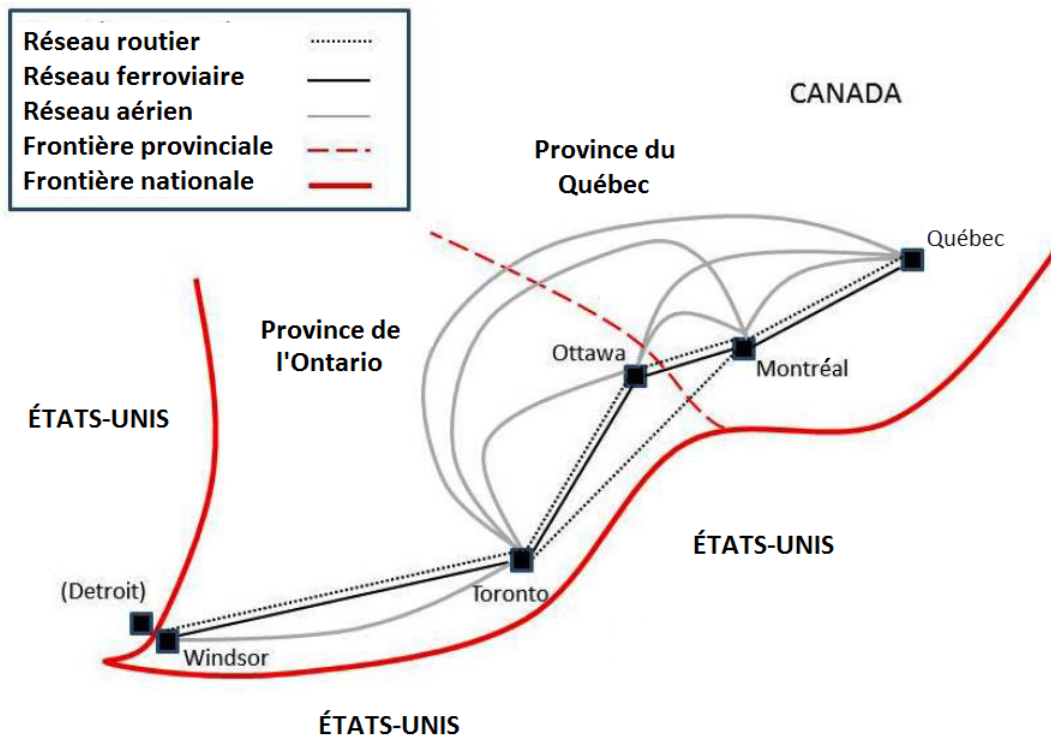
4.1 Réseau et hypothèses sous-jacentes.

Le réseau retenu dans notre étude distingue le transport ferroviaire du transport routier (voiture et autocar) et aérien (avions de ligne), voir la figure 4.1. Il considère les flux du marché dit « primaire » dans le document [EcoTrain \(2010, Livrable 7, p. 118\)](#), soit les villes de Québec, Montréal, Ottawa, Toronto et Windsor. Par rapport au marché primaire d'EcoTrain : le trafic associé à London est considéré comme celui de Windsor ; le trafic associé aux tronçons reliant Kingston à Ottawa ou Montréal a été transféré aux tronçons reliant Toronto à Ottawa ou à Montréal ; le trafic sur les tronçons reliant Kingston à Toronto ou à Windsor a été assigné aux villes voisines, soit à Montréal ou à Ottawa¹. On constate dans la Figure 4.1 que l'on peut se déplacer entre certains couples origine-destination de manière directe ou indirecte.

1. Cette assignation s'est faite en fonction des importances relatives de circulation sur les tronçons adjacents. Par exemple, le tronçon Kingston-Toronto est remplacé à 40,6 % par le tronçon Montréal-Toronto et à 59,4 % par le tronçon Ottawa-Toronto, parce que le tronçon Montréal-Kingston représentait 40,6 % des voyages impliquant Kingston et que le reste était attribuable au tronçon Ottawa-Kingston.

Concentrons-nous sur le trajet Montréal-Toronto à titre d'exemple. Par la route (voiture ou autocar), le trajet peut se faire en empruntant ou en évitant Ottawa. En train, une escale à Ottawa est obligatoire. En avion, ce trajet offre un vol direct et de nombreuses combinaisons indirectes (avec des escales à Québec, Montréal et Ottawa).

FIGURE 4.1 – Réseau représentatif du transport entre Québec et Windsor



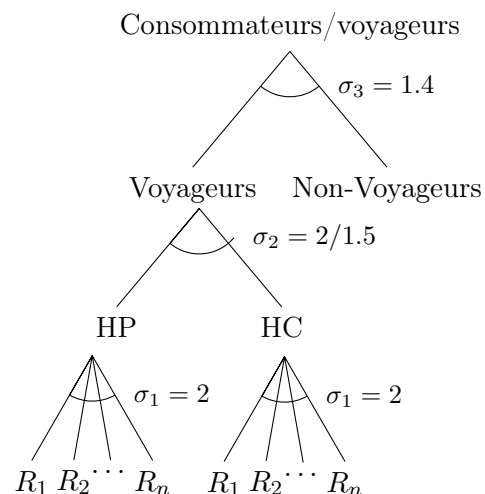
MOLINO-II permet théoriquement de considérer toutes les combinaisons possibles ou réalisables de modes de transport. Pour éviter un trop grand nombre de combinaisons (qui seraient rarement utilisées par le voyageur) et pour garder un modèle de taille raisonnable pour la simulation, nous avons procédé à cinq hypothèses simplificatrices sur l'inter-modalité. Primo, lorsque l'utilisateur décide de partir en voiture, il ne pourra changer de mode de transport. Nous partons de l'idée que le voyageur qui privilégie un mode de transport privé l'utilisera jusqu'à sa destination finale. Si la voiture n'est pas utilisée au point de départ, elle ne sera plus utilisée ultérieurement. Secundo, nous faisons l'hypothèse que l'automobiliste prend le trajet le plus court possible, car dans notre réseau, cette hypothèse est réaliste². Tertio, aucun voyageur ne quitte un mode de transport pour y revenir ultérieurement. Donc, si l'autocar a été utilisé au départ du tronçon Québec-Windsor pour se rendre par exemple à Montréal et y prendre l'avion pour Toronto, le voyageur n'effectuera pas le tronçon Toronto-Windsor en autocar,

2. En l'occurrence, cela revient à exclure le passage par Ottawa pour les automobilistes qui se rendent par exemple de Québec à Toronto, de Montréal à Toronto, ou encore de Toronto à Montréal/Québec.

mais en train ou en avion. De même, cette hypothèse exclut la combinaison « avion - train - avion ». Ceci est quelque peu restrictif, mais réduit substantiellement et de manière assez réaliste la multimodalité, qui est généralement dissuasive pour le voyageur. Tertio, le train et l'autocar ne peuvent être combinés sur les tronçons qui offrent les deux moyens de transport. Nous partons du principe que les distances interurbaines sont grandes et que par conséquent, celui qui choisit l'autocar le fait systématiquement au détriment du train (et vice-versa). Nous faisons également l'hypothèse que les voyageurs ne se déplacent pas vers l'aéroport de Québec pour voler vers Ottawa, Montréal ou Toronto, s'ils résident dans l'une de ces trois grandes villes.

La figure 4.2 montre l'arbre de décision que nous adoptons pour le voyageur : une fois le choix du voyage effectué, il décide s'il voyagera aux heures creuses ou de pointe, puis il choisit la combinaison la plus appropriée de modes vers la destination d'intérêt. Ce mode de décision permet de spécifier le degré de substituabilité entre les services de transports disponibles à des heures de pointe (HP) et les heures creuses (HC). Notez que chaque type de voyageur possède son propre arbre de décision. Les sous-sections suivantes décrivent les méthodes utilisées pour déterminer la répartition des voyageurs à tous les niveaux de l'arbre de décision. Nous décrivons aussi les paramètres retenus pour les formes fonctionnelles utilisées.

FIGURE 4.2 – Arbre des décisions d'un utilisateur k sur OD.



