

Nouveau modèle urbain : vers la mise en place d'un cadre intégré de modélisation du développement urbain et des transports dans la région de Montréal

Rapport final

Professeur adjoint Zachary Patterson, Université Concordia
Département de Géographie, Urbanisme et Environnement

Gabriel Damant-Sirois, Université McGill
École d'Urbanisme

Professeur adjoint Ahmed El-Geneidy, Université McGill
École d'Urbanisme



Août 2014

**La présente étude a été réalisée à la demande et sous le financement
du Ministère des Transports du Québec :**

R693 – Nouveau modèle urbain

Ce projet a été parrainé par le Service de modélisation des systèmes de transport

Les opinions exprimées dans ce rapport n'engagent que la responsabilité des auteurs et ne représentent pas nécessairement les positions du Ministère des Transports du Québec (MTQ) ou du Service de modélisation des systèmes de transport.

Auteurs :

Pr Zachary Patterson

Professeur adjoint

Département de Géographie, Urbanisme et Environnement, Université Concordia

zachary.patterson@concordia.ca

Université Concordia - Département de Géographie, Urbanisme et Environnement

1455, de Maisonneuve O., H 1255-26

Montréal, Québec, Canada H3G 1M8

Gabriel Damant-Sirois

Chercheur

École d'urbanisme, Université McGill et associé chez Damant&Hodder

gdamant-sirois@damanthodder.ca

Damant & Hodder

2288, avenue du Mont-Royal E.

Montréal, Québec, Canada H2H 1K6

Pr Ahmed El-Geneidy

Professeur adjoint

École d'urbanisme, Université McGill

ahmed.elgeneidy@mcgill.ca

Université McGill – École d'urbanisme

815, Sherbrooke O., Salle 400

Montréal, Québec, Canada H3A 0C2

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les étudiants à la maîtrise suivants pour leur contribution à la partie 1 du rapport : Christopher Harding et Javad Mostafi Darbani, étudiants à la maîtrise au Département de Géographie, Urbanisme et Environnement de l'Université Concordia, ont travaillé sur la partie traitant de la localisation des entreprises et des ménages; Antonio Loro, étudiant à la maîtrise à l'École d'Urbanisme de l'Université McGill, a travaillé sur la partie concernant les différents modèles opérationnels intégrés de transport et d'utilisation du sol. La partie traitant de la notion d'accessibilité est largement tirée du travail d'Assumpta Cerdà. Sa contribution à ce rapport a été rédigée lorsqu'elle était étudiante à la maîtrise à l'École d'Urbanisme de l'Université McGill.

L'apport de Pierre Fournier, Hubert Hardy et Brigitte St-Pierre est à souligner pour le complément d'information qu'ils ont fourni au sujet des méthodes actuellement en usage au MTQ. Les auteurs remercient également Simon Saddier, stagiaire au laboratoire TRIP, pour sa participation à la traduction et à la révision de la partie 2 du rapport.

Sommaire

Le projet *Nouveau modèle urbain* a comme objectif d'étudier les modèles et techniques de modélisation et prédiction de la demande intégrant les systèmes de transport et d'utilisation du sol, de les comparer avec les pratiques actuelles du Ministère des Transports du Québec (MTQ) et de proposer des approches permettant d'intégrer les éléments les plus importants de ces modèles dans le système de modélisation du MTQ. Les auteurs se sont particulièrement concentrés, à la demande du MTQ, sur la relation entre l'utilisation du sol et le système de transport, et les modèles utilisant une approche comportementale. Ce rapport, constitué de trois chapitres, présente les résultats de ce projet. Le premier chapitre recense la littérature relative aux modèles théoriques concernant les interactions entre les systèmes de transport et d'utilisation du sol et les mesures d'accessibilité, aux plates-formes logicielles existantes prenant explicitement en compte l'interaction entre les systèmes de transport et d'utilisation du sol afin de prévoir la demande de transport future, et propose un modèle sans compromis ne prenant pas en compte les barrières à sa mise en place telle que l'acquisition de données. Le deuxième chapitre présente les pratiques actuelles du MTQ et décrit ses forces et ses aspects pouvant être améliorés. Le troisième chapitre propose deux approches qui permettent à la fois d'intégrer l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport, et qui sont basées sur une approche comportementale.

Revue de littérature

La revue de littérature permet de faire ressortir les variables déterminantes de la localisation des ménages, et des emplois ou entreprises. Les variables les plus significatives doivent être intégrées dans des modèles de prévision démographique et firmographique afin que les résultats de ce dernier soient représentatifs du comportement sous-jacent aux décisions des ménages et des firmes. Les facteurs les plus importants dans le choix de localisation des ménages sont :

- le prix;
- le type et la taille des résidences ou terrains;
- les caractéristiques des quartiers, et;
- l'accessibilité aux emplois, biens et services.

Les facteurs les plus importants dans le choix de localisation des firmes sont :

- le coût et la taille de l'emplacement, donc l'état du marché foncier;
- l'accès à certaines infrastructures de transport;
- l'accessibilité aux clients et aux employés, et;
- la proximité de certaines entreprises afin de créer une synergie.

La deuxième section de la revue de littérature traite des différentes mesures d'accessibilité utilisées en recherche et dans la pratique. L'accessibilité peut être définie comme étant la facilité d'atteindre des opportunités (p. ex. emplois, biens, services, etc.). L'accessibilité tend à remplacer peu à peu les mesures de mobilité afin d'estimer l'efficacité d'un système de

transport. Les mesures d'accessibilité sont intégrées dans les modèles de simulation de transport et de projection démo- et firmographique puisqu'elles peuvent représenter l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport et ont été démontrées comme déterminantes dans le choix de localisation des emplois et des ménages.

Finalement, la recension de la littérature se termine par une présentation de différents modèles intégrés de transport et l'utilisation du sol. Utilisant les informations obtenues dans la revue de littérature la description d'un modèle ne considérant pas les contraintes liées à son développement, un modèle sans compromis, est faite.

Pratiques actuelles du MTQ

Ce chapitre se base sur des documents rédigés par des professionnels du MTQ. Ces documents présentent les pratiques actuelles du MTQ liées à la modélisation des projections démographiques et du système de transport, ainsi que les forces et faiblesses liées à ces modèles. Le système utilisé actuellement a l'avantage d'avoir été développé spécifiquement pour Montréal, d'être opérationnel depuis de nombreuses années et de donner des résultats pouvant être utilisés à l'interne, mais également par des organisations gouvernementales ou paragouvernementales. En considérant les pratiques actuelles, ainsi que le modèle « sans compromis » décrit dans le premier chapitre, les auteurs de ce rapport ont fait ressortir deux éléments qui pourraient être mieux intégrés dans les pratiques actuelles. Ces deux points ayant servi à énoncer deux orientations utilisées afin de proposer deux approches dans le chapitre trois sont :

- une prise en compte plus explicite des comportements de mobilité sous-jacents à la demande de transport, et ;
- une intégration explicite et avec une base comportementale de l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport.

Intégrer ces deux éléments à l'approche méthodologique actuelle du MTQ pourrait la bonifier en rendant les simulations plus sensibles aux changements *ex ante* dans le réseau de transport et de l'utilisation du sol.

Approches suggérées

En se basant sur la revue de littérature, les pratiques actuelles du MTQ, ainsi que les deux orientations souhaitées, deux approches sont suggérées dans le dernier chapitre du rapport. La première est d'utiliser le logiciel existant UrbanSim. La deuxième approche serait de développer une approche sur mesure pour la région métropolitaine de Montréal.

UrbanSim

UrbanSim est un système de modélisation de la projection démographique et firmographique d'une région basé sur une approche désagrégée et comportementale. Il utilise le ménage et l'emploi comme unité de base et le comportement de ces agents (par rapport à leur localisation dans une région) est déterminé par des modèles comportementaux de choix discrets. L'unité géographique utilisée peut varier entre une version zonale et une version basée sur les parcelles. L'utilisateur peut caractériser les ménages, les emplois, les développements

immobiliers, les unités géographiques, et le cadre général de modélisation. En utilisant des données relatives à l'évolution de la démographie d'une région (p. ex. nombre de ménages) et des emplois (p. ex. nombre d'emplois par secteur d'activités) à des années de référence, UrbanSim, à l'aide de sept modèles, localise les emplois et les ménages à l'intérieur des unités géographiques. Ces informations peuvent ensuite être utilisées dans un modèle de transport basé sur les activités afin de générer la demande de transport. Elles pourraient aussi être utilisées pour faire évoluer les facteurs d'expansion utilisés dans le système actuel de modélisation du MTQ.

UrbanSim possède plusieurs avantages ainsi que des inconvénients. Le plus important avantage est qu'il répond aux deux orientations émises par le MTQ. De plus, c'est un logiciel à source ouverte. Ainsi, le logiciel est gratuit et peut être modifié par l'utilisateur. De plus, un raffinement incrémental du système est possible de deux façons. Premièrement, il est possible de tester le logiciel en l'utilisant dans sa version zonale qui requiert moins de données et de calibration puisqu'elle utilise moins de variables, car les variables demandées sont plus agrégées, et puisqu'il y a beaucoup moins d'unités géographiques pour lesquelles des données sont requises. Deuxièmement, de nombreuses variables pouvant être appliquées aux simulations sont optionnelles. Ainsi, un utilisateur pourrait choisir quelles variables utiliser en fonction de la disponibilité ou la fiabilité des données dans sa région.

L'un des désavantages principaux invoqués dans la littérature et tirés des expériences passées avec l'utilisation d'UrbanSim est la quantité de données requises à son bon fonctionnement. Ceci fait en sorte que la collecte et la préparation des données, si elles sont disponibles, peuvent être fastidieuses et augmentent aussi les ressources requises afin de calibrer le système. De plus, le logiciel est toujours en développement ce qui fait en sorte que les développeurs peuvent arrêter de supporter certains éléments du logiciel. Par exemple, dans le passé, certaines unités géographiques ne sont plus supportées par l'équipe de développement. Aussi, des bogues sont présents dans le logiciel, particulièrement dans ses nouvelles composantes.

Approche sur mesure

Cette approche consiste à développer de manière incrémentale un système de modélisation de la projection démographique et firmographique adapté aux besoins du MTQ et au contexte montréalais. Le système actuellement en place a été bâti sur mesure pour le MTQ, ainsi, il s'agirait de poursuivre, de manière incrémentale, la méthode de développement du modèle utilisé présentement. Les modèles qui s'ajouteraient au fur et à mesure du développement du nouveau système respecteraient les orientations émises précédemment, s'adaptent à la disponibilité des données, et tenteraient de s'approcher le plus possible du modèle sans compromis.

Les avantages de l'approche sur mesure sont nombreux. Les principaux sont présentés ici. Premièrement, puisqu'il serait développé exclusivement pour le MTQ, il correspondrait exactement à ses attentes et besoins. Deuxièmement, cette approche offre une grande flexibilité. En effet, les sous-modèles peuvent prendre la forme souhaitée et le « phasage » de mise en place des modules est flexible puisqu'ils peuvent être intégrés un par un.

Troisièmement, le développement peut être basé sur la disponibilité des données et le contexte montréalais. Finalement, le système pourrait s'adapter plus facilement aux autres villes québécoises.

Les principaux inconvénients proviennent des problèmes potentiels de communication entre les nouveaux modèles et les anciens si une approche incrémentale est prise. Les anciens modèles pourraient devoir être modifiés pour permettre cette communication. Aussi, pour s'assurer qu'un modèle fonctionne bien, il faudrait potentiellement en développer d'autres ce qui pourrait résulter à développer un nouveau UrbanSim à partir de zéro.

Recommandations

Bien qu'UrbanSim soit opérationnel et qu'il soit probablement le meilleur logiciel de modélisation de la projection démographique et firmographique disponible présentement et répondant aux deux orientations émises, les auteurs de ce rapport recommanderait au MTQ de développer un système sur mesure. En effet, cette option correspond davantage à l'approche historique de développement du MTQ et offre beaucoup plus de flexibilité sur l'utilisation de données et sur le rythme d'implémentation, et serait adaptée au contexte montréalais.

Table des matières

Introduction	17
1. Premier chapitre.....	19
1.0 Fondements théoriques des interactions transport et utilisation du sol, et présentation des plates-formes logicielles existantes.....	19
1.1 Recension de la littérature des modèles permettant d’intégrer les concepts choisis pour expliquer la mobilité.....	19
1.1.1 Modèles de localisation des entreprises et des ménages	19
1.1.2 Modèles analytiques fondamentaux.....	20
1.1.3 Mesures d’accessibilité	61
1.1.4 1.1.4 Modèles de transport et modélisation centrée sur les activités.....	73
1.2 Volet 2	76
1.2.1 Modèles intégrés de transport et d’utilisation du sol.....	76
1.2.2 Solution proposée/solution sans compromis	92
1.2.3 Plan de développement	99
1.3 Conclusion.....	101
2. Deuxième chapitre.....	103
2.0 Description et analyse des pratiques actuelles du MTQ.....	103
2.1 L’Enquête Origine-Destination de Montréal.....	103
2.2 Mise en relation avec le premier chapitre.....	104
2.3 Pratiques actuelles du MTQ.....	107
2.3.1 Le modèle de prévision du MTQ	107
2.3.2 Approche du MTQ quant à l’affectation du trafic routier	111
2.3.3 Affectation des déplacements en transport collectif.....	112
2.3.4 Le modèle de transfert modal	113
2.4 Le système de modélisation actuel et les exigences d’un « Nouveau modèle urbain »	

Projet R693 – Nouveau modèle urbain

2.5	Conclusion.....	117
3.	Troisième chapitre	119
3.0	Description et analyse critique des approches suggérées pour le Nouveau modèle urbain	119
3.1	Mise en contexte.....	119
3.2	Modèle sans compromis	121
3.3	Exemple d'un choix de localisation résidentiel d'un ménage	122
3.4	Approches suggérées	125
3.4.1	UrbanSim.....	126
3.4.2	Approche sur mesure.....	141
3.4.3	Synthèse des avantages et des inconvénients des deux approches.....	145
3.5	Proposition de scénarios de développement des modèles.....	147
3.5.1	UrbanSim.....	147
3.5.2	Approche sur mesure.....	147
3.6	Conclusion.....	148
4.	Références	149
	Annexes.....	157
	Annexe 1 : Le modèle de prévision.....	159
	Annexe 2 : Pratiques actuelles, avantages et limites de la modélisation routière au Service de la modélisation des systèmes de transport (SMST).....	170
	Annexe 3 : Pratiques actuelles, avantages et limites de la modélisation transport en commun au SMST	179
	Annexe 4 : Modèle de transfert modal	185
	Annexe 5 : Schéma de modélisation utilisé actuellement	193
	Annexe 6 : Variables utilisées en lien avec les ménages dans UrbanSim.....	194
	Annexe 7 : Variables utilisées en lien avec les emplois dans UrbanSim	195
	Annexe 8 : Sources potentielles des données reliées aux emplois dans UrbanSim.....	196
	Annexe 9 : Variables utilisées en lien avec les ZATs dans UrbanSim.....	197