4.2 Hypothèses socioéconomiques

Selon EcoTrain (2010, Livrable 13, p. 77), compte tenu du temps nécessaire à la conception et aux études d'ingénierie, à l'évaluation environnementale, à la construction et à la mise en service, la construction du THV sur l'ensemble du réseau s'échelonnerait sur environ 15 ans à partir de l'année de référence 2010. Par la suite, l'analyse de la période d'exploitation porte sur

30 ans. Par conséquent, l'exploitation du THV ne commencerait qu'en 2025 pour « terminer » en 2055. La population aura alors fortement évolué. EcoTrain (2010, Livrable 9, p. 90-95) teste plusieurs modèles économétriques de prévision du trafic de passagers (affaires et autres) pour chaque tronçon du réseau. L'étude privilégie l'utilisation d'un modèle basé uniquement sur la population de l'agglomération d'origine et de destination, et la distance entre les villes (EcoTrain, 2010, Livrable 9, p. 94). Nous avons donc besoin de prévisions pour les populations de chacune de nos villes du réseau pour les années 2025 et 2055. Le Conference Board du Canada fournit l'évolution de population des agglomérations canadiennes³ sur une trentaine d'années jusqu'en 2017. L'extrapolation des populations à partir de leur tendance sur les 30 dernières années⁴ permet d'anticiper leurs niveaux à venir (voir la figure 4.3). Ainsi, on obtient les estimations de populations du tableau 4.1. Les données montrent une croissance annuelle moyenne de la population du Québec et de l'Ontario aux alentours de respectivement 0,7 % et de 1,3 %.

TABLE 4.1 – La population estimée des villes sur le corridor et leurs agglomérations.

Ville	Population 2006	Population 2010	Population 2025	Population 2055
Québec	721 992	750 446	855 895	1 140 247
Montréal	3 672 905	3 849 697	4 563 841	6 796 201
Ottawa	1 164 356	1 232 120	1 434 515	1 819 343
Kingston	157 998	162 179	179 500	216 340
Toronto	5 302 643	5 702 287	7 248 566	9 894 422
London	474 699	490 652	552 019	676 171
Windsor	336 247	331 375	371 804	450 068

Le niveau de population estimé dans le tableau 4.1 peut être utilisé dans les modèles économétriques ci-dessous pour calculer le trafic de passager « affaire » et « autres » sur chaque tronçon AVANT la mise en place du THV (scénario de statu quo représenté au tableau 4.2) :

$$AffairesOD = 51,93 + 1,53(PopO + PopD) - 2,59(DistOD) + e^{1,12(BeetMonOtt)} + e^{1,86(BeetTorLon)}$$

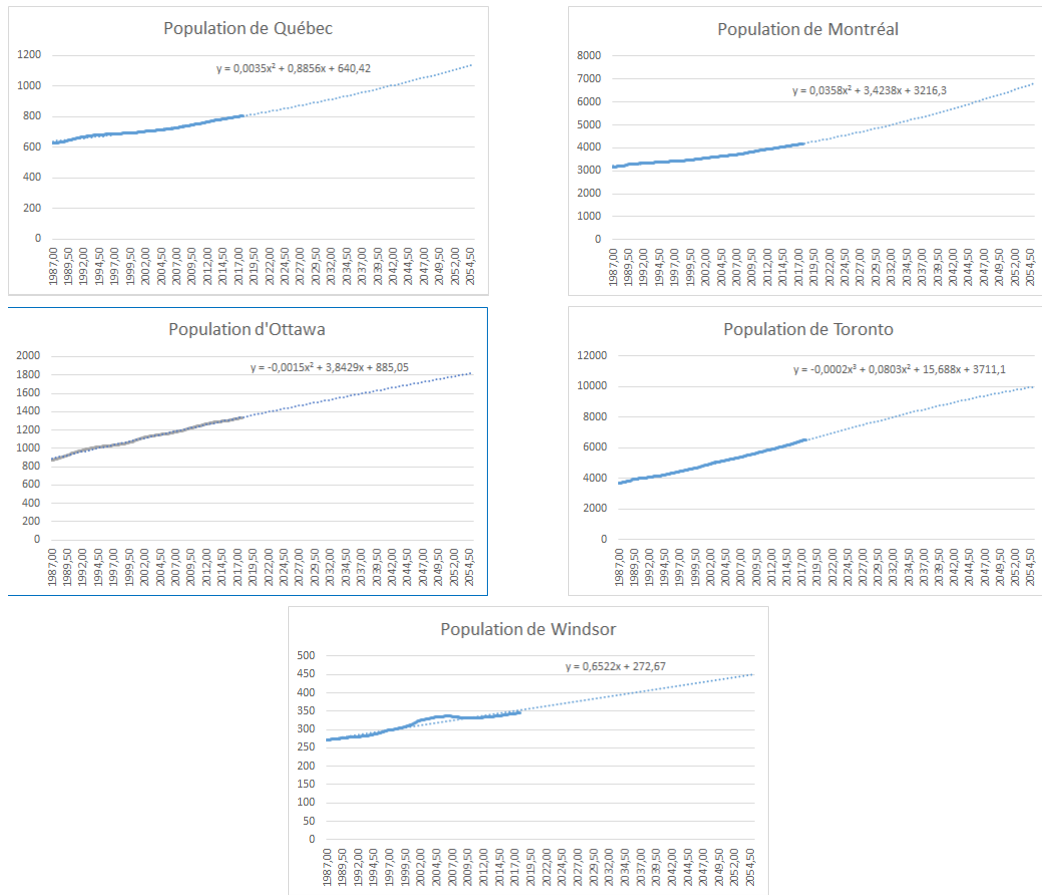
$$AutresOD = 776261495 + 0,99(PopO + PopD) - 3,69(DistOD) + e^{-0,79(FromToOtt)} + e^{-1,02(BeetQueMon)}$$

où $PopO$ est la population d'origine, $PopD$ est celle de destination, $DistOD$ est la distance (en km par route) à parcourir entre les deux villes, et les variables binaires qui identifient les déplacements en provenance ou à destination d'Ottawa ($FromToOtt$), entre Québec et Montréal ($BeetQueMon$), entre Montréal à Ottawa ($BeetMonOtt$) et entre Toronto et London ($BeetTorLon$).

3. En l'occurrence, Québec comprend Lévis, Montréal inclue Laval, Ottawa englobe Gatineau, Toronto et Mississauga-Hamilton forment un tout et Windsor est rattaché à Tecumseh, LaSalle et Lakeshore.

4. La courbe de tendance choisie n'est nulle autre qu'une tendance déterministe (linéaire, quadratique ou cubique) pour chacune des villes. Le polynôme choisi assure une croissance raisonnable de la population des villes.

FIGURE 4.3 – Les niveaux de populations des villes étudiées entre 1987 et 2055.



Comme indiqué au chapitre 2.1, les parts modales pour chaque type de transport et de voyageur en 2006 sont estimées par EcoTrain. Dans le tableau 2.5, l'automobile est le principal mode de transport quel que soit le type de voyageur, alors que l'avion est nettement plus utilisé par les voyageurs d'affaires. Cette différence s'explique en grande partie par le fait que les voyageurs d'affaires se font rembourser les frais de transport par leur employeur en général, ce qui les rend moins sensibles au prix du trajet. Ils ont aussi en général moins de temps à disposition pour entreprendre leur voyage, ils privilégient donc l'avion. En supposant une part modale constante dans le temps, on décompose facilement les chiffres du tableau 4.2 pour extrapoler la demande par mode de transport selon un scénario de statu quo. En ce qui concerne la multimodalité, on se souvient que la voiture n'est pas candidate à la combinaison avec d'autres modes de transport (par hypothèse). Il n'y avait que très peu d'information au sujet de la multimodalité dans l'étude d'EcoTrain, par conséquent, nos choix ont été relativement arbitraires. Nous avons donc réparti de manière raisonnable les différentes combinaisons de modes de transport de manière à respecter les parts modales globales estimées par EcoTrain pour chaque tronçon.

TABLE 4.2 – Le niveau d'utilisation prédit pour chaque parcours.