Projet R693 – Nouveau modèle urbain

Annexe 10 : Variables utilisées en lien avec les parcelles dans UrbanSim	198
Annexe 11 : Variables utilisées en lien avec les édifices dans UrbanSim	199
Annexe 12 : Tableaux des variables utilisées pour les développements dans UrbanSim	200
Annexe 13 : Variables utilisées pour fixer les contraintes aux nouveaux développements dans UrbanSim	202
Annexe 14 : Variables utilisées pour fixer les taux de vacance dans UrbanSim.....	203
Annexe 15 : Variables encadrant les simulations d’UrbanSim	204
Annexe 16 : Variables de base de l’approche sur mesure	205

Liste des tableaux

Tableau 1– Classement des modèles présentés.....	94
Tableau 2- Phénomènes et facteurs clés pour la localisation des emplois/firmes.....	95
Tableau 3- Phénomènes et facteurs clés pour la localisation des ménages (1)	96
Tableau 4- Phénomènes et facteurs clés pour la localisation des ménages (2)	96
Tableau 5– Autres critères	97
Tableau 6- Caractéristique des zones dans la situation initiale	123
Tableau 7- Caractéristique des zones suite à la construction de l’autoroute	123
Tableau 8–Exemple de variables et leur coefficient dans un modèle de localisation des ménages (Patterson & Bierlaire 2010)	125
Tableau 9 – Avantages et inconvénients des approches suggérées	146

Liste des figures

Figure 1 - Illustration du modèle de Lowry (Horowitz, 2004).....	22
Figure 2 - Distribution des activités agricoles autour d’un marché et d’une ville-centre, Grotewold (1959)	27
Figure 3 – Équilibre entre loyer de la terre (R) et localisation (L), Alonso (1960)	29
Figure 4 – Offre des ménages et équilibre du marché selon White (1977); les offres « gagnantes » des ménages à double salaires se trouvent entre U1 et U2 sur la figure de droite.	46
Figure 5 – Facteurs de localisation des ménages, Filion et coll. (1999).....	52
Figure 6 – Structure des choix de mobilité résidentielle et de localisation, Kim et coll. (2005) ...	56
Figure 7 – Causes de déménagement d’après une enquête auprès des ménages migrants de Kitchener, Canada. Filion et coll. (1999).....	60
Figure 8 – Présentation des sous-modèles dans UrbanSim	128
Figure 9– Version simplifiée montrant l’intégration au système actuel des solutions proposées et d’un modèle de transport basé sur les activités	131

Glossaire

Accessibilité – Facilité d’atteindre des opportunités

CMM – Communauté métropolitaine de Montréal

DRAM - *Disaggregated Residential Allocation Model* – Modèle de distribution résidentielle désagrégé

EMPAL - *Employment Allocation model* – Modèle de distribution des emplois

ES – 3 Modèle de projection démographique à microéchelle

FIRE sectors – Secteurs liés aux finances, à l’assurance et à l’immobilier (*Finance, Insurance, Real Estate*)

LIC – Liste des industries et commerces

MAMROT – Ministère des Affaires municipales et de l’Occupation du territoire

MTM – Modèle de transfert modal (en référence au modèle utilisé par le MTQ)

MTQ – Ministère des Transports du Québec

O-D – Origine-Destination

SIC (classification SIC) – *Standard Industrial Classification* – Système de code permettant de classer les différentes industries

SIG – Système d’information géographique

SMSA – *Standard Metropolitan Statistical Areas*

SMST – Service de la modélisation et des systèmes de transport

TMIP – *Travel Model Improvement Program* – Programme d’amélioration des modèles de déplacement

TRANSIMS - *Transportation Analysis and Simulation System* – Système de simulation et d’analyse du transport

Utilisation du sol – Usage effectif des lots au sein d’une agglomération

ZAT – Zone d’analyse de transport (découpage propre au modèle routier Emme/MOTREM utilisé en affectation routière au SMST)

INTRODUCTION

Ce rapport constitue les éléments livrables du contrat de recherche conclu entre le Ministère des Transports du Québec et l'Université Concordia sous le titre « Nouveau modèle urbain : vers la mise en place d'un cadre intégré de modélisation du développement urbain et des transports dans la région de Montréal. »

Les trois chapitres du rapport sont les suivantes :

Chapitre 1

Recension de la littérature des modèles permettant d'intégrer les concepts choisis pour expliquer la mobilité. Cette recension devra comprendre la recension des variables explicatives de la demande de transport, de l'utilisation du sol et des interrelations entre ces composantes.

Recension et évaluation des plateformes logicielles existantes, discussion de leurs avantages et désavantages, recommandations quant à un plan de développement et de mise en œuvre de la solution proposée. Cette recension devra inclure les modèles intégrant la demande en transport (transport en commun et routière) et l'utilisation du sol.

Chapitre 2

Description des pratiques actuelles du MTQ en faisant ressortir les forces et faiblesses de la méthode, des procédures et plateformes actuellement utilisées. Il faudra également mettre en relation les résultats obtenus avec les résultats de la première partie.

Chapitre 3

Conception de l'architecture du nouveau modèle urbain du Ministère des Transports du Québec en identifiant les variables explicatives de la demande de transport, de l'utilisation du sol et des interrelations entre ces composantes. Les pratiques actuelles du MTQ pourront être intégrées si l'opération est possible et pertinente.

Identifier, par constituante, les données requises (sous optique aussi bien « fonctionnement » que « calibration »), celles disponibles dans le contexte montréalais, celles à acquérir et celles à recueillir afin d'alimenter le nouveau modèle.

Objectifs du MTQ - Précision du mandat de recherche

Afin de permettre aux auteurs de livrer le produit final attendu, il a été nécessaire de préciser plusieurs points relatifs aux éléments livrables stipulés par le contrat. Ceci a été fait au cours d'une réunion qui s'est tenue le 19 octobre 2011 dans les bureaux du MTQ sur le boulevard René Lévesque à Montréal. Les précisions formulées au cours de cette rencontre sont les suivantes.

Premièrement, le Volet 1 de cette partie doit inclure une « Recension de la littérature sur les modèles permettant d'intégrer les concepts choisis pour expliquer la mobilité. » Les concepts

retenus après discussion avec le MTQ sont : les modèles de localisation des entreprises/emplois, les modèles de localisation des ménages et les mesures d'accessibilité. De plus, le Volet 1 de la première partie spécifie que « Cette recension devra comprendre la recension des variables explicatives de la demande de transport, de l'utilisation du sol et des interrelations entre ces composantes. » La demande de transport et l'utilisation du sol sont deux sujets sur lesquels il existe une littérature abondante. La définition d'utilisation du sol dans ce rapport réfère à l'utilisation effective du sol sur le terrain plutôt que l'usage réglementaire prescrit. Comme cela est précisé dans la partie suivante, le sujet principal de cette partie est l'utilisation du sol. Néanmoins, les discussions ont aussi porté sur la demande en transport. Elles ont révélé une insatisfaction générale quant à la faible prise en compte des dimensions comportementales dans les techniques de prévision de la demande actuellement utilisées par le MTQ. Une approche explicitement comportementale pourrait prévoir l'impact d'une modification dans l'environnement ou d'un nouveau stimulus sur le comportement d'un ou plusieurs agents individuels. De ce fait, il est souhaitable qu'une approche tenant mieux compte des facteurs comportementaux soit adoptée pour le nouveau modèle urbain. Enfin, il a été clairement précisé que les approches classiques fondées sur les déplacements (par exemple, les modèles en quatre étapes) ne devaient pas être retenues pour le nouveau modèle urbain.

Deuxièmement, le Volet 2 de la première partie prévoit la formulation de « ... recommandations quant à un plan de développement et de mise en œuvre de la solution proposée. » Après discussion avec le MTQ, il a été convenu que la « solution proposée » devrait être comprise dans un premier temps comme étant la « solution sans compromis ». C'est-à-dire que cette solution devrait être le système de modélisation sans compromis selon les exigences du MTQ, sans tenir compte de contraintes telles que la disponibilité des données, par exemple. Les discussions avec le MTQ ont permis d'identifier deux exigences primordiales relatives à ce système de modélisation. Ces deux exigences ont trait à la prévision de la demande de transport à venir. Tout d'abord, le modèle sans compromis doit pouvoir intégrer explicitement les interactions entre système de transport et utilisation du sol. Ensuite, le système de modélisation doit pouvoir prendre en compte les comportements de mobilité, c'est-à-dire les comportements humains à l'origine de la demande de transport.

1. PREMIER CHAPITRE

1.0 Fondements théoriques des interactions transport et utilisation du sol, et présentation des plates-formes logicielles existantes

Le contenu de ce chapitre est organisé comme suit. La première partie traite du Volet 1 et présente une recension de la littérature sur les sujets suivants : les modèles fondamentaux de localisation des entreprises et des ménages, les phénomènes et facteurs observés affectant la localisation des entreprises et des ménages, les concepts et les méthodes ayant trait à l'accessibilité, et – brièvement – la modélisation de la demande de transport centrée sur les activités. La seconde partie traite du Volet 2 et contient trois sous-parties. La première est une recension de la littérature sur les modèles opérationnels intégrés de transport et d'utilisation du sol les plus courants. La deuxième expose les caractéristiques d'un modèle sans compromis et y compare les modèles présentés. La troisième trace les grandes lignes d'un plan de développement d'un modèle sans compromis pour le MTQ. Les principaux résultats de ce chapitre sont résumés dans la dernière partie.

1.1 Recension de la littérature des modèles permettant d'intégrer les concepts choisis pour expliquer la mobilité

Cette partie est structurée pour répondre aux exigences du Volet 1. Son objectif est de présenter la littérature existante sur les modèles de localisation des entreprises et des ménages, ainsi que sur le concept d'accessibilité. La littérature sur la modélisation de la demande de transport centrée sur les activités sera elle aussi brièvement présentée. Pour ce qui est de la localisation des entreprises et des ménages, cette partie étudie les modèles utilisés pour expliquer leur distribution dans un contexte intra-urbain. Une distinction est faite entre les modèles analytiques fondamentaux et les modèles ayant une base empirique, qui utilisent ou contestent les modèles fondamentaux. Enfin, cette partie explore la notion d'accessibilité ainsi que les nombreuses façons dont elle a été conceptualisée et mesurée.

1.1.1 Modèles de localisation des entreprises et des ménages

En règle générale, les choix de localisation des entreprises et des ménages sont compris comme étant deux phénomènes fortement interconnectés et sont donc analysés conjointement. Conformément à cet usage, cette partie présente des modèles traitant à la fois de la localisation des entreprises et des ménages et ne cherche pas à imposer une stricte séparation entre ces deux dimensions. L'abondante littérature sur le sujet de la localisation des entreprises et des ménages peut en revanche être divisée en deux grandes catégories. Dans la première catégorie, on trouve un nombre étonnamment restreint de modèles analytiques fondamentaux – ou paradigmes – ayant influencé l'ensemble de la littérature sur le sujet. La seconde catégorie est composée des travaux ayant tenté de prolonger ou de contester ces modèles fondamentaux en y confrontant les tendances et les dynamiques empiriquement observées dans les systèmes urbains, notamment depuis l'avènement de l'automobile. La première sous-partie traite de la littérature portant sur les modèles analytiques fondamentaux de localisation des entreprises et des ménages. La seconde sous-partie examine les différentes extensions et contestations de ces modèles fondamentaux, issues d'observations empiriques. Bien que les processus de

localisation des entreprises et des ménages soient considérés comme étant fortement interconnectés dans la littérature sur les modèles fondamentaux, il est dans une certaine mesure possible de les distinguer dans la littérature issue de la recherche empirique. Ainsi, la seconde sous-partie est sous-divisée selon ces deux axes (localisation des entreprises et localisation des ménages), afin de rendre compte le plus fidèlement possible de cette distinction.

1.1.2 Modèles analytiques fondamentaux

Bien qu'ils aient progressivement intégré des composantes différentes, les modèles de localisation des entreprises et les modèles de localisation des ménages trouvent leurs racines communes dans les champs d'étude de la géographie et de l'économie urbaine. Les thèmes de la localisation des entreprises et de celle des ménages se recoupent largement puisque « l'approche théorique fondamentale utilisée dans l'étude de la localisation des ménages peut fournir un cadre analytique utile à l'étude de la localisation des emplois » (K. Lee, 1982, p. 267). Chang (2006) propose une classification simple pour comprendre les différentes familles de modèles de localisation. Il divise l'analyse de la forme urbaine en quatre catégories d'approches différentes : les modèles d'interaction spatiale, les modèles de programmation mathématique, les modèles d'offre de loyer, et les modèles d'utilité aléatoire. Cette typologie sera reprise dans ce rapport pour définir trois catégories générales de modèles de localisation des entreprises. Les modèles de programmation mathématique ne seront pas traités ici, car leur objectif est d'optimiser la distribution des entreprises et des ménages dans le système urbain – ce sont des modèles normatifs, et non descriptifs. Bien que les modèles de programmation mathématique soient intéressants pour certaines applications, ils ne sont pas utiles pour comprendre ou prévoir l'évolution des villes. Il convient de noter que de nombreux articles et études traitant des choix de localisation peuvent être classés dans plusieurs des catégories présentées à la fois (interaction spatiale, offre de loyer, utilité aléatoire).

Modèles d'interaction spatiale

Les premiers modèles de simulation des transports et de l'utilisation du sol étaient fortement agrégés et reposaient sur des principes d'interaction spatiale répandus dans les champs de la science régionale et de la géographie quantitative dans les années 1950 et 1960. Bien que de nombreuses versions de ce type de modèle aient été formulées, la plupart reposent sur une variation du modèle gravitationnel. Le modèle gravitationnel est issu de la physique newtonienne, qui pose que la force de gravité augmente proportionnellement à la masse de deux objets dans l'espace, et décroît en fonction du carré de la distance qui les sépare. De la même manière, dans un modèle gravitationnel de déplacements, les déplacements entre zone d'origine et zone de destination augmentent selon la quantité d'activités dans les deux zones et décroît en fonction du carré de l'impédance des déplacements entre les zones. La dérivation du modèle gravitationnel, à partir du principe de maximisation de l'entropie (A. G. Wilson, 1967, 1970), a constitué une étape majeure et un socle important pour la plupart des mécanismes de localisation dans les modèles d'interaction spatiale. Le modèle gravitationnel peut s'exprimer sous la forme générique suivante :

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j \exp(-\beta c_{ij})$$

où T_{ij} représente les déplacements (ou toute autre mesure de l'interaction) entre deux zones, O_i représente le nombre d'origines dans la zone i , D_j représente le nombre de destinations dans la zone j . A_i et B_j sont des facteurs d'équilibre assurant que la somme des origines est égale à la somme des destinations. Le terme exponentiel décrit l'effet d'une interaction décroissante en fonction du coût de déplacement.

Le premier modèle opérationnel de simulation de l'utilisation du sol a été développé par Lowry (1964). Il est connu sous le nom de modèle Metropolis. L'une des applications originales de ce modèle a consisté à prédire les conséquences sur l'activité économique des programmes de renouvellement urbain et d'éradication des bidonvilles dans la région de Pittsburgh, Pennsylvanie. Ce modèle présente une importance considérable, car sa structure a inspiré de nombreux autres modèles adoptant un cadre d'interaction spatiale. Une présentation détaillée de ce modèle et de ses variantes peut être trouvée chez Alan J. Horowitz (2004).

Ce modèle s'inspire de la théorie économique en divisant les emplois d'une région entre les industries primaires et manufacturières et l'industrie des services. On suppose que les industries primaires et manufacturières exportent la majorité de leur production à l'extérieur de leur région, générant ainsi un revenu excédentaire permettant de soutenir l'industrie des services. L'industrie des services (par exemple, la vente au détail) sert alors les ménages et les autres industries de la région. Le modèle considère la population et les emplois dans les industries primaires et manufacturières comme des activités à distribuer dans la région.

La localisation des industries primaires et manufacturières et leur niveau d'emploi sont déterminés de manière exogène. À partir de ces données, les ménages employés dans ces industries sont géographiquement distribués à l'intérieur de la région. Le premier modèle d'interaction spatiale détermine la localisation des ménages employés dans les industries primaires et manufacturières. Ces derniers sont distribués géographiquement selon leur lieu de travail, au moyen d'une fonction de résistance, également utilisée dans l'étape de distribution des déplacements de la plupart des modèles de transport centrés sur les déplacements (Horowitz, 2004) :

$$f(t_{ij}) = \exp(-\beta t_{ij})$$

où $f(t_{ij})$ est un facteur de friction influençant le nombre de travailleurs employés dans la zone i et vivant dans la zone j , t_{ij} est une mesure de la « désutilité » associée au trajet entre deux zones – typiquement exprimée en temps de déplacement – et β représente la « désutilité » marginale par unité de temps. La forme de cette fonction postule implicitement que les travailleurs choisissent de résider proche de leur lieu de travail et que seul un membre par ménage est employé à l'extérieur. Lowry choisit de définir la mesure de la « désutilité » comme la distance à vol d'oiseau entre deux zones. Il utilise cette définition en partie parce qu'il était à l'époque difficile de calculer le coût de déplacement entre deux zones au moyen des modèles de transport existants, mais aussi parce qu'il avait constaté que les distances à vol d'oiseau et les distances par la route étaient fortement corrélées dans la région d'étude (Lowry, 1964). Au moyen de la fonction de résistance décrite ci-dessus, il est possible de calculer le nombre de travailleurs employés en zone i et résidant en zone j – (T_{ij}) – en utilisant une expression

modifiée de la fonction intégrant la valeur de l'attractivité résidentielle de chaque zone résidentielle (w_j) :

$$T_{ij} = \frac{e_i w_j f(t_{ij})}{\sum_j w_j f(t_{ij})}$$

où e_i représente le nombre d'emplois en zone i . L'attractivité résidentielle, telle qu'elle est ici formulée, représente la quantité de terrains disponibles pour le développement immobilier dans une zone donnée. En supprimant la variable relative aux emplois dans la zone de la formule ci-dessus, on obtient l'expression de la probabilité de résidence dans la zone étant donné un lieu de travail fixe – ce qui équivaut à l'expression de la probabilité dans le modèle logit multinomial. Ce point est détaillé dans la partie suivante.

La population résidente, constituée des employés dans les industries primaires et manufacturières et de leurs familles, a besoin d'un certain nombre de services. C'est de cette demande que résulte la localisation des emplois de l'industrie des services. Cette localisation est déterminée par un second modèle d'interaction spatiale. Naturellement, les travailleurs de l'industrie des services ont également besoin de logements et de services, qui sont fournis par des employés supplémentaires dans ces industries, qui ont à leur tour besoin de logements. Ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce que tous les employés de l'industrie des services ou tous les ménages aient été localisés (Southworth, 1995). Le processus de distribution des travailleurs et des ménages est suivi d'un processus similaire qui détermine la localisation – réputée fixe – de l'industrie des services servant les ménages ainsi que des industries primaires et manufacturières.

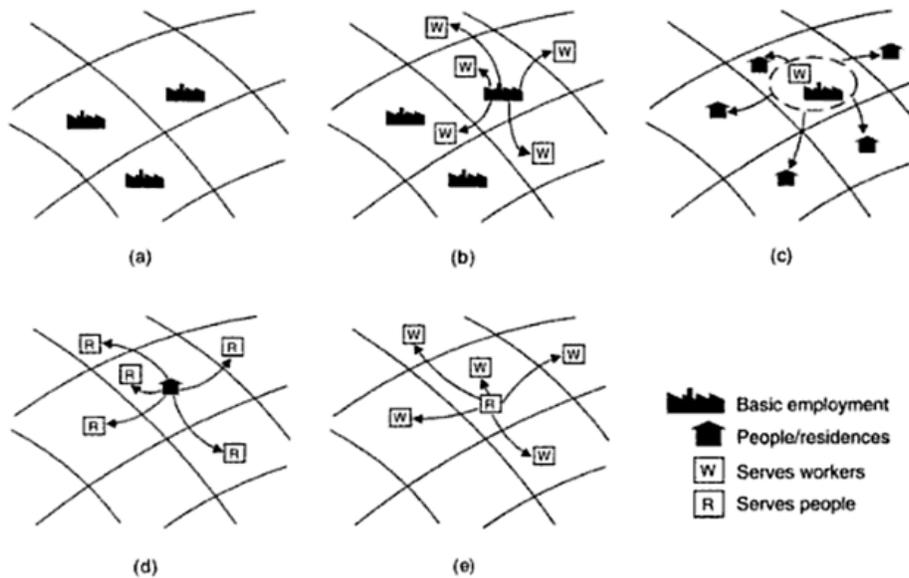


Figure 1 - Illustration du modèle de Lowry (Horowitz, 2004)

La Figure 1 illustre le fonctionnement géographique d'un modèle de type Lowry. La Figure 1a illustre la distribution (donnée) des emplois primaires et manufacturiers. La Figure 1b représente la distribution des emplois de l'industrie des services, servant les industries primaires et manufacturières. La Figure 1c illustre l'attribution de lieux de résidence aux travailleurs des industries primaires et manufacturières. La Figure 1d représente la distribution des services destinés aux résidences. La Figure 1 illustre l'allocation des services destinés aux activités servant les ménages (A. J. Horowitz, 2004).

M. Iacono, D. Levinson, and A. El-Geneidy (2008) et Alan Wilson (2010) rapportent que, dans la littérature traitant de ce type de modèles (e.g. A. Anas, 1984; Train, 2003; A. Wilson, 1981), on relève qu'en supprimant la variable emploi zonal de la formule de Lowry, on obtient une formule exprimant la probabilité de résidence dans une zone, étant donné un lieu de travail fixe – comme évoqué plus haut.

Le cadre théorique de l'utilité aléatoire

Contrairement aux modèles de Lowry et aux modèles d'offre de loyer, le cadre de l'utilité aléatoire n'est pas un modèle de localisation en tant que tel. Il s'agit plutôt d'un cadre théorique permettant d'analyser les mécanismes de choix discrets, qu'ils soient liés à la localisation des entreprises, des ménages, ou autre. L'importance de ce cadre théorique est grande, puisque son auteur a reçu le Prix Nobel d'économie en 2000. Cette théorie a aussi fourni un paradigme fertile à la modélisation des tendances spatiales et d'utilisation du sol. Il s'agit aujourd'hui de la théorie la plus répandue pour modéliser les transports et l'utilisation du sol (Pagliara & Wilson, 2010). Elle a également une importance fondamentale pour la modélisation – aussi bien classique que centrée sur les activités – de la demande de transport.

Le principe de l'utilité aléatoire est solidement ancré dans la théorie micro-économique, c'est pourquoi il est souvent utilisé en complément d'approches fondées sur l'interaction spatiale, considérées comme n'étant ni théoriques ni comportementales. Il faut souligner qu'Alex Anas (1983) a démontré que le modèle gravitationnel utilisé dans les approches fondées sur l'interaction spatiale est équivalent aux modèles de localisation des entreprises et des ménages (si l'on utilise les mêmes variables). Anas a ainsi mis en lumière les fondements « comportementaux » de ces modèles. Donc, nous pouvons considérer ces deux approches comme équivalentes, bien qu'elles aient des origines intellectuelles différentes. Néanmoins, c'est depuis la perspective de l'utilité aléatoire que les modèles de choix discrets ont été les plus explorés et généralisés. C'est en partie pour cette raison que l'on a souvent considéré qu'il s'agissait d'approches différentes de la localisation et du choix, appliquées à la modélisation intégrée. Conformément à cet usage, l'interaction spatiale et l'utilité aléatoire font l'objet de deux parties distinctes dans ce rapport.

Le cadre théorique de l'utilité aléatoire a été introduit par Daniel McFadden (1973) par la dérivation du modèle logit multinomial dans un cadre d'utilité aléatoire. Sa première utilisation dans un contexte de choix de localisation des entreprises date de 1978 (McFadden, 1978). La description suivante du modèle logit multinomial est largement tirée de Train (2003).

Le cadre de l'utilité aléatoire suppose que les agents choisissent parmi les options disponibles celle qui maximise leur utilité. Prenons un agent (par exemple, un ménage) confronté à un choix

entre deux options (par exemple, deux lieux de résidence). Associons la lettre n à l'agent et la lettre j aux options disponibles. Selon la théorie de l'utilité aléatoire, l'agent choisira l'option dont l'utilité est la plus grande (U_{nj} dans l'Équation 1). On considère en outre que l'utilité se décompose en deux parties : l'une est déterminée (mesurable et observable), l'autre est aléatoire). L'utilité déterminée est représentée par V_{nj} dans l'Équation 1. La partie déterminée de l'utilité est généralement représentée par une fonction linéaire, combinant les caractéristiques de l'agent et des options disponibles. Dans l'Équation 2, les caractéristiques observables sont représentées par la lettre x .

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad \forall j \quad (1)$$

$$U_{nj} = \beta' x_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad \forall j \quad (2)$$

On considère que le terme d'erreur (noté ε_{nj}) est aléatoire et qu'il est distribué par la fonction de densité conjointe $f(\varepsilon_n)$ – d'où le nom d'utilité aléatoire. La connaissance de l'erreur permet de construire des énoncés probabilistes sur les choix de l'agent, à l'aide des informations contenues dans la partie déterminée de l'utilité.

La probabilité (P_{ni}) qu'une option i soit choisie par un agent n équivaut à la probabilité qu'une option donnée offre l'utilité la plus grande :

$$P_{ni} = P(U_{ni} > U_{nj}) \quad \forall j \neq i \quad (3)$$

$$P_{ni} = P(V_{ni} + \varepsilon_{ni} > V_{nj} + \varepsilon_{nj}) \quad \forall j \neq i \quad (4)$$

$$P_{ni} = P(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj}) \quad \forall j \neq i \quad (5)$$

Ceci équivaut en fait à la distribution cumulative de la probabilité que le terme aléatoire ($\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni}$) soit inférieur à la valeur observée ($V_{ni} - V_{nj}$). Ce qui peut être reformulé en utilisant la fonction de densité présentée plus haut :

$$P_{ni} = \int_{\varepsilon} I(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj}) \quad \forall j \neq i \quad (6)$$

où $I(\cdot)$ est une fonction « indicateur » égale à 1 quand l'expression entre parenthèses est vraie et égale à 0 dans le cas contraire. En changeant les paramètres de la fonction de densité, on obtient des modèles de choix discrets différents. Lorsque la fonction de densité est normale multivariée, on obtient un modèle probit; lorsque la fonction de densité est logistique, on obtient un modèle logit.

Le modèle logit est obtenu en posant l'hypothèse critique que ε_{nj} a une distribution indépendante et identique des valeurs extrêmes de type II (IID). L'hypothèse IID est critique dans la mesure où, si deux variables ont des valeurs extrêmes, la différence entre elles est distribuée selon une fonction logistique. En conséquence, il est possible de dériver la solution à forme fermée du logit multinomial, comme illustré par les Équations 7 et 8 :

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{nj}}} \quad (7)$$

$$P_{ni} = \frac{e^{\beta'x_{ni}}}{\sum_{j=1}^J e^{\beta'x_{nj}}} \quad (8)$$

Ici, P_{ni} représente la probabilité que l'agent n choisisse l'option i . Il s'agit bien sûr d'une fonction des variables – les termes x représentant les caractéristiques des agents et des alternatives – et les termes β représentent les coefficients qui y sont associés.

Les paramètres d'un modèle logit multinomial sont estimés par le biais d'une estimation du maximum de vraisemblance. L'unité de base de la fonction de vraisemblance est la vraisemblance qu'un agent donné choisisse l'option qu'il a effectivement choisie – où y_{ni} est égal à 1 si l'agent choisit l'option i , et égal à zéro dans le cas contraire.

$$\prod_i (P_{ni})^{y_{ni}} [1 - (P_{ni})]^{1-y_{ni}} \quad (9)$$

À partir de ce raisonnement, et en supposant que tous les agents sont indépendants, on peut calculer la vraisemblance que tous les agents contenus dans un échantillon choisissent l'option qu'ils ont effectivement retenue (c'est-à-dire, la fonction de vraisemblance), comme cela est illustré dans l'équation 10 :

$$L(\beta) = \prod_n \prod_i (P_{ni})^{y_{ni}} \quad (10)$$

Bien qu'il s'agisse de la fonction de vraisemblance, ce n'est pas la fonction qui est maximisée. En réalité, c'est le logarithme de la fonction de vraisemblance qui est maximisé. C'est-à-dire :

$$LL(\beta) = \sum_n \sum_i y_{ni} \ln P_{ni} \quad (11)$$

Cette fonction est maximisée par un processus itératif.