Tronçon	Voyageurs en 2025	
	Autres	Affaires
Québec/Montréal	5 033 272	4 083 548
Québec/Ottawa	268 129	121 171
Québec/Toronto	104 050	58 447
Québec/Windsor	12 908	3 644
Montréal/Ottawa	5 839 378	4 097 790
Montréal/Toronto	5 657 538	996 609
Montréal/Windsor	203 269	62 560
Ottawa/Toronto	8 175 993	2 031 263
Ottawa/Windsor	127 287	61 297
Toronto/Windsor	8 921 520	2 660 501

Les volumes obtenus se redivisent en deux sous-catégories : les voyageurs en heure de pointe et les voyageurs en heure creuse. Les heures de pointe comprennent le matin (entre 7 h et 10 h) et l'après-midi (entre 15 h et 18 h). Donc, les heures creuses regroupent la journée (entre 10 h et 15 h) et la totalité de la nuit (entre 18 h et 7 h). Le tableau 2.6 présente les divisions de ces périodes pour les parcours unimodaux. Dans les cas multimodaux, la répartition est faite en utilisant la moyenne des heures de départ des voyages en avion, en train et en autocar.

D'autres désagréments auraient pu être effectués, par exemple sur un critère de saisonnalité qui modifierait les flux de circulations en fonction de la période de l'année. Toutefois, à des fins de concision, seulement les différentes combinaisons modales et le choix de l'heure du voyage seront considérés. L'entièreté des données désagrégées obtenues se retrouve dans un document Excel détaillé.

4.3 Hypothèses techniques : distances, temps de trajet et vitesses par mode de transport

Outre les aspects socioéconomiques, la demande de transport est influencée par les caractéristiques purement techniques (vitesse de déplacement, capacité des différents modes de transport, distance physique entre l'origine et la destination, etc.). Pour ce qui est du réseau routier, Google Maps permet de prévoir les temps de déplacement, ainsi que les distances sur route entre les villes du corridor. Les valeurs obtenues au tableau 4.3 datent du 30 octobre 2013. C'est l'information dont nous avons besoin pour notre modèle. Les automobiles et autocars partageant le même réseau routier, mais la différence de vitesse de déplacement sont relativement importants (arrêts obligatoires de l'autocar). Les caractéristiques techniques des

trains proviennent directement des estimations d'EcoTrain. Le tableau 4.4 combine les informations pour le trajet actuel en train (Via Rail) et celles de l'avion (construit à partir des vols avec le moins d'escales répertoriées sur Google Flights). Dans le tableau 4.5, les deux types de trains à hautes vitesses sont présentés, d'abord la technologie F200+, puis la E300+.

À partir des distances à parcourir et des temps de déplacement compilés dans ces différents tableaux, on peut calculer la vitesse moyenne du transport par tronçon. Chaque tronçon possède aussi une capacité. Il s'agit d'un niveau normal de circulation (par année) servant à définir le niveau de fluidité du secteur. Le concept s'exprime en nombre de passagers par unité de temps. Notons que la congestion est un phénomène qui concerne tous les modes de transport, et non pas seulement l'automobile.

TABLE 4.3 – Caractéristique de l'automobile et de l'autocar sur chaque tronçon.

Tronçon	Distance (km)	Temps (h)	Vitesse (km/h)
Québec/Montréal	251	2 h 35 / 3 h 15	97,16 / 77,23
Québec/Ottawa	441	4 h 12 / 6 h 00	105,00 / 73,50
Québec/Toronto	800	7 h 40 / 13h 00	104,35 / 61,54
Québec/Windsor	1 155	10 h 56 / 20 h 30	105,64 / 56,34
Montréal/Ottawa	200	2 h 5 / 2h 30	96,00 / 80,00
Montréal/Toronto	543	5h 16 / 7h 35	103,10 / 71,60
Montréal/Windsor	898	8h 32 / 13h 30	105,23 / 66,52
Ottawa/Toronto	450	4h 16 / 6h 20	105,47 / 71,05
Ottawa/Windsor	804	7h 32 / 10h 30	106,73 / 76,57
Toronto/Windsor	364	3h 35 / 5h 10	101,58 / 70,45

TABLE 4.4 – Caractéristique du train Via Rail actuel et de l'avion sur chaque tronçon.

Tronçon	Distance (km)	Temps (h)	Vitesse (km/h)
Québec/Montréal	275 / 280	3 h 9 / 0h 51	86,99 / 329,41
Québec/Ottawa	459 / 315	5h 04 / 0h 54	90,38 / 350,00
Québec/Toronto	864 / 639	9h 40 / 1h 18	89,23 / 491,54
Québec/Windsor	1229 / 950	13h 39 / 1h 41	89,56 / 564,36
Montréal/Ottawa	182 / 166	1h 55 / 0h 42	95,95 / 237,14
Montréal/Toronto	589 / 506	6h 31 / 1h 08	90,31 / 446,47
Montréal/Windsor	954 / 836	10h 30 / 1h 32	90,34 / 545,22
Ottawa/Toronto	362 / 354	4h 36 / 0h 56	87,96 / 379,29
Ottawa/Windsor	770 / 682	8h 35 / 1h 21	89,08 / 505,19
Toronto/Windsor	342 / 330	3h 59 / 0h 55	90,38 / 360,00

Finalement, les tarifs des billets des transports publics sont montrés dans le tableau 4.6. Ils proviennent de sources publiques (sites officiels des réseaux de transport, Google, etc.). Par exemple, le site de Via Rail donne des tarifs économiques et d'affaires. Les mêmes classes sont présentes auprès des réseaux aériens et leur prix de billet est accessible à partir de Google

TABLE 4.5 – Caractéristique prévu du train à haute vitesse sur chaque tronçon.

Tronçon	Distance (km)	Temps (h)	Vitesse (km/h)
Québec/Montréal	274,0 / 273,3	1h 49 / 1h 26	150,83 / 190,67
Québec/Ottawa	457,9 / 457,0	3h 00 / 2h 23	152,63 / 191,75
Québec/Toronto	862,5 / 862,9	5h 55 / 4h 13	145,77 / 204,64
Québec/Windsor	1222,5 / 1227,9	8h 07 / 5h 46	150,62 / 212,93
Montréal/Ottawa	183,9 / 183,7	1h 11 / 0h 57	155,41 / 193,37
Montréal/Toronto	588,5 / 589,6	3h 36 / 2h 47	163,47 / 211,83
Montréal/Windsor	948,5 / 954,6	5h 48 / 4h 20	163,53 / 220,29
Ottawa/Toronto	404,6 / 405,9	2h 25 / 1h 50	167,42 / 221,40
Ottawa/Windsor	764,6 / 770,9	4h 37 / 3h 23	165,62 / 227,85
Toronto/Windsor	360,0 / 365,0	2h 12 / 1h 33	163,64 / 235,48

Flights. Les prix de chacun des parcours en autocar sont affichés sur le site de la compagnie Greyhound par exemple. Quelques parcours ne font toutefois aucune distinction de prix entre les différents types de voyageurs. Tous les prix récoltés sont en devise canadienne et représente le tarif minimal disponible pour un minimum d'escales possibles. Les prix liés à l'automobile proviennent du guide de consommation de carburant 2013 du ministère canadien des ressources naturelles. La moyenne de consommation sur une autoroute est de 5,9 L/100 km. Multiplier cette valeur par les distances à parcourir et par le prix d'un litre d'essence nous donne le prix d'utilisation de l'automobile. Le prix du litre d'essence lors du 12 décembre 2013 était de 1,294\$.

TABLE 4.6 – Prix des billets avec taxes entre les divers tronçons pour différents transports.

Tronçon	Classe économique (\$)				Classe affaires (\$)			
	Voiture	Autocar	Train	Avion	Voiture	Autocar	Train	Avion
Québec/Montréal	19,16	56,8	45	259	19,16	56,8	88	1169
Québec/Ottawa	33,67	81,6	115	400	33,67	92,6	201	1600
Québec/Toronto	61,08	134,4	181	500	61,08	151,4	308	2000
Québec/Windsor	88,18	156,6	286	600	88,18	175,6	501	2400
Montréal/Ottawa	15,27	29	34	293	15,27	34	68	1025
Montréal/Toronto	41,46	30	135	400	41,46	64	174	1600
Montréal/Windsor	68,56	87,5	207	500	68,56	93,5	400	2000
Ottawa/Toronto	34,36	64	127	111	34,36	73	194	467
Ottawa/Windsor	61,38	147	188	300	61,38	164	364	1200
Toronto/Windsor	27,79	54	56	241	27,79	62	99	1000

Les coûts d'investissement, d'entretien et autres peuvent être consultés à la section 2.

TABLE 4.7 – Paramètres des fonctions liées à la demande des voyageurs.