Une fois le modèle logit estimé, il peut être employé pour prédire la probabilité qu'un événement se produise (par exemple, la probabilité qu'un ménage choisisse une localisation donnée), ce qui est souvent exprimé sous la forme d'une proportion (par exemple, la proportion des déplacements entre deux zones effectués en transports en commun). Les paramètres peuvent aussi être utilisés pour prédire le résultat d'un choix particulier en estimant l'utilité des différentes options tout en tenant compte de l'erreur aléatoire. Ce genre d'application est souvent utilisé dans les modèles opérationnels de transport et d'utilisation du sol.

Le logit multinomial est le modèle logit le plus élémentaire, mais il en existe de nombreuses variations utilisant diverses hypothèses sur la structure des termes d'erreur de la fonction

d'utilité – c'est-à-dire, sur la corrélation entre les erreurs des différentes options. Un autre modèle logit très répandu est le logit imbriqué.

Comme l'a montré Waddell (1998), les premières applications de la théorie de l'utilité aléatoire aux choix de localisation des ménages (par exemple, (Quigley, 1976), (Lerman, 1976) et (A. Anas, 1981); A. Anas (1982)) visaient principalement à en préciser les fondements théoriques. Elles cherchaient par exemple à déterminer s'il était préférable de traduire les mécanismes de choix par des modèles logit combinés ou imbriqués.

Selon Chang (2006), les études ultérieures dans ce domaine se sont concentrées sur des questions différentes, comme l'estimation du consentement à payer afin de connaître certaines caractéristiques d'un environnement résidentiel (cf.(e.g. J. Hunt, 2001), ou l'utilisation conjointe de données issues de préférences déclarées et observées pour la calibration des modèles (e.g. Earnhart, 2002).

En plus d'avoir été utilisés pour rendre opérationnels des modèles de transport et d'utilisation du sol dans la tradition de l'offre de loyer, les modèles de choix discrets ont aussi permis d'opérationnaliser des modèles issus de la théorie des intrants-extrants. Les modèles intrants-extrants ne localisent pas, à proprement parler, les entreprises et les ménages. Dans ces modèles, la localisation est exogène (c'est-à-dire qu'elle n'est pas déterminée par le modèle). C'est par le biais de la théorie de l'utilité aléatoire que la localisation des entreprises et des ménages est intégrée aux modèles intrants-extrants de transport et d'utilisation du sol. Ce point sera développé dans la partie intitulée « Modèles intégrés de transport et d'utilisation du sol », qui décrit les différents modèles opérationnels faisant appel à la théorie de l'utilité aléatoire.

Modèles d'offre de loyer

Au début du XXe siècle, Alfred Weber élabora une théorie expliquant la localisation des industries à partir de la masse physique de leurs intrants et extrants. Selon cette théorie, si la fabrication d'un bien engendre une augmentation de la masse, l'entreprise a intérêt à s'établir à proximité de son marché final, puisque les biens sont plus lourds à la fin du processus de production. À l'inverse, si la production d'un bien engendre une diminution de la masse (comme le raffinage de minerai, par exemple), alors, l'entreprise a intérêt à se situer plus proche de sa source de production pour minimiser ses coûts de transport, toutes choses étant égales par ailleurs. Cette approche par la minimisation du coût de transport a occupé une grande partie de la littérature sur la localisation des entreprises à ses débuts. En effet, les coûts de transport représentaient alors une part importante des coûts de production et la production de biens matériels ainsi que l'extraction de ressources étaient des pans majeurs de l'économie.

La théorie de l'offre de loyer, prolongeant les travaux de Weber et von Thünen, a été largement utilisée comme base théorique à la modélisation des choix de localisation des entreprises et des ménages dans les zones urbaines (Maoh, Kanaroglou, & Buliung, 2005). Bien que la présentation des modèles d'offre de loyer commence souvent par les travaux d'Alonso, nous introduirons ici cette théorie en remontant brièvement jusqu'aux travaux de von Thünen, dans lesquels elle trouve ses racines. En 1959, Grotewold publia un texte éclairant dans lequel il offrait une interprétation contemporaine des idées de von Thünen tout en les replaçant dans leur contexte original. Grotewold décrit, entre autres, comment von Thünen comprend et

conceptualise le concept de distance. Le modèle de Von Thünen est très schématique et n'envisage qu'un seul mode de transport possible. Il présente le monde comme un plan isotrope sur lequel les activités peuvent se localiser et ne prend pas en compte les qualités de l'espace : la fertilité du sol, par exemple, en est exclue, bien que ce modèle s'applique principalement à des activités agricoles.

En outre, le modèle postule que chaque zone est reliée au réseau routier, ce qui constitue une simplification de taille. En effet, l'accessibilité réelle d'une zone était à l'époque bien inférieure à sa distance au marché, étant donnée la faiblesse des infrastructures de transport. Cependant, l'intention de Von Thünen était précisément de développer un modèle simple pour décrire les comportements observés, en fonction de la distance au marché, du prix de vente des biens, et du loyer de la terre. Il utilisa ces variables pour décrire la distribution spatiale des activités agricoles autour d'un marché et d'une ville-centre (cf. Figure 2).

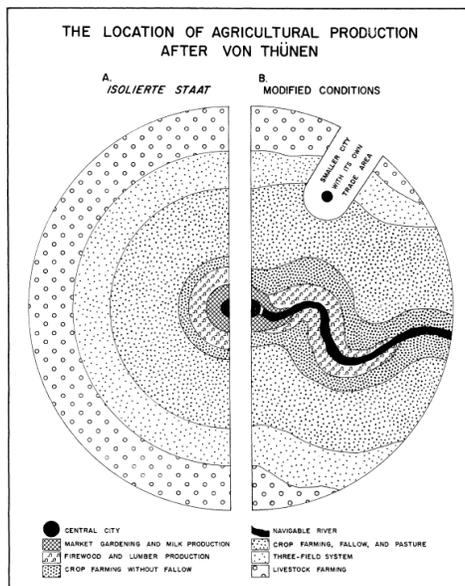


Figure 2 - Distribution des activités agricoles autour d'un marché et d'une ville-centre, Grotewold (1959)

Selon Grotewold (1959), le facteur ayant le plus changé depuis l'époque de von Thünen est la technologie des transports. Il note que « les coûts d'expédition ne sont plus strictement proportionnels au volume et à la distance; ils dépendent largement du moyen de transport utilisé et [de la nature] des biens transportés. » Grotewold soutient que « l'importance de [l'avantage de localisation des fermiers implantés près des villes] a décliné, à tel point qu'ils ne sont plus en mesure de rivaliser avec des producteurs plus éloignés, mais favorisés par des terres plus fertiles, une main-d'œuvre bon marché, ou des taxes moins élevées » (Grotewold, 1959, p. 353). Cette conclusion préfigure une grande partie des travaux qui devaient suivre ceux de Grotewold, alors que l'accès et les coûts de transport prenaient de moins en moins d'importance dans les choix de localisation des entreprises.

Néanmoins, avant d'évoquer ces profonds changements d'orientation dans la recherche théorique, il convient de présenter les travaux de W. Alonso (1960). La contribution de ce dernier à la théorie de la localisation des entreprises et des ménages a consisté, à partir des

travaux de von Thünen, à formaliser un modèle dans lequel le marché foncier urbain fonctionne de la même manière que le marché foncier agricole. Ce modèle est connu sous le nom de modèle monocentrique. Alonso décrit les facteurs de choix auxquels les entreprises et les ménages sont confrontés comme des « biens négatifs (distance) aux coûts positifs (les coûts de trajet); ou, inversement, des biens positifs (accessibilité) aux coûts négatifs (les économies de transport) » (W. Alonso, 1960, p. 150). Il postule que « le loyer que les fermiers sont prêts à payer pour la terre dépend de la profitabilité de sa localisation » (W. Alonso, 1960, p. 150). Puisque les différents biens ont des prix de marché et des coûts de transport différents, la fonction d'offre de loyer est « le loyer par acre que les fermiers sont prêts à payer pour la terre en différents lieux » (W. Alonso, 1960, p. 151). En observant les parcelles disponibles à un moment donné, on peut déterminer quel type d'entreprise offrira le loyer le plus élevé pour une parcelle donnée, et donc, quel type d'entreprise s'y installera. Dans le modèle d'Alonso, les entreprises sont des acteurs rationnels cherchant à maximiser leurs profits, et disposant d'une connaissance parfaite du marché – elles connaissent le prix de la terre et des transports en tout lieu. À partir de ces postulats, les terres sont mises aux enchères et les propriétaires – qui ont aussi une connaissance parfaite du marché – choisissent de louer chaque parcelle à l'entreprise offrant le loyer le plus élevé (P Waddell, 1998).

Pour les ménages, le modèle s'applique de la même manière : « le consommateur, en fonction de ses revenus et de ses préférences, cherche un équilibre entre les coûts et les inconvénients des déplacements quotidiens et les avantages d'une terre d'autant moins coûteuse qu'elle est située loin du centre-ville – associés à la satisfaction d'avoir davantage d'espace pour vivre » (W. Alonso, 1960, p. 154). Les mêmes principes généraux s'appliquent aux entreprises. Au lieu de chercher à minimiser le coût de leur trajet quotidien, les entreprises cherchent à minimiser le coût de transport de leurs marchandises. Alonso (1960) détaille le fonctionnement du mécanisme d'enchère foncière en expliquant un paradoxe apparent des villes américaines, où les pauvres occupent des terres coûteuses près du centre-ville tandis que les riches vivent loin du centre dans les banlieues. Pour Alonso, le choix de localisation est un ensemble de deux biens achetés simultanément : l'emplacement et la terre. « Quel que soit l'endroit, les pauvres ne peuvent pas acheter autant de terre que les riches. Puisqu'ils n'achètent qu'une petite portion de terre, les variations de prix ne sont pas aussi importantes pour les pauvres que les coûts et les inconvénients liés au transport. À l'inverse, les riches achètent de plus grandes quantités de terre et sont donc plus sensibles à son prix. » (W. Alonso, 1960, p. 156). De la même manière, les entreprises de différentes catégories s'établissent plus ou moins loin de l'hypercentre, en fonction de leurs besoins d'espace. Ainsi, les commerces de vente au détail peuvent offrir des loyers plus élevés que les activités d'entreposage, par exemple. Les premiers ont besoin de relativement peu d'espace et sont donc moins sensibles aux prix des loyers que les secondes, qui ont besoin de beaucoup d'espace.

Alonso explique la différence entre la théorie du loyer et la théorie de la localisation :

“la théorie du loyer traite de la compétition pour l'utilisation de l'espace, ce que la théorie de la localisation ne fait pas. L'approche formelle la plus commune de la théorie de la localisation représente l'entreprise comme un point sans dimension à placer sur une carte, [mais] tant que l'entreprise est représentée par un point, il ne peut y avoir de compétition pour l'espace puisqu'on peut alors concentrer autant

d'industries qu'on le souhaite sur la tête d'une épingle. Ces industries peuvent être en compétition pour des marchés ou des intrants, mais pas pour la terre. Ce n'est que lorsque l'on attribue aux entreprises une dimension spatiale que les deux théories peuvent être associées » (W Alonso, 1969, p. 39).

Selon Alonso, le modèle d'offre de loyer est un processus consistant essentiellement à « ... postuler le prix de la terre au centre-ville, puis à déterminer le prix de toutes les autres zones en fonction des offres compétitives de tous les utilisateurs potentiels de la terre. L'enchère la plus haute remporte la terre et chaque offre est mise en relation avec une alternative préférée par le biais de courbes d'offres de loyer » (W. Alonso, 1960, p. 157).

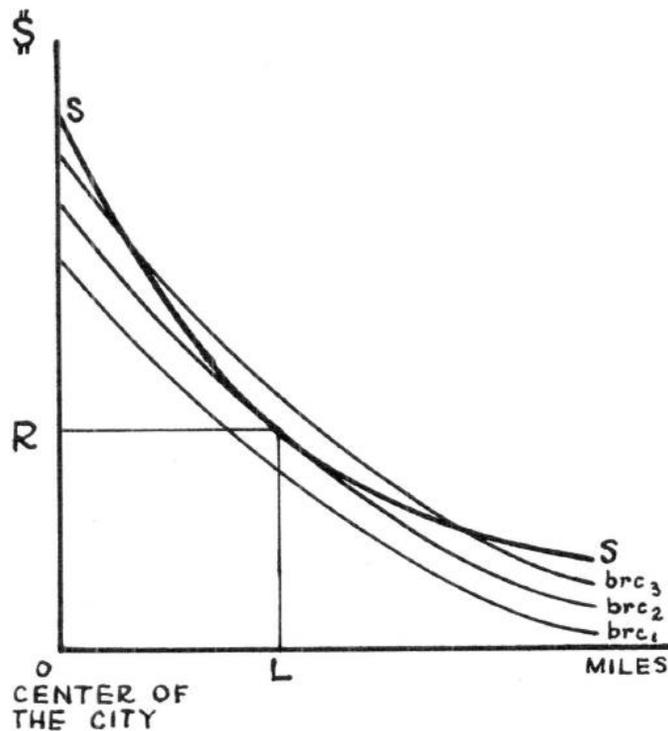


Figure 3 – Équilibre entre loyer de la terre (R) et localisation (L), Alonso (1960)

La Figure 3 illustre la manière dont le point d'équilibre du loyer de la terre est atteint au moyen de courbes d'offre de loyer. Chaque courbe représente la courbe d'offre de loyer d'une entreprise ou d'un ménage pour un agent typique. Alonso décrit ce processus de la manière suivante :

« l'agent économique cherchera à atteindre la courbe d'offre de loyer la plus basse possible. Par conséquent, il cherchera le point où la courbe des prix réels (SS) est tangente à la plus basse des courbes d'offre de loyer qu'elle touche (brc_2). Ce point de tangence sera le point d'équilibre de la localisation (L) et du loyer (R) pour cet utilisateur de la terre. S'il s'agit d'un homme d'affaires, il aura maximisé ses profits; s'il s'agit d'un résident, il aura maximisé sa satisfaction [ou utilité]. ... Donc, si les courbes des entreprises ont une pente plus forte que celles des ménages, et que les courbes des ménages ont une pente plus forte que celles des activités

agricoles, les entreprises seront situées en centre-ville, entourées par les résidences, qui seront elles-mêmes encerclées par les activités agricoles » (W. Alonso, 1960, pp. 155-156).

Le modèle de l'offre de loyer demeure une approche répandue pour analyser la distribution des loyers dans les villes et la localisation des ménages et des entreprises. Ce modèle a depuis gagné en complexité, intégrant différentes offres de loyer pour différents types de ménages et d'entreprises.

Recherche empirique sur la localisation des entreprises et des ménages

Pour faire suite à la recension de la littérature sur les modèles fondamentaux présentée dans la partie précédente, cette partie présente une recension de la littérature empirique. Elle aborde les pans de la littérature qui prolongent ou contestent les modèles fondamentaux, à partir de l'observation de phénomènes empiriques de localisation des entreprises et des ménages.

La littérature traitant de la localisation des entreprises recoupe largement la littérature sur la localisation des ménages. Cependant, les points ayant reçu la plus grande attention reflètent la différence subtile existant entre ces deux domaines d'étude. La modélisation du choix de localisation des ménages s'est longtemps inscrite dans le cadre du modèle de Lowry. On pensait que la localisation des activités découlait des choix de localisation des industries primaires, qui eux-mêmes résultaient d'une recherche des coûts de transport minimaux. Ces choix de localisation étaient réputés influencer à leur tour la distribution spatiale des ménages, puis des emplois dans les commerces de détail.

Un raisonnement similaire parcourt la littérature sur la localisation des ménages. Une grande partie de cette littérature postule que la localisation des ménages résulte en premier lieu d'une recherche des coûts de transport les plus bas selon le modèle de l'offre de loyer. Néanmoins, les approches de la localisation des ménages et des entreprises ont évolué au fil du temps, prêtant attention à d'autres facteurs que les coûts de transport, la localisation des activités et le prix de la terre. Cette évolution a été le fruit des changements dans le système urbain engendrés par la technologie, la culture du travail et les préférences des consommateurs. Les pages suivantes examinent ces changements plus en détail en les organisant autour de quelques thèmes principaux. Les principaux résultats sont présentés dans leur contexte d'étude afin de préciser les points faisant toujours débat et d'illustrer la complexité inhérente à la modélisation de la localisation des entreprises et des ménages.

Recherche empirique sur la localisation des entreprises

Décentralisation des entreprises et emploi

L'un des courants les plus importants de la recherche empirique sur la localisation des entreprises s'est focalisé sur la migration vers la banlieue des industries et des emplois. Mills (1970), par exemple, chercha à comprendre le phénomène de migration vers la banlieue qui prenait place dans les années 1960 et 1970 – un phénomène qui devait plus tard être étudié par de nombreux chercheurs. Les travaux de Mills sont venus s'ajouter à la littérature existante décrivant le mécanisme par lequel le taux d'emploi et la densité résidentielle diminuent lorsque l'on s'éloigne du centre-ville. Ils ont aussi permis de mieux comprendre les différences

existantes « au sein de la population et des diverses catégories d'emplois » (Mills, 1970, p. 6). Mills critique les travaux qui considèrent les facteurs expliquant la densité comme des variables exogènes et soutient qu'ils devraient être considérés comme des facteurs endogènes. Son analyse de dix grandes villes américaines conclut que « ... la population est le secteur le moins centralisé suivi (dans l'ordre) de l'industrie manufacturière, du commerce de détail, des services, et du commerce de gros » (Mills, 1970, p. 9). Il cherche ensuite à déterminer si la délocalisation vers la banlieue est liée à « la croissance rapide du taux de motorisation » (Mills, 1970, p. 9) ou à d'autres phénomènes. Utilisant les données du recensement remontant à la fin du XIXe siècle, Mills étudie les gradients de densité moyens pour la population, l'industrie manufacturière, le commerce de détail, les services et le commerce de gros, et constate que le processus d'aplatissement des gradients de densité dans le temps a commencé bien avant la Seconde Guerre mondiale. Ceci signifie qu'il n'y a pas eu de changement brutal dans les années 1940, mais que les gradients de densité ont décliné progressivement, probablement en conséquence d'un accroissement de la prospérité. C'est pourquoi l'étude de la richesse relative de différentes franges de la population pourrait améliorer la compréhension des formes urbaines.

Une autre conclusion intéressante à laquelle est parvenu Mills est que « les migrations de population vers la banlieue ont attiré les emplois dans l'industrie manufacturière, plutôt que l'inverse » (Mills, 1970, p. 12). Cette affirmation contredit l'hypothèse classique (telle qu'elle est formulée, par exemple, dans le modèle de Lowry) selon laquelle les ménages se localisent en fonction des emplois. Cette conclusion est également celle à laquelle sont parvenues de nombreuses études postérieures, comme celles de Steinnes (1982) ou d'Alperovich et Katz (1988). Selon Mills, les variables ayant la plus grande influence sur le gradient de densité d'une ville sont la taille de la ville, le revenu des habitants et le prix des transports (y compris le temps et le coût de fonctionnement des véhicules). Comme évoqué plus tôt, Mills examine aussi la vitesse de délocalisation – un élément important du système d'équilibre. Il constate que ce sont les services qui se délocalisent le plus rapidement, suivis par les commerces de détail, les industries manufacturières, la population, et les commerces de gros. Le constat que les délocalisations engendrent des constructions et des déplacements de capital est crucial à l'analyse de la probabilité d'un ajustement de l'équilibre.

Causalité et localisation de l'emploi

L'article de Mills évoque seulement brièvement les facteurs déterminant la localisation des ménages et des entreprises, mais ce sujet a reçu beaucoup d'attention chez d'autres auteurs. Le travail de Greenwood (1980), par exemple, s'est penché sur la délocalisation des entreprises et des ménages vers la banlieue.. Dans le prolongement de l'argument de Mills (1970) et de Luce (1994) selon lequel les entreprises suivent les ménages (plutôt que l'inverse), Greenwood suggère que les ménages ne répondent pas simplement à la délocalisation vers la banlieue des emplois, mais plutôt aux variations du stock de logements, et évoluent simultanément à la localisation des emplois. Afin de vérifier cette hypothèse, Greenwood a développé trois « blocs » d'équations. Le premier bloc modélise le taux de croissance du stock de logements. Le deuxième modélise le taux de croissance de l'emploi en banlieue par rapport à l'emploi au centre-ville. Le troisième bloc modélise le taux de croissance de l'emploi en banlieue par rapport à la population du centre-ville.

Greenwood décrit un modèle d'équation structurelle, utilisant la méthode des triples moindres carrés, et distinguant quatre types d'emplois (industrie manufacturière, vente au détail, vente en gros et service). Tout comme le travail de Muth (1985), l'étude de Greenwood « révèle clairement que la croissance de l'emploi en banlieue a tendance à dépendre de la croissance de la main d'œuvre en banlieue » (Greenwood, 1980, p. 500). En d'autres termes, l'emploi suit les résidents dans leur afflux depuis le centre vers la banlieue. (Steinnes, 1982) s'est aussi penché sur la question du lien de causalité entre emploi et localisation résidentielle et est parvenu à des résultats similaires.

Alperovich et Katz (1988) ont utilisé le cadre théorique de la maximisation du profit pour étudier le phénomène de la délocalisation vers la banlieue de l'emploi. À partir des travaux de Muth (1985) et Mills (1970), Alperovich et Katz (1988) ont essayé de démontrer que, tout comme les ménages, les entreprises cherchent à maximiser leur utilité en choisissant simultanément une localisation et un type de production. Ils postulent que « lorsque la production augmente et que la délocalisation vers la banlieue de la population atteint un niveau critique, l'entreprise est contrainte, afin de maximiser son profit, de se rapprocher de sa source de main d'œuvre en se relocalisant en banlieue » ((Alperovich & Katz, 1988), p.244). Les entreprises cherchent à équilibrer leur modèle : elles doivent minimiser leur coût d'accès au marché (traduit par leur coût de transport vers le marché du centre-ville) tout en minimisant « ... les coûts associés aux déplacements pendulaires depuis et vers la banlieue » (Alperovich & Katz, 1988), p.245). On suppose qu'une partie des salaires est implicitement destinée à compenser le coût des déplacements pendulaires des travailleurs. La conception du temps de transport comme un coût appelant une compensation est répandue dans la littérature, puisque les individus rationnels maximisant l'utilité essaient de minimiser leur temps de transport, à moins que celui-ci ne soit compensé par un salaire plus élevé (Levinson & Krizek, 2008). Le point d'équilibre d'un tel système est atteint lorsque ces deux forces se compensent.

Greenwood et Stock (Greenwood & Stock, 1990) examinent les différences entre les processus de délocalisation vers la banlieue de différents types de ménages et d'entreprises. Pour cela, ils utilisent des données sur les ménages migrants depuis certaines villes vers les banlieues. Les schémas de migrations intramétropolitaines sont modélisés pour trois périodes successives (de 1950 à 1960, de 1960 à 1970, et de 1970 à 1980) par des équations simultanées. Les auteurs notent que l'interprétation de leurs résultats est rendue difficile par l'évolution du taux de motorisation au cours de la période d'étude. À l'origine, les ménages étaient contraints de résider proche de leur lieu de travail pour pouvoir utiliser les transports en commun, mais entre 1950 et 1980 le taux de motorisation du groupe de revenu le plus faible est passé 26% à 61%. Les ménages n'étaient donc plus aussi liés à leur lieu de travail que par le passé.

Une estimation des triples moindres carrés est utilisée pour définir le modèle. Résultat surprenant, il apparaît que les arrivants les plus pauvres exercent une influence positive et significative sur la croissance de l'emploi en banlieue, alors que les arrivants aux revenus élevés ont aussi un impact positif sur la croissance de l'emploi, mais uniquement dans les centres-villes. L'un des problèmes soulignés par cette étude est que le signe de certaines variables change suivant les périodes, en réponse à des changements de définition. C'est-à-dire que les facteurs ayant contribué à la croissance de l'emploi dans les années 1950 peuvent

avoir eu l'effet inverse dans les années 1960, et vice versa. Ce point témoigne de la complexité des systèmes de dynamiques urbaines.

Cherchant à établir si les emplois manufacturiers suivent la population ou si c'est le mouvement inverse qui se produit, Greenwood et Stock (1990) nuancent la théorie formulée par Mills et d'autres chercheurs. Ils suggèrent qu'à n'importe quel instant donné, les industries manufacturières suivent les travailleurs à faibles revenus qui constituent l'essentiel de leur main d'œuvre. Dans la mesure où ces industries d'exportation ne dépendent pas du marché local, la composition démographique des zones où elles s'établissent n'affecte ni leurs ventes ni leur rentabilité.

Boarnet (1994) porte un regard critique sur le modèle monocentrique d'Alonso et cherche à déterminer s'il s'agit encore d'un concept valide pour évaluer les schémas d'utilisation du sol en milieu urbain. Selon Boarnet « le modèle monocentrique considère l'accès à un emploi fixe (ou exogène) comme un facteur important pour expliquer les modes d'établissement résidentiel » (Boarnet, 1994, p. 80). Pourtant, les approches polycentriques se contentent généralement d'élargir l'approche monocentrique en l'adaptant à des centres multiples. Boarnet examine l'hypothèse d'exogénéité de la localisation de l'emploi. Il analyse des données issues d'un échantillon de 365 municipalités du New Jersey, au moyen d'un modèle de régression simultanée des changements de population et d'emploi. Boarnet constate – comme l'avaient suggéré Steinnes (1982) et Muth (1985) – que c'est la croissance du marché régional de l'emploi qui influence la localisation des créations d'emplois, et non l'inverse. Il conclut que « ... pendant les années 1980, l'évolution de l'emploi dans le nord du New Jersey était endogène aux changements démographiques sur le marché de l'emploi » (Boarnet, 1994, p. 93). Plus généralement, ceci laisse à penser que l'hypothèse courante selon laquelle la distribution des emplois est exogène à la localisation des ménages est erronée.

Boarnet (1994) soutient qu'en raison de la relativement faible taille des municipalités étudiées, l'interaction spatiale ne peut pas être ignorée. Puisque les marchés sont voués à s'étendre au-delà de frontières administratives qui sont arbitraires en quelque sorte, il serait irréaliste d'ignorer les liens entre municipalités voisines. Boarnet décrit son approche comme un mélange du modèle monocentrique classique et du modèle simultané de (Steinnes & Fisher, 1974). Néanmoins, son approche se distingue de celles de ces prédécesseurs par son usage de techniques d'économétrie spatiale.

La variable dépendante de son analyse est l'évolution de la population et de l'emploi dans les municipalités retenues; les variables indépendantes sont constituées d'une série de caractéristiques ayant trait à ces municipalités et au système de transport. En ce qui concerne les paramètres de la régression, « les relations d'équilibre peuvent être dérivées d'un simple modèle d'offre de loyer pour la localisation des ménages et des entreprises » (Boarnet, 1994, p. 84). Les résultats obtenus indiquent que les changements sur le marché du travail sont structurellement endogènes à l'évolution de l'emploi.

Comme on vient de le voir, la recherche empirique suggère fortement l'existence d'une relation étroite, voire endogène, entre la localisation des emplois et des ménages – ce qui n'est pas pris en compte par les modèles fondamentaux les plus classiques.

Facteurs influençant la localisation des entreprises

Une littérature abondante existe sur les nombreuses approches adoptées pour mieux comprendre les facteurs influençant la localisation des entreprises. Cette littérature peut être divisée en trois catégories : les travaux étudiant ces facteurs en général, les travaux traitant spécifiquement des effets d'agglomération, et les travaux visant à établir comment attirer les entreprises dans les quartiers centraux.

Facteurs influençant la localisation et délocalisation des entreprises par type d'entreprise, taille d'entreprise, etc.

En 1949 Isard et Whitney (1949) ont étudié la distribution des activités de vente au détail en utilisant des données du recensement des entreprises de 1939. Bien que les tendances observées et les conclusions de cette étude ne soient plus valables aujourd'hui – étant donné que l'industrie a changé, le transport de marchandises est passé du rail à la route, et les villes n'ont plus la même forme monocentrique – il est intéressant de constater que, dès 1949, les chercheurs travaillant sur la localisation des entreprises notaient l'existence de différences entre les types d'entreprises. Isard et Whitney se penchent sur la raison pour laquelle différentes industries privilégient des localisations différentes en séparant types de commerce de détail (par exemple, en distinguant les commerces de textile des commerces de meubles et d'articles domestiques). Ils constatent que le chiffre d'affaires des commerces de détail est plus élevé à proximité du centre-ville, mais que les ménages achètent leurs biens de consommation courante proche de leur domicile et loin du centre – deux constats simples, mais prometteurs pour l'analyse du comportement des entreprises et des ménages.