Paramètre	Définition	Valeur
A_r	Flux de vitesse d'un lien	0,15
B_r	Flux de vitesse d'un lien	4
μ_{nw}	Place occupée par un voyageur avec autres motifs	1
μ_w	Place occupée par un voyageur d'affaires	1
VOT_{nw}	Valeur du temps d'un voyageur avec autres motifs	22,41
VOT_w	Valeur du temps d'un voyageur d'affaires	75,92
$\sigma_{1.1}, \sigma_{1.2}, \dots, \sigma_{1.k}$	EdS entre deux parcours différents possible	2
$\sigma_{2.nw}$	EdS entre heures de pointe et creuses d'un voyageur avec autres motifs	2
$\sigma_{2.w}$	EdS entre heures de pointe et creuses d'un voyageur d'affaires	1,5
σ_3	EdS entre se déplacer ou non	1,4

EdS signifie élasticité de substitution

4.4 Valeur des paramètres

Afin de compléter les variables reliées à la demande de transport, il nous faut encore présenter les paramètres listés dans le tableau 4.7 pour les voyageurs avec autres motifs (indités nw pour « non-workers ») et les voyageurs d'affaires (indités w pour « workers »). Ces deux types d'utilisateurs possèdent une valorisation différente de leur temps (VOT). EcoTrain (2010, Livrable 7, p. 80) estime ces montants par heure pour 2009 à 75,92 \$ et 22,41 \$ pour respectivement les motifs affaires et les autres motifs de l'accès et la sortie du véhicule.

La fonction de la capacité des liens du réseau est celle développée par The Bureau of Public Roads en 1964 explicité dans Dowling et Skabardonis (2006) , se basant sur l'algorithme de Frank-Wolfe. Elle représente une fonction de congestion utilisée dans le modèle MOLINO-II. Sa représentation simplifiée est la suivante :

$$S_l(V_l) = t_l \left[1 + A_l \left(\frac{v_l}{s_l} \right)^{B_l} \right]$$

$S_l(V_l)$ représente le temps de voyage moyen d'un véhicule sur un lien l ; t_l est le temps de déplacement sans obligation de débit par unité de temps; v_l est le volume de trafic par unité de temps; et s_l est la capacité d'un lien par unité de temps. Le terme $1 + A_l$ est le rapport entre le temps de déplacement par unité de distance pour une capacité pratique donnée à débit nul. Les ingénieurs de BPR ont proposé des valeurs de 0,15 et 4 pour A_l et B_l respectivement, par contre les données à partir desquelles ces valeurs ont été obtenues n'ont pas été montrées dans leur rapport initial. Le volume de trafic est la somme de tous les déplacements par unité de temps. Le paramètre μ permet de différencier les habitudes de déplacement des deux types d'utilisateurs. Lorsqu'un type d'utilisateur contribue davantage au ralentissement des flux de

circulations, la valeur de ce paramètre sera plus élevée. Cette valeur reste approximative.

Finalement, les élasticités de substitution sont celles utilisées par Kilani et collab. (2013) et d'autres projets étudiés avec MOLINO-II. Elles servent à définir la forme des préférences entre deux choix possibles. Une élasticité de substitution forte ($\sigma > 1$) nous rapproche du cas des substituts parfaits, une faible ($\sigma < 1$) de celui des compléments parfaits, et sinon ($\sigma = 1$) on retrouve des préférences du type Cobb-Douglas. Toujours dans le tableau 4.7, on remarque que l'élasticité de substitution entre les heures de pointe et heures creuses est la seule qui se distingue pour les deux types d'utilisateur. Les voyageurs avec autres motifs sont, par conséquent, plus aptes à ajuster leurs heures de voyages que les voyages d'affaires. À partir des élasticités de substitution et des niveaux de déplacements initiaux entre chaque parcours sur un même tronçon, on parvient à construire les parts β_i , seul paramètre manquant dans les fonctions CES, pour un niveau de décision donné. À titre de rappel, la CES implique la relation suivante entre les quantités de transport demandées :

$$X_l^{dk_i} = \left[\left(\frac{PG_l^{dk_i}}{PG_l^{dk_j}} \right) \left(\frac{\beta_i}{1 - \beta_i} \right) \right]^{1/\sigma_k} X_l^{dk_j}, \text{ où } i \neq j.$$

Les indices i et j représentent différents parcours, PG le prix généralisé d'un parcours particulier et le sigma est l'élasticité de substitution constante. Le prix généralisé sert de critère de décision entre chaque pair de choix. Cette relation existe pour toute paire de choix possibles, à tous les niveaux de l'arbre de décision présenté à la figure 4.2. Aucun tableau affichant les β ne sera présenté puisque l'existence de 10 couples origines-destination avec des comparaisons de combinaisons de modes différentes serait immense. Nous nous contentons de montrer les β d'un niveau comportant un nombre plus restreint de choix, par exemple le tableau 4.8. Concrètement, β représente la part budgétaire allouée par l'utilisateur de type k au premier intrant.⁵ On constate dans le tableau 4.8 que les voyageurs d'affaires et les voyageurs pour d'autres motifs allouent tous deux la plus grande part de leur budget de voyage à des déplacements durant les heures de pointe.

TABLE 4.8 – Élasticité des dépenses entre les heures de pointe/creuses construites avec les CES.

Paramètre	QM	QO	QT	QW	MO	MT	MW	OT	OW	TW
$\beta_{2,nw}$	0,943	0,969	0,981	0,992	0,930	0,943	0,979	0,931	0,972	0,846
$\beta_{2,w}$	0,958	0,979	0,988	0,996	0,948	0,958	0,987	0,948	0,981	0,870

Du côté des opérateurs, des propriétaires d'infrastructures et des gouvernements, on retrouve d'autres paramètres dans le tableau 4.9. Un paramètre permet d'identifier l'efficacité de l'opérateur/agent (1 indiquant une efficacité maximale et des valeurs supérieures à 1 dénotent un

5. Le raisonnement derrière est explicité dans l'annexe A de Decaluwé et collab. (2001).

TABLE 4.9 – Paramètres pour les autres agents.

Paramètre	Définition	Valeur
θ_{or}	Paramètre d'efficacité de l'opérateur	1
θ_{inf}	Paramètre d'efficacité du propriétaire d'infrastructure	1
θ_g	Paramètre d'efficacité du gouvernement	1
τ_{que}	Taux de taxation des profits des sociétés québécoises	0.119
τ_{ont}	Taux de taxation des profits des sociétés ontariennes	0.115
τ_{can}	Taux de taxation des profits des sociétés canadiennes	0.15
TVQ	Taxe de vente du Québec	0.09975
TPS	Taxe sur les produits et services	0.05

manque d'efficacité). Les autres paramètres peuvent s'obtenir en visitant les sites de Revenu Québec et de l'Agence du Revenu du Canada. On considérera ici des taux de taxation sur les profits des opérateurs et des propriétaires des infrastructures de l'ordre de 26,9 % ou 26,5 %, selon l'autorité fiscale à laquelle est soumis l'agent⁶ Il y a deux autres taxes qui s'ajoutent au modèle : la taxe sur les produits et services (TPS), qui se calcule au taux de 5 % sur le prix de vente ; et la taxe de vente du Québec (TVQ), qui se calcule au taux de 9,975 % sur le prix de vente excluant la TPS. Au final, on peut consulter les tableaux 4.10 et 4.11 pour identifier les opérateurs et propriétaires des infrastructures. Le propriétaire est généralement l'État. Via Rail Canada est une société de la Couronne fédérale qui assure le transport ferroviaire de personnes au Canada. Cette partie du modèle ne joue aucun rôle stratégique dans notre simulation, raison pour laquelle, nous ne la développons pas outre mesure dans ce travail.

TABLE 4.10 – Les opérateurs principaux sur chaque tronçon.

Transport	QM	MO	OT	TW	MT	QO	QT
Autocar	Orlean Express	Greyhound			—		
Train	Via Rail				—		
Avion	Air Canada, Wesjet Airlines, Porter Airlines						

TABLE 4.11 – Les propriétaires d'infrastructure sur chaque tronçon.