Une conclusion très intéressante d'Isard et Whitney est que les relations observées à partir de secteurs concentriques s'éloignant progressivement du centre ne sont pas linéaires – ce qui révèle la complexité des questions de localisation intramétropolitaine. Cette non-linéarité indiquait peut-être que les commerces vendant des biens moins dispendieux se trouvaient loin du centre, ou plutôt qu'un certain nombre de villes-satellites gravitaient autour de la ville-centre – l'étude d'Isard et Whitney s'étendait jusqu'à 70 miles du centre. Ce premier travail aborde également la relation entre différents moyens de transport lorsque les auteurs affirment que « ... l'automobile, et peut-être le métro et le tramway, ont suscité une différenciation des fonctions de vente au détail entre la ville-centre et les villes périphériques » (Isard & Whitney, 1949, p. 268). Les auteurs évoquent même l'influence potentielle de certains facteurs tels que « ... le revenu, la densité, la composition de la population, les infrastructures de transport, la topographie, les fonctions économiques, ainsi que d'autres variables associées [exerçant] sans aucun doute une influence profonde et largement non mesurée sur la structure du secteur de la vente au détail » (Isard & Whitney, 1949, pp. 268-269). Plusieurs de ces facteurs sont pris en compte dans les modèles décrits ci-dessous.

Erickson et Wasylenko (1980) étudient les choix de délocalisation des entreprises dans l'aire métropolitaine de Milwaukee (Milwaukee SMSA). Le modèle qu'ils développent explore la relation entre offre et demande pour des sites localisés à l'intérieur de la SMSA, et leur impact sur la délocalisation des entreprises de la ville-centre. Les auteurs utilisent pour cela une approche de minimisation des coûts et de maximisation du profit, en divisant les activités entre sept catégories de classification SIC à un chiffre, afin de prévoir le comportement des

entreprises dans différents secteurs. (Erickson & Wasylenko, 1980) décrivent les aménités recherchées par les entreprises de différentes catégories. Certaines entreprises peuvent ainsi valoriser la proximité d'entreprises du même type, tandis que d'autres sont sensibles aux dépenses publiques dans le domaine de la sécurité. Ils définissent deux grandes catégories d'entreprises dont les préférences régissent l'offre et la demande pour les sites disponibles. D'une part, les entreprises sensibles aux conditions du marché local et d'autres par les entreprises qui n'y sont pas sensibles. Ces dernières cherchent uniquement à minimiser leurs coûts, alors que les premières cherchent à la fois à minimiser leurs coûts et à maximiser leurs ventes. Erickson et Wasylenko précisent que « le modèle de maximisation du profit s'applique aux secteurs du commerce de détail, des services, de la finance, de l'assurance et de l'immobilier. Le modèle de minimisation des coûts s'applique à la construction, à l'industrie manufacturière, au transport, aux communications, aux services publics, et au commerce de gros » (Erickson & Wasylenko, 1980, p. 73). Une approche similaire de classification des entreprises est adoptée dans d'autres études, distinguant par exemple les industries de base des activités de vente au détail. Les résultats d'Erickson et Wasylenko sont similaires à ceux d'autres études dans lesquelles les entreprises dont les profits dépendent de leur localisation (vente au détail, services, etc.) cherchent à avoir accès à la clientèle la plus vaste possible, en général proche du centre, et les entreprises dont les revenus ne sont pas affectés par leur localisation (construction, industrie manufacturière, etc.) cherchent à minimiser leur coût de localisation, n'étant pas dépendantes du centre.

La variable dépendante dans l'étude d'Erickson et Wasylenko est le ratio d'entreprises se délocalisant vers chaque municipalité par rapport au nombre total d'entreprises de ce type dans la région d'étude. Dans leur analyse des choix de délocalisation des entreprises vers la banlieue de Milwaukee entre 1964 et 1974, ils constatent que la disponibilité des terrains, les économies d'agglomération, la proximité de la main d'œuvre, la proximité d'une autoroute, ainsi que d'autres facteurs distincts pour chacune des catégories SIC, influencent les choix des entreprises. Cette étude contribue à la compréhension des comportements des entreprises dans des secteurs particuliers ainsi que des coefficients d'élasticité de ces entreprises compte tenu d'un ensemble de variables. Un constat important valable pour tous les types d'industries est que « le manque de signification statistique du coefficient de la variable taxe [serait] particulièrement intéressant pour les décideurs politiques » (Erickson & Wasylenko, 1980, p. 83). De la même façon, (Charney, 1983) affirme que l'influence des taxes dépend beaucoup de l'échelle considérée et que leur analyse nécessite que l'on sépare les impôts fonciers des impôts sur le revenu. Une autre conclusion importante de Charney est que toutes les industries ont tendance à s'agglomérer – une forme d'interaction spatiale – en cherchant à se délocaliser là où la concentration d'entreprises de même type est la plus forte.

Pour déterminer quels sont les facteurs influençant les choix de localisation des entreprises, (K. Lee, 1982) emploie une spécification logistique multinomiale pour dériver la fonction d'offre de loyer, en utilisant les attributs de la localisation et des caractéristiques inhérentes à certains types de sites industriels pour prédire les choix de localisation. Les schémas de localisation sont ensuite déterminés de manière à ce que les industries aient le gradient d'offre de loyer le plus élevé parmi les utilisateurs du sol là où des terrains sont disponibles. Les entreprises sont classées selon leur âge, leur code SIC, leur zone de localisation, et leur taille. La taille de

l'entreprise se révèle être un facteur significatif dans la détermination des choix de localisation, puisque les petites entreprises « bénéficient de l'accessibilité à la zone-centre [et] ont ainsi tendance à compenser le loyer de la terre élevé et les coûts de la congestion dans cette zone dense » (K. Lee, 1982, p. 277). Les entreprises en démarrage se localisent près du centre pour profiter pleinement des économies d'agglomération et des réseaux (Holl, 2006). À l'inverse, les entreprises déjà établies ayant internalisé la plupart des fonctions pour lesquelles elles dépendaient auparavant de l'extérieur (fournitures, services complémentaires, etc.), cherchent des terrains plus vastes. Ces dernières sont moins dépendantes des réseaux et cherchent à s'assurer qu'elles auront la place de se développer davantage si nécessaire. Les résultats de Lee indiquent qu'il est capable de prévoir les choix de localisation de ces entreprises avec une précision raisonnable.

Cooke (1983) cherche à développer une « analyse comparative complète d'une entreprise néoclassique maximisatrice de profit dans un environnement urbain monocentrique simplifié » ((Cooke, 1983), p.258), et teste ensuite les prédictions de son modèle. Sa principale conclusion est que la diminution des coûts de transport risque d'entraîner un phénomène de décentralisation. Ses résultats sont issus d'une enquête conduite auprès de 25 usines ayant changé de localisation dans le SMSA de Cincinnati, à partir de données compilées par (Schmenner, 1978). Il utilise les réponses à cette enquête pour évaluer « l'importance relative des coûts de transport, des économies d'agglomération, et des coûts de délocalisation pour chaque usine » (Cooke, 1983, p. 271), au moyen d'un modèle probit des décisions de localisation. Cooke constate que le coût des transports n'est pas statistiquement significatif dans le processus de décision des entreprises qui se délocalisent.

Une autre tentative de caractérisation des facteurs influençant les choix de localisation des entreprises a été faite (Carlton, 1983). Il modélise les emplois et les choix de localisation des filiales industrielles entre SMSAs comme un problème de choix discret. Carlton considère que la maximisation du profit est la force motrice derrière les choix de localisation des entreprises et que des effets spécifiques à l'entreprise et au site influencent la profitabilité d'une localisation donnée. Les données utilisées dans cette analyse sont des données descriptives sur les usines et des informations générales sur les régions économiques utilisées comme sites potentiels. Les variables indépendantes étudiées sont les salaires, le prix de l'électricité et du gaz naturel, les impôts fonciers, les impôts sur le revenu, les impôts sur les entreprises, les effets d'agglomération, l'expertise technique, le taux de chômage, et le climat d'affaires. Les variables dépendantes sont les choix de localisation et de délocalisation des entreprises ainsi que le nombre d'employés (Carlton, 1983).

Conformément aux conclusions d'(Erickson & Wasylenko, 1980), (Carlton, 1983) constate que les impôts ne sont pas statistiquement significatifs dans l'explication des choix de localisation des entreprises, mais qu'ils ont un effet sur la croissance des entreprises (mesurée en nombre d'employés). L'auteur conclut que son approche permet de prévoir relativement précisément la localisation des emplois et des entreprises et que cette méthode pourrait être utilisée pour résoudre les « problèmes discrets continus dans lesquels la variable continue peut être reliée au moyen de la théorie de la dualité à la fonction sous-jacente [de profit ou de coût] qui produit le choix discret » (Carlton, 1983, p. 449).

Dans une autre approche économétrique visant à isoler l'importance des différentiels dans les processus de localisation intra-urbaine des entreprises, (Charney, 1983) utilise des données sur Detroit, Michigan, pour analyser les élasticités associées à diverses mesures d'aide fiscale. À l'aide d'un modèle de localisation général, Charney évalue la manière dont la fiscalité locale influence la décision de partir ou de rester des entreprises, et le type de localisation qu'elles choisissent quand elles partent. Selon Charney, la « première [décision] est une décision globale binaire comparable à la décision d'acheter ou de ne pas acheter un bien; la seconde est un problème de maximisation impliquant des arbitrages entre des prix variant dans l'espace » (Charney, 1983, p. 186); c'est-à-dire, une question d'offre de loyer.

Le postulat fondamental de cette étude est que toutes les entreprises sont sujettes à la même fonction de production, dont les résultats sont utilisés dans une équation de profit fournissant l'expression du profit maximal à un instant donné. L'approche de Charney utilise la théorie de l'offre de loyer en supposant que toutes les entreprises d'une même catégorie enchérissent sur un type de terrain dont elles tireraient les mêmes bénéfices. Ce mécanisme tire le loyer du terrain vers le haut jusqu'à ce qu'il atteigne le prix de la localisation suivante, établissant ainsi un gradient des prix de demande pour l'ensemble de la région. Il s'agit de l'un des rares modèles prenant en compte les restrictions de zonage et de règlement pour définir la quantité de terrains disponibles pour les activités manufacturières étudiées. Ainsi, les terrains sont attribués à des entreprises spécifiques qui offrent un loyer plus élevé que celui proposé par les autres utilisateurs potentiels.

La variable dépendante est la densité d'entreprises dans un secteur donné; les variables indépendantes sont l'intensité d'utilisation du sol (qui sert de variable de substitution pour les coûts de construction du site), la proximité de l'emplacement antérieur (qui sert de variable de substitution pour les coûts de recherche), des variables relatives au quartier (pour mesurer la qualité de vie), l'accès aux infrastructures de transport (autoroutes, voies navigables et chemin de fer), l'impôt foncier et l'impôt sur le revenu, et enfin, la densité de l'emploi, qui traduit les économies d'agglomération – qu'elles résultent d'une meilleure connexion aux entreprises voisines, de l'accès à un marché plus vaste, ou simplement d'une façon de minimiser les coûts de recherche en s'établissant à proximité d'entreprises existantes réputées rentables. Ce modèle est testé au moyen d'un ensemble de données collectées sur une période de cinq ans, ce qui est suffisamment long pour permettre à un bon nombre d'entreprises de se relocaliser et aux densités d'évoluer. La prise en compte des taux d'imposition dans cette étude est particulièrement intéressante, car les auteurs affirment qu'il existe « ... plus de 150 juridictions fiscales différentes dans l'aire métropolitaine, et que le taux de l'impôt foncier varie fortement [entre elles] » (Charney, 1983, p. 193), ce qui permet aux entreprises de choisir entre des régimes fiscaux très différents.

Après avoir divisé les entreprises en différents groupes selon qu'elles produisent des biens durables ou non et selon leur taille, Charney constate que les petites entreprises ont tendance à s'implanter dans les secteurs les plus denses, ce qui leur permet de partager certaines ressources telles que les marchés et l'expertise. Charney écrit qu'« au fur et à mesure que les entreprises se développent, elles internalisent la production des intrants qu'elles achetaient, et achètent les équipements et les services qu'elles louaient auparavant » (Charney, 1983,

p. 194). En ce qui concerne la division entre biens durables et non durables, les premiers étant stockés plus longtemps, les entreprises qui les produisent ont besoin de plus d'espace et cherchent donc à minimiser le coût de leurs terrains en s'établissant loin du centre-ville, conformément à la théorie de l'offre de loyer.

Les entreprises qui se délocalisent préfèrent les terrains situés à proximité de leur localisation d'origine, sans doute pour réduire leurs coûts de recherche. Par ailleurs, les économies d'agglomération apparaissent comme étant un facteur significatif dans quasiment tous les cas (Charney, 1983). Comme dans d'autres études, l'accès aux infrastructures de transport n'apparaît pas être une variable significative. Charney observe que « ... les coûts de transport sont beaucoup moins pris en compte dans les choix de localisation aujourd'hui qu'au début des années 1900 » (Charney, 1983, p. 199), reprenant les observations d'autres auteurs sur la prédominance du transport autoroutier dans la plupart des villes d'Amérique du Nord (Holl, 2006); (Blackley, 1985) et sur la relativement faible importance des coûts de transport par rapport aux autres étapes du processus de production et de distribution.

Muth (1985) explique que les gradients de densité se sont progressivement aplatis en réponse à l'évolution des infrastructures de transport. Malgré cet aplatissement des gradients, les quartiers centraux demeurent attractifs pour certaines entreprises, car leur location offre un accès à la plus grande quantité de main-d'œuvre possible. En d'autres termes, bien que l'accessibilité relative de l'hypercentre ait pu diminuer par rapport à celle d'autres quartiers, les quartiers centraux restent les zones offrant l'accessibilité la plus grande dans l'absolu, ce qui justifie la prime à payer pour s'y implanter.

Il est intéressant de constater que les voies navigables et les chemins de fer ne sont plus perçus comme des infrastructures de transport, mais comme indiquant l'ancienneté d'un quartier à la « structure obsolète et/ou dégradée » (Charney, 1983, p. 199). Dans la lignée des conclusions de (Erickson & Wasylenko, 1980) et de (Carlton, 1983), Charney constate que le taux d'imposition des revenus n'a pas d'influence significative sur le choix de localisation des entreprises; en revanche, l'influence de la fiscalité foncière est significative. Ceci est dû au fait que l'impôt sur le revenu ne touche que les entreprises ayant réalisé des profits, alors que l'impôt foncier touche toutes les entreprises, qu'elles soient rentables ou non, ce qui les rend beaucoup plus sensibles à ce coût. Les entreprises de grandes tailles sont plus sensibles à l'impôt foncier, car elles occupent des terrains plus vastes et s'acquittent donc de loyers plus élevés.

Dans son article sur la demande de sites industriels, (Blackley, 1985) construit un modèle de demande de terrain, fondé sur le principe économique de maximisation du profit. Son modèle vise à maximiser les enchères selon une distribution hétérogène pour chaque site dans le SMSA de Cincinnati. Il divise les entreprises en deux catégories; la première correspond largement à ce que l'on pourrait appeler l'industrie primaire et secondaire, et la seconde comprend les domaines de la finance, de l'assurance, de l'immobilier (le fameux secteur « FIRE »), ainsi que d'autres services de niveau supérieur. On considère que les activités appartenant à la seconde catégorie requièrent des interactions personnelles fréquentes (Holl, 2006) et produisent des extrants différenciés, alors que les entreprises de la première catégorie

produisent des biens homogènes. Étant données leurs préférences respectives d'accès à leurs clients et aux industries complémentaires, « les entreprises de la première catégorie sont prêtes à payer davantage pour des sites périphériques que pour des sites centraux, alors que l'inverse est vrai pour les entreprises de la deuxième catégorie » (Blackley, 1985, p. 250).

Les données utilisées pour cette analyse ont été compilées par Schmenner entre 1975 et 1976. Elles portent sur les « caractéristiques de production, de marketing et d'organisation des entreprises, ainsi que sur certaines caractéristiques des sites telles que la taille des terrains et l'accès à des services aux entreprises », pour 333 entreprises de la région de Cincinnati (Blackley, 1985, p. 252). Blackley divise les entreprises en quatre groupes selon leur taille (petites/grandes) et le fait qu'elles ont ou non recours à des entreprises de service. La variable dépendante est « la probabilité de choisir un site de type *s*, défini par la taille du terrain et l'accessibilité des services aux entreprises » (Blackley, 1985, p. 256). Cette probabilité est établie à partir des caractéristiques de l'entreprise. Le type de site choisi ayant été correctement prédit dans 57% des cas, il semble que la division des entreprises par taille et type de production puisse permettre de modéliser correctement les choix de localisation. « Un faible ratio entre le nombre d'emplois et la surface de l'usine, le recours au moins partiel à une main-d'œuvre non qualifiée, et la production de biens durables, sont associés à des sites plus étendus et indépendants de services extérieurs » (Blackley, 1985, p. 259). Les sites de ce type sont généralement localisés en périphérie.

Fournissant un argument supplémentaire contre les incitatifs fiscaux, (Blackley, 1985) affirme que les grandes entreprises – susceptibles d'avoir un effet de levier sur la population – sont peu sensibles aux mesures fiscales incitatives, préférant s'implanter en périphérie, où les terrains sont moins coûteux. À l'inverse, les petites entreprises susceptibles d'être attirées par une fiscalité avantageuse n'ont pas un effet stimulant suffisant pour entraîner la revitalisation des centres-villes. En somme, Blackley conclut que les mesures fiscales ne sont pas viables pour revitaliser un centre-ville mourant ou en déclin.

Dans son analyse des choix de localisation des entreprises par rapport aux aménités disponibles, (Gottlieb, 1995) écrit qu'« une entreprise très sélective peut agir comme un agent maximisateur d'aménité, effaçant ainsi la distinction entre les choix de localisation des ménages et ceux des entreprises » (Gottlieb, 1995, p. 1414). Le modèle de localisation des entreprises développé par Gottlieb adopte une approche originale : les entreprises ne maximisent pas leur profit en soi, mais l'utilité de leurs employés par le biais de l'accessibilité de certaines aménités dans le quartier où ils travaillent. Gottlieb affirme l'importance du quartier d'emploi comme unité d'analyse, car « seules les nuisances les plus fortes sont prises en compte sur le lieu de travail, alors que les quartiers résidentiels voisins doivent avoir des standards d'aménité beaucoup plus élevés » (Gottlieb, 1995, p. 1414). Si l'on considère les aménités résidentielles comme des biens normaux, les entreprises cherchant à attirer et à retenir les employés les plus qualifiés essaient de maximiser la quantité d'aménités et de minimiser les nuisances dans le quartier du lieu de travail. Afin de valider cette hypothèse, Gottlieb a utilisé la localisation d'un échantillon d'emplois « sélectifs » comme variable dépendante.

Afin de comparer les niveaux d'aménité de différents sites, Gottlieb identifie les activités les plus sélectives comme étant celles appartenant à la catégorie SIC 87 – les services de gestion et d'ingénierie. Il utilise la densité et le pourcentage d'emplois dans cette catégorie comme variables dépendantes à prédire. Les variables indépendantes retenues sont issues de diverses sources décrivant les préférences de localisation des employés des activités « sélectives ».

Pour Gottlieb, « la question principale [est :] ... quelles sont les préférences révélées de ce groupe particulier pour différentes combinaisons d'aménités et de services publics ? » (Gottlieb, 1995, p. 1424). Des éléments du modèle d'interaction spatiale sont utilisés pour pondérer les variables indépendantes et le modèle de gravité est appliqué aux aménités offertes par les municipalités voisines. Puisqu'une fonction exponentielle négative a été utilisée pour décrire la distribution des employés autour du lieu de travail, une approche similaire est utilisée pour pondérer la variable aménités. On obtient ainsi un « potentiel d'employés » qui représente un nombre projeté d'employés dans une zone donnée en fonction de l'accessibilité des aménités. Gottlieb constate que les aménités résidentielles « influencent la composition de l'emploi, mais pas sa densité » (Gottlieb, 1995, p. 1431). Le facteur le plus important pour expliquer la localisation des entreprises de services professionnels apparaît être le facteur d'agglomération. Ainsi, même si les entreprises cherchent à s'implanter là où les aménités sont les plus nombreuses dans le bassin de migration pendulaire, les économies d'agglomération restent le facteur de localisation le plus important.

Bollinger & Ihlanfeldt (2003) étudient les effets des infrastructures de transport et des programmes d'incitation fiscale sur la part des emplois régionaux localisés dans un secteur de recensement. Les auteurs utilisent des données décrivant la distribution des emplois à la suite de mesures d'incitation fiscale dans la région d'Atlanta, en prenant en compte les effets liés au temps et au secteur de recensement. Ils constatent que « l'abattement des taxes foncières locales, les crédits d'impôt sur l'emploi et l'amélioration des autoroutes font augmenter le taux d'emploi dans un secteur de recensement, alors que la criminalité le fait diminuer » (Bollinger & Ihlanfeldt, 2003, p. 396). Similairement à d'autres études, comme celle de (Greenwood & Stock, 1990), Bollinger et Ihlanfeldt notent que le taux de criminalité a un effet négatif sur l'emploi. Un taux de pauvreté élevé réduit également la probabilité qu'une activité de vente au détail s'établisse dans un secteur.

Bollinger et Ihlanfeldt utilisent des données de 1985 à 1997 à l'échelle des secteurs de recensement (tels que définis en 1980). La variable dépendante utilisée dans l'analyse de régression est la part des emplois régionaux. Des variables nominales définissent si un secteur de recensement donné – parmi les 229 contenus dans l'échantillon d'étude – est éligible aux programmes d'incitation fiscale. La variable dépendante étudiée est l'évolution annuelle du ratio d'emplois régionaux. Des variables de contrôle sont également utilisées. Tout comme d'autres travaux, cette étude constate que le taux d'imposition n'est pas lié au ratio d'emplois régionaux de manière statistiquement significative. Néanmoins, les crédits d'impôt agiraient comme des catalyseurs attirant les emplois manufacturiers. Les auteurs de l'étude parviennent également à la conclusion intéressante que la criminalité entraîne un taux d'emploi total plus faible, mais est aussi corrélée à la présence d'industries manufacturières. Cette conclusion, cohérente avec celle de (Greenwood & Stock, 1990), suggère que taux de criminalité élevé et bas loyers sont

corrélés, et attirent les industries manufacturières ayant besoin de beaucoup d'espace. Bollinger et Ihlanfeldt constatent également que l'amélioration des routes entraîne une hausse du taux d'emploi – une conclusion peu fréquente dans la littérature.

Dans un document de travail, Maoh et coll. (2005) étudient la mise en place d'un modèle simulant les choix de localisation des entreprises à Hamilton, Ontario. Leur approche combine plusieurs théories établies, comme le modèle intrants-extrants et le modèle des choix discrets. Ils notent que « dans le cadre du modèle des choix discrets, l'espace urbain est typiquement divisé en un ensemble de zones discrètes formant l'ensemble des choix de localisation. Le choix de localisation des entreprises est modélisé comme étant le choix d'une zone maximisant l'utilité de l'entreprise par la maximisation de son profit » (Maoh et coll., 2005, p. 3). L'utilité d'une entreprise sur un site donné est définie par la combinaison des caractéristiques du site et de l'entreprise.

Les travaux de Levinson et Krizek (2008) et Hernandez et Bennison (2000) décrivent les caractéristiques précises recherchées par les entreprises. Ces caractéristiques incluent par exemple l'accès à une intersection ou la présence de signalisation routière. Un tel niveau de détail peut être nécessaire pour localiser une entreprise particulière au niveau local, mais il est tout de même possible de modéliser correctement la localisation d'une entreprise d'industrie primaire, manufacturière ou de vente au détail à partir de quelques données-clés sur l'entreprise (nombre d'employés, secteur, âge, etc.) et sur les terrains disponibles (distance au centre, main-d'œuvre disponible à l'intérieur du bassin de migration pendulaire, taxes foncières, etc.).

Le travail de Mejia-Dorantes, Paez, et Vassallo (2011) sur l'impact de l'amélioration des infrastructures de transport sur l'activité économique à Madrid se situe dans la même lignée. Cette étude utilise un modèle logit multinomial, dérivé du travail de McFadden sur l'utilité aléatoire, pour prédire les choix de localisation des entreprises de catégories définies au moyen d'une approche probabiliste. Les auteurs concluent que l'amélioration des infrastructures de transport augmente la probabilité qu'un site soit choisi par une entreprise. À partir d'informations sur le nombre de sites disponibles dans chaque zone, le modèle détermine la probabilité qu'une activité k s'implante sur un site donné en fonction de la présence ou non d'autres entreprises dans la zone en modélisant les effets d'agglomération et de différenciation au sein des divers types d'activités. Afin d'améliorer le pouvoir prédictif du modèle, une matrice de pondération spatiale est également incorporée au modèle. Les résultats indiquent que la proximité d'une nouvelle infrastructure ferroviaire lourde (Metrosul) augmente la probabilité qu'un site soit occupé.

Économies d'agglomération

La partie précédente a présenté un grand nombre d'approches utilisées et de facteurs identifiés pour leur influence sur les choix de localisation des entreprises. L'un des facteurs fréquemment mentionnés est le concept d'économie d'agglomération. Les économies d'agglomération sont une forme d'interaction spatiale, dans la mesure où la proximité entre les agents génère des avantages économiques. Ces avantages ont été étudiés à de nombreuses occasions par le passé, généralement en mesurant le ratio d'occupation du sol par d'un type d'entreprise donné

(Mejia-Dorantes, Paez, & Vassallo, 2011), défini selon la classification SIC aux États-Unis. Levinson et Krizek (2008) utilisent les concepts de complémentarité et de compétition pour décrire les choix de localisation des entreprises. Dans leur analyse du secteur de la vente au détail, ils expliquent que toutes les activités ne se localisent pas pour répondre à un besoin, mais que certaines entreprises essaient plutôt de s’implanter à proximité de leurs concurrents pour améliorer leur productivité ou leur attractivité auprès des consommateurs. Levinson et Krizek utilisent l’exemple des librairies et des stations-service pour illustrer les différences de comportement entre ces deux types d’activités. Pour une activité comme une librairie, la proximité de concurrents attire les acheteurs potentiels en offrant une sélection de produits plus large et la possibilité de comparer les prix. À l’inverse, les clients d’une station-service ne recherchent pas une gamme de produits attractifs, mais plutôt un produit ou un service relativement peu distinctif. Les économies d’agglomération peuvent minimiser les coûts d’échange ou de production.

LaFountain (2005) offre un exemple d’étude empirique sur cette question. Elle examine la relation existant entre différents types d’entreprises et les économies d’agglomération qu’elles engendrent. À l’aide des concepts classiques d’avantage naturel, de localisation, d’urbanisation, et d’accès au marché, LaFountain tente de décrire la manière dont les interactions spatiales peuvent influencer le marché foncier résidentiel local. Comme expliqué par la théorie économique développée dans son article, le loyer de la terre est utilisé en raison de ses relations prévisibles et vérifiables avec la productivité industrielle, le pourcentage d’emplois dans différentes industries, et la diversité des emplois locaux. L’auteur teste ces relations au moyen de données sur les industries manufacturières, classées par code SIC à deux chiffres et par comté pour 48 États américains, en utilisant une analyse classique de régression multiple.

Les effets d’agglomération se révèlent être différents pour les entreprises des secteurs dépendants de la proximité d’intrants spécialisés, de la proximité de leur clientèle, ou de la proximité d’entreprises susceptibles de générer des retombées positives. En particulier, LaFountain constate que les résultats pour l’industrie textile, papetière, chimique, pétrolière, charbonnière, électronique, et des instruments sont cohérents avec les prédictions du modèle de l’avantage naturel. La proximité des intrants dont elles dépendent occupe une importance de premier plan dans les choix de localisation de ces industries. Les industries alimentaires, des produits métalliques, des machines et des équipements industriels apparaissent quant à elles privilégier l’accès au marché. De ce fait, les choix de localisation de ces industries sont guidés par la proximité de leurs clients. Enfin, les industries textiles et manufacturières semblent rechercher des économies d’urbanisation – elles s’établissent dans les zones offrant une large variété d’emplois.

Résumé

Comme on peut le voir, un grand nombre d’approches ont été adoptées pour étudier empiriquement le choix de localisation des entreprises et de nombreux facteurs ont été identifiés comme ayant une influence sur ces choix. Les facteurs s’avérant les plus importants sont assez intuitifs. Ils incluent le coût/loyer de l’emplacement, la taille du terrain, et le taux de criminalité. Les infrastructures de transport se révèlent importantes lorsque l’analyse est conduite à une échelle fine. L’accessibilité et la proximité des clients ou de la population

occupent aussi une place importante. Enfin, selon les types d'activité, la proximité d'autres entreprises se révèle souvent être un facteur important, ce qui corrobore la théorie des économies d'agglomération. L'approche la plus répandue pour modéliser la localisation des emplois est d'utiliser le cadre de l'utilité aléatoire, et en particulier, le cadre des choix discrets.

Études empiriques sur la localisation des ménages

La partie précédente a présenté la recherche empirique sur la localisation des entreprises. Cette partie traite de la recherche empirique sur la localisation des ménages. Elle expose les thèmes les plus répandus dans la littérature et la manière dont ils s'articulent avec les modèles analytiques fondamentaux, en particulier le modèle monocentrique d'Alonso.