Réseau	QM	MO	OT	TW	MT	QO	QT
Routier	Gouv. du Québec		Gouv. de l'Ontario		Gouv. provinciaux		—
Ferroviaire	Via Rail				—		
Aérien	Gouvernement fédéral du Canada						

6. QM et MO sont sous taxation québécoise, OT et TW sont sous taxation ontarienne.

Chapitre 5

Simulations

Dans tout modèle d'équilibre général calculable, comme celui que nous construisons avec MOLINO-II, la résolution requiert la présence d'autant de variables endogènes que d'équations. Nous commençons par montrer que cette condition est bien respectée, en précisant les variables endogènes ou exogènes du système et en faisant le lien avec les sections antérieures. Deuxièmement, nous simulons un choc exogène : l'instauration d'une technologie ferroviaire plus rapide. Troisièmement, nous étudions le nouvel équilibre obtenu sur les variables endogènes. Finalement, nous effectuons un exercice de sensibilité à certains paramètres clés. Notons que nous faisons l'analyse sur le logiciel GAMS¹.

5.1 Les variables endogènes et exogènes du système MOLINO-II

Les variables du système d'équations sont généralement définies soit par parcours (r), soit par tronçon (l). Un parcours est le chemin entre une origine et une destination finale et il peut inclure plusieurs tronçons. Un utilisateur représentatif de type $k = \{affaires, autres\}$ analyse un ensemble de parcours possible et détermine un ensemble de choix modal optimal, alors que les opérateurs et les propriétaires agissent plutôt par tronçon et maximisent leurs profits. Le processus d'agrégation de l'offre et de la demande permet d'établir les équilibres de marché. On distingue aussi les surplus des utilisateurs (consommateurs) par tronçon, notés avec un U , et l'agrégation de ces surplus pour un parcours, notés SC . Dans les tableaux 5.1 et 5.2, on définit XD_{ml}^{dk} (ou X_{mr}^{dk}) comme étant le volume demandé de transport par l'utilisateur de type k voyageant entre l'origine et la destination d en passant par le lien intermédiaire l (ou une trajectoire r) pendant la sous-période m . La lettre g désignera les différents niveaux de

1. Le système de modélisation algébrique général (GAMS) est un système de modélisation de haut niveau pour la programmation mathématique et l'optimisation. Il se compose d'un compilateur de langage et d'une grande quantité de solveurs de haute performance. Il est parfaitement adapté à de l'optimisation complexe (grand nombre d'équations, fonctions discontinues, etc.). Pour en savoir plus sur le logiciel, consultez son site officiel (www.gams.com) ou encore Decaluwé et collab. (2001).

gouvernement (provinciaux (Québec et Ontario) et fédéral). Le nombre de variables existantes est montré au tableau 5.1. Au total, 3323 variables endogènes apparaissent dans le modèle, et elles seront toutes affectées par les chocs exogènes. Ce grand nombre tient simplement au fait que nous obtenons des quantités de voyages et des prix d'équilibres différents pour chaque tronçon et chaque combinaison de mode retenue. Nous ne reporterons pas l'ensemble de ces variables dans les tableaux des simulations. Nous ne montrerons que les plus pertinentes, de manière agrégée.

TABLE 5.1 – Variables endogènes.

Nombre	Variable	Définition
492	XD_{mr}^{dk}	Demande de transport par parcours.
20	XT^{dk}	Demande de transport total sur le tronçon.
80	DD_{ml}^{dk}	Demande de transport par tronçon.
492	P_{mr}^{dk}	Niveau de prix par parcours.
80	PP_{ml}^{dk}	Niveau de prix par tronçon.
492	T_{mr}^{dk}	Coût du temps par parcours.
492	PG_{mr}^{dk}	Prix généralisé par parcours.
20	PGV^{dk}	Prix généralisé de voyager.
20	$PIOR_l^d$	Profit de l'opérateur du tronçon.
20	$PIINF_l^d$	Profit du propriétaire des infrastructures du tronçon.
30	$PIGOUV^{gd}$	Profit du gouvernement.
492	$TOLL_{mr}^{dk}$	Revenus de péages des opérateurs du tronçon.
80	$TOLLREV_{ml}^{dk}$	Revenus de péages des opérateurs du parcours.
492	U_{mr}^{dk}	Niveau d'utilité du parcours.
10	SC^d	Surplus du consommateur sur le tronçon.
10	BE^d	Bien-être du parcours.
1	BES	Bien-être social.

Passons maintenant aux variables exogènes listées dans le tableau 5.2. Elles sont toutes susceptibles de pouvoir être modifiées pour constituer un choc, qui mènera à un nouvel équilibre de marché. Ces chocs peuvent provenir de politiques publiques, de chocs technologiques ou comme dans le cas présent, d'un projet d'investissement qui modifie des paramètres techniques. Il est important de noter que, à ce stade de développement du modèle et dans toutes les simulations, les subventions faites aux opérateurs et aux propriétaires d'infrastructures ainsi que les transferts entre agents seront nulles. Les profits ne font que s'ajuster aux chocs sans modifier l'offre de transport, qui est exogène. Dans ce contexte, le changement du système ferroviaire de Via Rail (équilibre initial) en un système de THV s'effectue par l'intermédiaire : d'un changement de vitesse maximale de déplacement sur les tronçons, d'un changement de capacité et d'un fort investissement initial de la part des entreprises et de l'État. Ce sont donc ces trois éléments qui sont simultanément modifiés. Les simulations seront toutes basées sur ce même choc, et nous nous concentrerons sur la comparaison d'équilibres initiaux et finaux (sans ajustement multipériode).

TABLE 5.2 – Variables exogènes.

Variable	Définition
POP^{dk}	Nombre de participants potentiels.
XS_{mr}^{dk}	Offre de transport par parcours.
SS_{ml}^{dk}	Offre de transport par tronçon.
D_{mr}^d	Longueur du parcours.
S_{mr}^d	Capacité du parcours.
V_{mr}^d	Vitesse maximale de déplacement sur le parcours.
PB_{mr}^{dk}	Prix du billet par parcours.
$INFC_l^d$	Frais d'utilisation par tronçon.
$INVC_l^d$	Coûts d'investissement totaux par tronçon.
OPC_l^d	Coûts d'opération totaux par tronçon.
MC_l^d	Coûts d'entretien totaux par tronçon.
$SUBOR_l^{gd}$	Subvention aux opérateurs par tronçon.
$SUBINF_l^{gd}$	Subvention aux propriétaires d'infrastructure par tronçon.
$PART_l^d$	Transfert des propriétaires vers les opérateurs par tronçon.
VR_l^d	Valeur résiduelle par tronçon.

Le système d'équations du tableau 5.3 montre les relations existantes entre chacune des variables précédemment définies. Les équations peuvent être classées en catégories. D'abord, 2018 équations expliquent le comportement des utilisateurs et leur utilité. Les équations (5.3.1) et (5.3.3) correspondent respectivement aux équations sur les prix monétaires et les valeurs du temps (3.1) et (3.2) du modèle théorique. On remarque notamment le terme $P_{m,r}^{dk}$, qui correspond l'indice de prix (5.3.14). Ce terme capture les variations du niveau général des prix sur le marché des transports et sa valeur initiale est normalisée à 1. L'équation (5.3.2) est un prix moyen agrégé du service des transports, qui capture les différents prix intervenants à des niveaux inférieurs. Les équations (5.3.4) et (5.3.5) définissent les quantités de voyageurs par rapport aux prix relatifs aux différents niveaux i . Ces équations correspondant aux équations $XD_{m,r}^{dk}$ donnent le nombre de voyageurs aux heures de pointe *versus* heures creuses, XT^{dk} capture les voyageurs *versus* les non-voyageurs. L'équation (5.3.6) est l'utilité agrégée selon la figure 2.3. Les Δ dénotent les différences entre des valeurs finales et initiales, tandis que le terme XDI_{mr}^{dk} représente la demande de transport par parcours à sa valeur initiale. La septième équation (5.3.7) ne fait que sommer tous les surplus obtenus dans l'équation antérieure.

TABLE 5.3 – Système d'équations.

Nombre	<u>Comportement des utilisateurs</u>	
492	$PG_{mr}^{dk} = T_{mr}^{dk} + P_{mr}^{dk} PB_{mr}^{dk}$	(5.3.1)
20	$PGV^{dk} = \frac{\sum_{r,m} PG_{mr}^{dk} XD_{mr}^{dk}}{r \times m}$	(5.3.2)
492	$T_{mr}^{dk} = VOT_{mr}^{dk} \frac{D_{mr}^d}{V_{mr}^d} \left[1 + A_r \left(\frac{\mu_r^{dnw} XD_{mr}^{dnw} + \mu_r^{dw} XD_{mr}^{dw}}{S_{mr}^d} \right)^{B_r} \right]$	(5.3.3)
472	$XD_{mr}^{dk_i} = \left[\left(\frac{PG_{mr}^{dk_i}}{PG_{mr}^{dk_j}} \right) \left(\frac{\beta_i}{1-\beta_i} \right) \right]^{1/\sigma_k} XD_{mr}^{dk_j}$	(5.3.4)
20	$XT^{dk} = \left[\left(PGV^{dk} \right) \left(\frac{\beta}{1-\beta} \right) \right]^{1/\sigma_k} \left(POP^{dk} - XT^{dk} \right)$	(5.3.5)
492	$U_{mr}^{dk} = \left(\Delta PG_{mr}^{dk} \right) XDI_{mr}^{dk} + 0,5 \left(\Delta XD_{mr}^{dk} \right) \left(\Delta PG_{mr}^{dk} \right)$	(5.3.6)
10	$SC^d = \sum_{k,r,m} U_{mr}^{dk}$	(5.3.7)
<hr/>		
2018	<u>Comportement des autres agents</u>	
492	$TOLL_{mr}^{dk} = XD_{mr}^{dk} P_{mr}^{dk} PB_{mr}^{dk}$	(5.3.8)
20	$PIOR_l^d = (1 - TVQ - TPS) TOLLREV_l^d - INFC_l^d - \theta_{or} OPC_l^d + \sum_g SUBOR_l^{gd} + PART_l^d$	(5.3.9)
20	$PIINF_l^d = INFC_l^d - \theta_{inf} \left(INVC_l^d + MC_l^d \right) + \sum_g SUBINF_l^{gd} - PART_l^d + VR_l^d$	(5.3.10)
30	$PIGOUV^{gd} = \sum_r \tau_g \left(PIOR_l^d + PIINF_l^d \right) - SUBOR_l^{gd} - SUBINF_l^{gd} + (TVQ + TPS) TOLLREV_m^{dk}$	(5.3.11)
<hr/>		
562	<u>Transformation des parcours en tronçon</u>	
80	$DD_{ml}^{dk} = \sum_{l \in r} XD_{mr}^{dk}$	(5.3.12)
80	$TOLLREV_{ml}^{dk} = \sum_{l \in r} TOLL_{mr}^{dk}$	(5.3.13)
<hr/>		
160	<u>Équilibre sur le système d'équation</u>	
492	$P_{mr}^{dk} = \frac{XD_{mr}^{dk}}{XS_{mr}^{dk}}$	(5.3.14)
80	$PP_{ml}^{dk} = \frac{DD_{ml}^{dk}}{SS_{ml}^{dk}}$	(5.3.15)
20	$XT^{dk} = \sum_{r,m} XD_{mr}^{dk}$	(5.3.16)
<hr/>		
592	<u>Fonction de bien-être</u>	
10	$BE^d = SC^d \sum_{k,r,m} XD_{mr}^{dk_i} + \sum_l \left(PIOR_l^d + PIINF_l^d \right)$	(5.3.17)
1	$BES^d = \sum_d BE^d$	(5.3.18)
<hr/>		
11		
<hr/>		
3323	TOTAL	

562 équations définissent le comportement des autres agents. L'équation (5.3.8) donne les recettes que les opérateurs tirent directement du service de transport offert. Les neuvième, dixième et onzième équations représentent les différentes composantes du profit des opérateurs, propriétaires d'infrastructure et des gouvernements respectivement. Il s'agit des équations découlant des relations illustrées aux figures 3.3 et 3.4. Ensuite, 160 équations servent à transformer les parcours en tronçon. 592 équations représentent des relations d'équilibre du système. Les équations (5.3.14) et (5.3.15) établissent le niveau des prix lorsque les quantités relatives varient (déséquilibre entre offre et demande de transport). La seizième équation agrège la demande de transports. Les 11 autres sont des fonctions de bien-être. Au total, 3323 équations font donc partie du modèle.

Au final, toutes ces équations forment un système carré avec 3323 variables endogènes, qui conduit à l'existence d'un équilibre final unique.

5.2 Scénarios avec l'instauration de la technologie F200+ et E300+

Dans ce travail, nous simulons la mise en place du THV sur l'axe Québec-Windsor comme un choc qui survient en 2025, date de mise en service de la nouvelle ligne sur l'ensemble du corridor, après avoir réalisé tous les investissements requis². L'ensemble du réseau voit donc le train accroître à la fois sa vitesse et sa capacité. Le tableau 5.4 présente les trois composantes du choc pour la portion entre Québec et Montréal.

Les lignes V, S et INVC du tableau se réfèrent respectivement aux variables exogènes « vitesse de déplacement », « capacité annuelle du mode de transport » et « investissement initial total ». Chacun des parcours est écrit sous forme de code indiquant les différentes possibilités s'offrant au voyageur désirant se rendre de Québec à Montréal³. La première lettre du code indique le moyen de transport utilisé sur le premier tronçon du parcours, donc un code à plus d'une lettre désigne un parcours impliquant plusieurs tronçons. Par exemple, le voyageur dispose de 4 moyens de transports directs pour le trajet Québec-Montréal (T , B , F , C) et 4 combinaisons multimodales (FB , FT , FF , $FF2$). Ces différents choix représentent les 8 parcours retenus pour le couple origine-destination Québec-Montréal. Pour ce parcours relativement simple, il existe 5 possibilités d'utiliser l'avion : en se rendant directement de Québec à Montréal (F), en volant d'abord à Ottawa puis en empruntant l'autocar (FB), le train (FT) ou l'avion (FF) jusqu'à Montréal, ou en prenant l'avion de Québec vers Toronto puis vers Montréal ($FF2$). Les autres colonnes du tableau affichent respectivement la valeur initiale (VI) et finale (VF) de la variable qui produit le choc exogène pour les deux technologies de THV (F200+ et E300+) et la variation en pourcentage (Δ) entre les variables initiales et finales. Par exemple,

2. À des fins de simplification, les simulations ont été exécutées en ignorant les croissances de la population estimées au Chapitre 4. L'intuition derrière les résultats n'est aucunement influencée par cette décision.

3. T=Train, B=Autocar, F=Avion, C=Automobile.

TABLE 5.4 – Chocs sur les variables exogènes entre Québec et Montréal.

Variable		VI	VF F200+	VF E300+	Δ F200+	Δ E300+
V (km/h)	T	86,990	150,493	190,508	73,000	119,000
	B	77,231	77,231	77,231	0	0
	F	329,412	329,412	329,412	0	0
	C	97,160	97,160	97,160	0	0
	FB	151,471	151,471	151,471	0	0
	FT	177,127	239,121	269,233	35,000	52,000
	FF	300,625	300,625	300,625	0	0
	FF2	470,548	470,548	470,548	0	0
S (M passagers/année)	T	0,614	2,303	2,918	275,000	375,000
	B	0,502	0,502	0,502	0	0
	F	0,507	0,507	0,507	0	0
	C	10,582	10,582	10,582	0	0
	FB	0,160	0,160	0,160	0	0
	FT	0,185	0,250	0,250	35,000	35,000
	FF	0,274	0,274	0,274	0	0
	FF2	0,195	0,195	0,195	0	0
INVC (M\$ de 2010) ¹	T	0	4911,930	4872,010	—	—

¹ L'investissement correspond au montant dépensé pour adapter l'ensemble du réseau au THV.

à l'intersection entre la ligne V de la variable vitesse pour le train (T) et la colonne valeur initiale (VI), il est écrit la vitesse moyenne initiale de 86,99 km/h. À l'intersection de cette même ligne avec les colonnes VF F200+ et VF E300+, il est montré que la vitesse moyenne du train passe à 150,493 km/h avec la technologie F200+ et à 190,508 avec la technologie E300+ respectivement. La variation de vitesse est donc de +73 % dans le premier cas, et de +119 % dans le second cas. La mise en place des deux technologies F200+ ou E300+ ne modifie pas la vitesse de l'autocar (77,321 km/h), de l'avion (329,412 km/h) ou de la voiture (97,160 km/h), raison pour laquelle nous retrouvons des zéros dans les colonnes correspondantes aux variations (Δ). Par contre, la combinaison FT gagne en vitesse. La section S (M passagers/année) et INVC (M\$ CAD de 2010) correspondent respectivement à la capacité annuelle de ce mode de transport sur ce parcours et à l'investissement que génèrent les deux technologies. À ce stade, aucune simulation n'est encore entreprise, il s'agit simplement de montrer l'ampleur des chocs et des variables qui seront modifiées par rapport à l'équilibre initial.

Les simulations sont exécutées en ajustant simultanément la vitesse, la capacité et l'investissement comme valeurs finales. Les tableaux 5.5 à 5.7 montrent les résultats obtenus pour l'un des deux types d'utilisateur (les voyageurs non-affaires) sur le parcours Québec-Montréal aux heures creuses lors de l'introduction de la technologie F200+. Nous avons choisi arbitrairement de seulement présenter ce parcours et cette technologie, toute analyse d'un autre parcours, moment de la journée, type d'utilisateur ou de valeurs plus agrégées aurait été également

pertinente. Ces autres résultats sont implicitement calculés par le logiciel, il suffit d'extraire l'information requise. Afin de mesurer la sensibilité du résultat final au paramètre le plus influent (l'élasticité de substitution intermodale), trois différentes valeurs sont testées. La première est celle retenue par Kilani, Proost et van der Loo (2013), soit $\sigma_1 = 2$. La seconde modifie les préférences vers le type Leontieff en fixant $\sigma_1 = 0,5$, rendant donc la substitution entre alternatives de transports moins aisées. Le dernier scénario rend les préférences plus proches des substituts parfaits, avec $\sigma_1 = 8$.

Les résultats de l'augmentation exogène de la vitesse moyenne et de la capacité pour les trois scénarios d'élasticité de substitution retenus figurent dans les tableaux 5.5 à 5.7. Le tableau 5.5 se concentre sur les variables endogènes liées aux quantités de voyageurs et aux prix. C'est bien au niveau des lignes XD que le nombre de voyageurs utilisant le train augmente fortement et ceci particulièrement lorsque l'élasticité de substitution est élevée : $VF3 (\Delta 3) > VF1 (\Delta 1) > VF2 (\Delta 2)$. Également, le nombre de voyageurs combinant l'avion et le train (FT) s'accroît (de 1,392 % à 1,965 % selon l'élasticité de substitution). Ces dernières variations se répercutent, dans les mêmes proportions, sur le niveau de prix d'utilisation du transport (hypothèse posé précédemment). Le niveau de prix du billet de train augmente fortement alors que la plupart des niveaux de prix des autres moyens de transport diminuent légèrement dans le scénario de substituabilité (intersection entre les lignes P et les colonnes VF1 ($\Delta 2$) et VF3 ($\Delta 3$)) et ils augmentent sous le scénario de complémentarité (intersection entre les lignes P et la colonne VF2 ($\Delta 2$)). Par contre, le coût du temps passé dans les moyens de transport diminue pour la plupart des moyens de transport (lignes T en dessous de P). Ce qui conduit à une baisse du prix généralisé de la plupart des moyens de transport (lignes PG du tableau 5.7). À titre d'exemple, le prix généralisé du transport en train baisse de 6 et 20 %, selon le scénario de substituabilité retenu.

En d'autres mots, la dynamique du modèle dit que la diminution du prix généralisé des parcours du train augmente la quantité de voyageurs de ces parcours au détriment des autres parcours. Ainsi, le niveau de prix du billet de train augmente et l'achalandage de ce réseau s'intensifie. Au final, ces deux effets renvoient le prix généralisé à la hausse. Évidemment cette hausse se veut inférieure à la diminution initiale du prix généralisé. Du côté des autres tronçons, ceux n'impliquant pas le train, se voit réduire leur achalandage. Ainsi, les parcours n'impliquant pas le train se retrouve aussi avec un prix généralisé à la baisse. Somme tout, toujours dans le tableau 5.5, il est montré que le prix généralisé des voyages (PGV) diminue entre 0,147 % et 0,666 %. Ce qui justifie la ligne XT qui montre que le nombre total de voyage (tout type confondu) entre Québec et Montréal passe de 5,033 millions à un volume compris entre 5,044 et 5,081 millions selon l'élasticité de substitution retenue. Le nombre de voyageurs est d'autant plus élevé que la substitution entre moyens de transport est faible. La légère augmentation signifie que peu d'individu changerait leurs habitudes entre les dépenses en voyage et celles ailleurs suite à l'implantation du THV.

Les lignes *TOLL* du tableau 5.6 montrent que ce sont essentiellement les recettes liées aux voyages en train qui augmentent et les profits des opérateurs de train (lignes PIOR) qui s'accroissent. Ces résultats sont à prendre avec précaution, car la composante des profits des acteurs est modélisée de manière très partielle puisqu'ils ne possèdent aucun mécanisme décisionnel. Ce sont les propriétaires des infrastructures ferroviaires qui subissent les plus grandes pertes (lignes PIINF) et les gouvernements québécois et canadien qui subissent les pertes les plus importantes. Les propriétaires des infrastructures ferroviaires supportent l'entièreté des charges du projet. Alors, le gouvernement local (ici le gouvernement du Québec) et celui fédéral perdront, la part dédiée à ces charges, aussi de leurs revenus.

Le tableau 5.7 est d'un intérêt limité, car les niveaux d'utilité et de bien-être ne prennent correctement en compte ni les coûts des opérateurs, ni ceux des propriétaires d'infrastructures. Malgré tout, les résultats indiquent qu'une grande substituabilité ou complémentarité n'est pas favorable au niveau du bien-être sur le tronçon Québec-Montréal. En effet, la ligne BE affiche : $VF1 (\Delta 1) > VF2 (\Delta 2) > VF3 (\Delta 3)$.

Pour résumer, comme l'on pouvait s'y attendre, ces simulations montrent que l'accroissement de la cadence des trains et de leur vitesse sur le tronçon Québec-Montréal, avec la technologie de haute vitesse la moins onéreuse, conduirait à un léger accroissement du nombre de voyages, à une augmentation du prix des différents moyens de transport, mais à une baisse du prix généralisé d'équilibre. Cette baisse du prix généralisé trouve essentiellement sa source dans la réduction du coût du temps passé à voyager que génère l'accroissement de vitesse et des cadences du train. Il y a également un transfert de voyageurs empruntant l'autocar, la voiture et l'avion vers le train (sous l'hypothèse de substituabilité entre les différents modes de transport). Notons que notre analyse s'est concentrée sur les voyageurs non professionnels. Ces premiers résultats sont donc cohérents et nous inviteraient à poursuivre l'effort de modélisation. On se gardera toutefois de tirer des conclusions sur la viabilité du THV Québec-Windsor à ce stade de développement du modèle.

TABLE 5.5 – Résultats des simulations pour les voyageurs non-affaires sur le parcours QM lors des heures creuses.

Variable		VI	VF1 ($\sigma_1 = 2$)	VF2 ($\sigma_1 = 0.5$)	VF3 ($\sigma_1 = 8$)	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$
XD	T	0,165	0,217	0,186	0,248	31,384	12,797	50,422
	B	0,138	0,136	0,138	0,134	-1,122	0,258	-2,409
	F	0,026	0,026	0,026	0,026	-0,741	0,215	-1,300
	C	2,392	2,358	2,398	2,306	-1,403	0,280	-3,602
	FB	0,005	0,005	0,005	0,005	-0,786	0,221	-1,409
	FT	0,006	0,006	0,006	0,006	1,666	1,392	1,965
	FF	0,002	0,002	0,002	0,002	-0,731	0,213	-1,277
	FF2	0,001	0,001	0,001	0,001	-0,735	0,214	-1,286
P	T	1,000	1,314	1,128	1,504	31,384	12,797	50,422
	B	1,000	0,989	1,003	0,976	-1,122	0,258	-2,409
	F	1,000	0,993	1,002	0,987	-0,741	0,215	-1,300
	C	1,000	0,986	1,003	0,964	-1,403	0,280	-3,602
	FB	1,000	0,992	1,002	0,986	-0,786	0,221	-1,409
	FT	1,000	1,017	1,014	1,020	1,666	1,392	1,965
	FF	1,000	0,993	1,002	0,987	-0,731	0,213	-1,277
	FF2	1,000	0,993	1,002	0,987	-0,735	0,214	-1,286
T	T	70,765	40,803	40,802	40,805	-42,339	-42,341	-42,337
	B	73,094	73,083	73,096	73,070	-0,015	0,003	-0,033
	F	19,143	19,141	19,143	19,140	-0,009	0,000	-0,015
	C	58,039	58,032	58,040	58,020	-0,012	0,002	-0,034
	FB	76,487	76,481	76,487	76,477	-0,007	0,000	-0,012
	FT	63,363	46,814	46,812	46,815	-26,118	-26,120	-26,116
	FF	36,034	36,031	36,034	36,029	-0,008	0,000	-0,014
	FF2	54,802	54,797	54,802	54,794	-0,008	0,000	-0,014
PG	T	115,765	99,926	91,561	108,495	-13,681	-20,907	-6,280
	B	129,894	129,246	130,042	128,502	-0,499	0,114	-1,072
	F	278,143	276,223	278,700	274,774	-0,690	0,200	-1,211
	C	77,202	76,926	77,257	76,492	-0,089	0,071	-0,919
	FB	505,487	502,110	506,435	499,432	-0,668	0,188	-1,198
	FT	497,363	488,046	486,853	489,343	-1,873	-2,113	-1,612
	FF	729,034	723,965	730,513	720,182	-0,695	0,203	-1,214
	FF2	954,802	948,182	956,728	943,219	-0,693	0,202	-1,213
PGV		29,780	29,641	29,581	29,736	-0,466	-0,666	-0,147
XT		5,033	5,066	5,081	5,044	0,656	0,940	0,206

TABLE 5.6 – Résultats des simulations pour les voyageurs non-affaires sur le tronçon QM lors des heures creuses (suite).

Variable		VI	VF1 ($\sigma_1 = 2$)	VF2 ($\sigma_1 = 0.5$)	VF3 ($\sigma_1 = 8$)	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$
TOLL	T	0,027	0,047	0,034	0,061	72,619	27,232	126,267
	B	0,031	0,030	0,031	0,030	-2,232	0,516	-4,759
	F	0,024	0,024	0,025	0,024	-1,476	0,430	-2,583
	C	0,183	0,178	0,184	0,170	-2,786	0,560	-7,075
	FB	0,004	0,004	0,005	0,004	-1,565	0,443	-2,798
	FT	0,005	0,005	0,005	0,005	3,361	2,803	3,969
	FF	0,003	0,003	0,003	0,003	-1,457	0,427	-2,537
	FF2	0,001	0,001	0,001	0,001	-1,465	0,428	-2,556
PIOR	T	21,796	43,181	29,378	60,733	98,112	34,787	178,638
	B	17,915	17,514	17,964	17,114	-2,239	0,240	-4,469
	F	409,876	406,574	409,929	404,661	-0,806	0,013	-1,272
	C	150,479	147,437	150,766	143,516	-2,021	0,191	-4,627
PIINF	T	5,400	-338,435	-338,435	-338,435	-6367,317	-6367,317	-6367,317
	B	3,765	3,765	3,765	3,765	0,000	0,000	0,000
	F	8,400	8,400	8,400	8,400	0,000	0,000	0,000
PIGOUV	Qué.	147,167	109,710	108,134	112,385	-25,452	-26,523	-23,634
	Ont.	73,669	75,387	74,604	76,714	2,331	1,269	4,134
	Can.	129,571	81,053	79,661	83,416	-37,445	-38,520	-35,621

TABLE 5.7 – Résultats des simulations pour les voyageurs non-affaires sur le parcours QM lors des heures creuses (suite et fin).

Variable		VI	VF1 ($\sigma_1 = 2$)	VF2 ($\sigma_1 = 0.5$)	VF3 ($\sigma_1 = 8$)	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$
U	T	0,000	1,716	2,251	0,902	—	—	—
	B	0,000	0,044	-0,010	0,093	—	—	—
	F	0,000	0,025	-0,007	0,044	—	—	—
	C	0,000	0,326	-0,065	0,818	—	—	—
	FB	0,000	0,009	-0,003	0,016	—	—	—
	FT	0,000	0,027	0,030	0,023	—	—	—
	FF	0,000	0,006	-0,002	0,010	—	—	—
	FF2	0,000	0,004	-0,001	0,007	—	—	—
SC	0,000	15,301	12,857	14,750	—	—	—	
BE	617,631	422,133	401,184	285,756	-31,653	-35,045	-53,734	

Conclusion

Ce travail de maîtrise se proposait de poser les premiers jalons d'une analyse coût-bénéfice du projet de THV entre Québec et Windsor dans le cadre du modèle MOLINO-II, une approche de type équilibre général récemment proposé par de Palma et collab. (2010). L'avantage de cette approche est qu'elle permet d'intégrer les aspects stratégiques de la concurrence intermodale et de la tarification publique dans l'analyse coût-bénéfice. Au terme de l'exercice, il serait prématuré de tirer des enseignements tant sur la viabilité économique du projet que sur les conséquences de la concurrence accrue que l'introduction du THV générerait entre les différents moyens de transport desservant ce corridor. Les nombreuses études d'analyse coût-bénéfice traditionnelles réalisées sur le THV Québec-Windsor, en particulier celle effectuée par EcoTrain (2010), fournissent la plupart des ingrédients nécessaires pour modéliser l'aspect demande du projet de MOLINO-II. Considérer quatre moyens de transport et les différentes combinaisons possibles de modes entre les cinq principales villes du corridor conduit à un système d'équations relativement grand (de l'ordre de 3000). Néanmoins, nos premières simulations montrent que l'implémentation sur le logiciel GAMS est tout à fait réalisable et qu'elle conduit à des résultats cohérents et intuitifs. L'introduction de fonctions de coûts pour les opérateurs des différents modes de transport, les propriétaires d'infrastructures ainsi qu'une stratégie claire de financement du projet représentent des éléments essentiels qui permettraient de réaliser des simulations plus pertinentes.

Bibliographie

- Boardman, A., D. Greenberg, A. Vining et D. Weimer. 2011, «Cost-benefit analysis», cahier de recherche, New Jersey.
- California High-Speed Rail Authority. 2012, «California High-Speed Rail Program : Revised 2012 Business Plan», Final report, California High-Speed Rail Authority. Building California's Future.
- Decaluwé, B., A. Martens et L. Savard. 2001, «La politique économique du développement», cahier de recherche, Montréal, Québec.
- Dowling, R. et A. Skabardonis. 2006, «Urban Arterial Speed-Flow Equations For Travel Demand Models», Draft, Dowling Associates, Inc.
- EcoTrain. 2010, «Étude d'actualisation concernant la faisabilité d'un train à haute vitesse dans le corridor Québec-Windsor», Rapport final, Ministères des transport du Québec, de l'Ontario et du Canada.
- EPTRQO. 1995, «Québec-Ontario High Speed Rail Project», Final report, Ministries of Transportation of Québec, Ontario, and Canada.
- Freight Systems Division. 2006, «Long-Range Plan for Amtrak Cascades», Final report, Washington State Department of Transportation. The Resource Group Consultants Inc., Transif Safety Management Inc., HDR Engineering Inc., Berk & Associates Inc., AECOM Consult Inc.
- Kilani, M., S. Proost et S. van der Loo. 2013, «Road pricing and public transport pricing reform in Paris : complements or substitutes?», First draft, KULEuven.
- Lamming, C. 1995, «Le TGV et la traction par turbine à gaz», cahier de recherche 12-13.
- Layard, R. et S. Glaister. 1994, «Cost-benefit analysis», cahier de recherche, New York.
- Ontario/Quebec Rapid Train Task Force. 1991, «Ontario/Quebec Rapid Train», Final report, Ministries of Transportation of Ontario and Quebec.

de Palma, A., S. Proost et S. van der Loo. 2010, «Assessing transport investments - Towards a multi-purpose tool», cahier de recherche 7. Modelling Non-urban Transport Investment and Pricing.

Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc. 2003, «Boston to Montreal High-Speed Rail Planning and Feasibility Study Phase I», Final report, Vermont Agency of Transportation.

Parsons-Clough Harbour. 2004, «High Speed Rail Prefeasibility Study : New York to Montreal», Final report, New York State Department of Transportation.

Proost, S., F. Dunkerley et S. van der Loo. 2007, «Case Studies : How do the infrastructure fund scenarios affect existing TEN-T projects», Deliverable 5, KULeuven.

TEMS. 2008, «Economic Benefits for Development of High Speed Rail Service in the Calgary-Edmonton Corridor», Final report, Government of Alberta.