Modèles d'offre de loyer du type Alonso-Mills-Muth

Dans le modèle d'Alonso, la « ville est envisagée comme une aire résidentielle circulaire entourant un quartier d'affaires central » dans lequel sont situés tous les emplois (A Anas, Arnott, & Small, 1998, p. 1434). On attribue une certaine utilité aux ménages en fonction de la taille de leur terrain et du coût de leurs déplacements pendulaires. À l'aide de ces informations, on établit leur offre de loyer, puis les ménages sont distribués sur des terrains à une distance donnée du centre. Puisqu'ils sont insensibles à la taille du terrain ou au coût de déplacement qui leur sont attribués, l'unique préoccupation de ces agents économiques identiques et mobiles est de maximiser leur utilité (A Anas et coll., 1998). Les ménages enchérissent sur toutes les localisations potentielles, et puisque les propriétaires cherchent aussi à maximiser leur profit, « chaque terrain est attribué au plus offrant » (ibid., 1435).

Ce modèle schématique, qui suppose qu'il n'existe pas d'externalités et que les agents sont des maximisateurs d'utilité disposant d'une information parfaite, est le fondement de la plus grande partie de la littérature sur les choix de localisation. Les auteurs successifs ont ajouté à ce modèle des niveaux de complexité supplémentaires pour intégrer les formes urbaines, les systèmes de transport, ainsi que des agents plus complexes que ceux décrits dans le modèle de base. Néanmoins, le modèle fondamental demeure celui conçu par Alonso à partir des travaux de von Thünen.

Muth (1961) constate que les villes ont un gradient de densité diminuant proportionnellement à l'éloignement du marché (représenté par l'hypercentre). L'auteur cherche à comprendre les facteurs déterminant ce gradient de densité et teste explicitement la théorie selon laquelle l'intensité résidentielle ne diminue pas seulement dans certaines villes-centres, mais dans tous les centres métropolitains. Il teste cette théorie en 1961 au moyen d'un échantillon de données issues du recensement américain de 1950, portant sur les zones statistiques métropolitaines de 46 villes américaines. Sa conclusion est que l'intensité d'usage, ou l'intensité résidentielle, peuvent être décrites comme une fonction exponentielle négative s'étendant à partir du centre-ville. Sa théorie est fondée sur l'idée que tous les travailleurs cherchent à accéder au centre-ville, ce qui entraîne une augmentation des coûts de déplacement pendulaires au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Le travail de Muth a non seulement démontré que le prix des logements déclinait avec la distance au centre, mais aussi qu'il déclinait rapidement près du centre et beaucoup plus progressivement au-delà.

Au-delà de ce simple constat géographique, (Muth, 1961) a étudié les facteurs affectant la baisse de la densité. Puisque les loyers sont affectés par le coût des déplacements plutôt que par la distance en soi, Muth postule que l'amélioration des infrastructures de transport, en réduisant les frictions spatiales, « incite tous les ménages à s'éloigner du marché » (Muth, 1961, p. 208), de manière à augmenter leur consommation de logement tout en conservant la même utilité. Cette idée devait revenir fréquemment dans la littérature des 50 années suivantes sur la répartition des activités dans les villes, alors que les améliorations du réseau routier diminuaient le coût des déplacements (Filion, Bunting, & Warriner, 1999; Kim, Pagliara, & Preston, 2005). Muth constate que quasiment toutes les villes de son échantillon (40 sur 46) présentent des gradients de densité exponentiellement négatifs, mais le résultat le plus intéressant est qu'il existe d'importantes variations entre les villes. Pour expliquer ces variations, (Muth, 1961) étudie l'hypothèse selon laquelle des facteurs tels que les faibles coûts de transport, la décentralisation de l'emploi, les hauts salaires, et la mauvaise qualité des logements, réduisent la prime que les ménages sont prêts à payer pour habiter en centre-ville. Annonçant de nombreuses études à venir suite à l'assouplissement du modèle monocentrique, Muth (1961) fait référence à certains aspects de la théorie de la centralité et de la hiérarchie des lieux de Christaller – comme l'implantation de commerces de détail en fonction de marchés locaux et la diminution de la prime payée pour les terrains centraux. Il affirme que l'amplification de ce phénomène de dispersion engendre une diminution de la prime d'accessibilité acquittée par les ménages – un phénomène qui s'est vérifié dans les villes d'Amérique du Nord.

Proximité du site de relocalisation et coûts de recherche

Ajoutant une dimension nouvelle au modèle de l'offre de loyer, Brown & Moore (1970) se penchent sur le coût de l'information. Les modèles classiques d'offre de loyer d'Alonso, Mills et Muth reposent sur l'hypothèse implicite que les ménages choisissant une localisation connaissent parfaitement l'état du marché, et que le marché connaît parfaitement l'offre potentielle de chaque agent. Brown & Moore (1970) étudient la diminution de la distance d'information en fonction de l'éloignement du centre. Cette tendance, comme celle de la diminution de la densité décrite par (Muth, 1961), veut que plus on s'éloigne du centre, ou de n'importe quelle aménité, plus l'accessibilité de cette aménité et son influence sur les ménages sont faibles.

Les auteurs postulent que l'accès aux informations concernant l'état du marché diminue aussi avec la distance. En postulant que la connaissance du marché (prix et disponibilité des terrains par exemple) diminue avec la distance, (Brown & Moore, 1970) introduisent l'idée que, lorsqu'ils choisissent un nouveau lieu de résidence, non seulement les ménages cherchent à minimiser leurs coûts de déplacement, mais les choix de localisation dont ils disposent dépendent de leur localisation actuelle. Cette prise en compte du contexte spatial dans lequel s'inscrivent les choix de localisation des ménages est capitale, car elle s'applique aussi aux aménités, aux corrélations spatiales, etc.

En observant la propension des ménages à changer de résidence, (Brown & Moore, 1970) notent qu'un ménage doit connaître les caractéristiques des choix de localisation qui s'offrent à lui pour pouvoir prendre la décision de déménager – après avoir comparé les options disponibles et calculé les avantages qu'il aurait à se relocaliser. C'est-à-dire qu'un ménage doit

comparer l'utilité de sa localisation actuelle avec l'utilité estimée d'une autre localisation. (Brown & Longbrake, 1970) définissent l'utilité d'un lieu comme étant « la somme nette des utilités dérivées de l'intégration d'un individu dans l'espace (localisation) » ou la « mesure de l'attrait ou du manque d'attrait d'un lieu par rapport à des lieux alternatifs, telle que perçue par un décideur individuel » ((Brown & Longbrake, 1970), p.369).

L'espace dans lequel s'inscrit cette recherche de conditions optimales est appelé espace d'action. Les lieux sur lesquels les ménages disposent des informations les plus précises avant de se lancer dans la recherche d'une nouvelle résidence sont les lieux situés dans leur espace d'activité – c'est-à-dire les lieux qu'ils fréquentent le plus (Brown & Moore, 1970).

Effets du temps de transport sur la localisation de ménages

Décentralisation

Selon A Anas et coll. (1998), les deux questions le plus étudiées dans la littérature sur la structure urbaine sont la concentration à l'échelle de la ville et à l'échelle locale. À l'échelle de la ville, le débat concerne la centralisation et la décentralisation des activités, alors qu'à l'échelle locale, les activités peuvent être regroupées ou dispersées. Dans leur description de la forme urbaine, A Anas et coll. (1998) décrivent les différentes évolutions technologiques successives ayant façonné la structure des villes. En particulier, ils constatent que dans les villes exclusivement piétonnes, les habitants les plus riches résidaient au centre alors que les pauvres habitaient dans les quartiers périphériques. Dans les banlieues dépendantes du tramway, les habitants les plus riches étaient regroupés autour des stations de tramway. La démocratisation de l'automobile et des infrastructures de transport bouleversèrent la forme urbaine en profondeur, engendrant une dispersion des activités, le développement spatialement discontinu (saute-mouton) du territoire et le développement des municipalités périurbaines. Ces évolutions technologiques peuvent expliquer la diminution progressive des gradients de densité, présentée par (A Anas et coll., 1998), d'après les travaux de Clark. Ils notent que « ... l'explication classique de la décentralisation est une combinaison de l'augmentation des salaires et de la baisse des coûts de transport, engendrant une diminution du gradient de densité selon le modèle monocentrique » (A Anas et coll., 1998, p. 1437).

Ménages à double salaire et différences hommes/femmes

La question des ménages à double revenu est de plus en plus importante dans les pays occidentaux. Comme noté par (Mok, 2007), la proportion « de familles à doubles revenu parmi les couples avec enfants au Canada est passée de 20% à plus de 70% entre 1961 et 1990 » ((Mok, 2007), p.723). Dans son étude des choix de localisation des ménages à Detroit, (Kain, 1962) décrit les différences de temps de transport entre hommes et femmes. Il constate que les femmes se déplacent moins que les hommes et explique ce phénomène par leur rôle de « source de revenus secondaire », qui les conduit à « adopter une attitude plus souple quant à la recherche d'emploi » (Kain, 1962, p. 146). Une autre raison évoquée par Kain pour expliquer les déplacements plus courts des femmes est que leurs lieux de travail sont souvent proches de ceux de leurs maris. Ainsi, les ménages à doubles revenu doivent prendre en compte les coûts de déplacements vers deux emplois situés l'un proche de l'autre. La désutilité engendrée par les déplacements pendulaires est donc plus grande pour ces ménages que pour ceux dont seul

l'un des membres est employé. Les ménages à double salaire sont ainsi prêts à payer davantage pour habiter proche de leur lieu de travail.

White (1977) remet en question ces conclusions. Elle utilise la théorie économique, plutôt que la rhétorique, pour expliquer les différences de temps et de distances de transport entre hommes et femmes. Elle postule que les ménages sont des agents économiques rationnels et formule l'hypothèse qu'ils cherchent à minimiser leur coût total de déplacement plutôt que celui du mari ou de la femme en priorité. Dans la conception de la ville de White, les emplois sont situés au centre-ville, mais aussi en périphérie. Pour simplifier le modèle, elle suppose que les hommes travaillent exclusivement dans le centre, et les femmes exclusivement en périphérie. La conséquence est « quelle que soit la position initiale des courbes d'offre, ... à l'équilibre, les ménages à doubles salaire sont prêts à payer davantage que les ménages à simple salaire dans la zone où se trouvent [les emplois périphériques] » (White, 1977, p. 49). Puisque c'est dans cette zone que les femmes sont employées d'après ce modèle, leur temps de déplacement sera donc inférieur à celui des hommes.

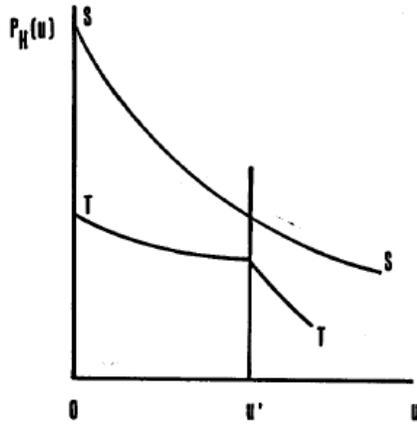


FIGURE 2: Single- and Two-Worker Household Offer Curves for Housing.

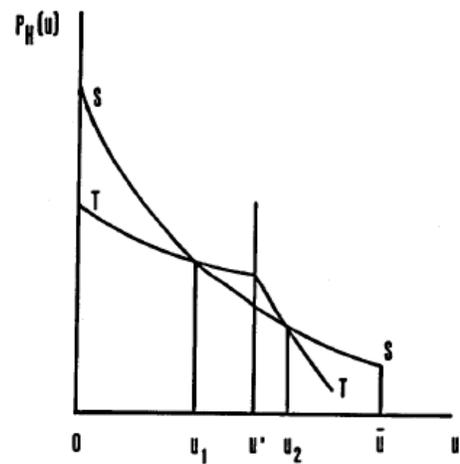


FIGURE 3: Housing Market Equilibrium.

Figure 4 – Offre des ménages et équilibre du marché selon White (1977); les offres « gagnantes » des ménages à double salaires se trouvent entre u_1 et u_2 sur la figure de droite.

Si l'on postule que les hommes travaillent au centre et que les femmes travaillent en banlieue, la rationalité économique suppose que les hommes doivent faire face à une compétition plus forte sur le marché de l'emploi et de la localisation. Ceci entraîne une élévation des courbes de demande et une accentuation de la pente des courbes d'offre de loyer pour les quartiers centraux (White, 1977). Le graphe d'équilibre du marché résidentiel ci-dessus met en évidence la zone pour laquelle les ménages à double salaires offrent un loyer plus élevé que les ménages à simple salaire, en cherchant à minimiser rationnellement le coût total des déplacements du ménage. Ainsi, « les postulats irrationnels selon lesquels les femmes seraient des travailleurs secondaires dilettantes sans attachement réel au monde du travail sont superflus pour expliquer ce résultat » (White, 1977, p. 51). Cet argument marque une rupture dans l'acceptation des explications de sens commun pour modéliser les choix résidentiels des ménages et constitue une avancée vers un mode de raisonnement plus scientifique.

Adoptant une approche originale des choix de localisation des ménages à double revenu, Mok (2007) étudie plus particulièrement l'axiome selon lequel ces ménages mutualisent leurs revenus, ainsi que les effets de la présence d'enfants sur leurs choix. Elle suggère que « les choix résidentiels des ménages à double salaire sont affectés non seulement par la composition de ces ménages, mais aussi par la répartition des contributions entre les membres du ménage » (Mok, 2007, p. 725). En d'autres termes, un ménage de deux personnes dont les revenus combinés seraient de \$200,000 ne fait pas les mêmes choix qu'un ménage dont seul l'un des deux conjoints travaille et gagne \$200,000. Mok (2007) estime le logit multinomial des choix de localisation à partir d'anneaux concentriques entourant l'hypercentre et teste si le partage des revenus et la présence d'enfants ont un impact sur les choix résidentiels des ménages. Ses hypothèses sont fondées sur des modèles comportementaux de négociation. À partir des fichiers de microdonnées publiques sur les familles, issues du recensement canadien de 1996, Mok (2007) constitue des échantillons de jeunes ménages locataires et teste ses prédictions de localisation pour les ménages avec et sans enfants. Pour les ménages avec enfants, le modèle logit multinomial standard ayant une fonction d'utilité unique est valide, mais les résultats diffèrent pour les familles sans enfant. Sa principale conclusion est que pour les familles sans enfant « le choix d'un lieu de résidence par rapport au lieu de travail est beaucoup plus influencé par le revenu de la femme que par celui du mari » ((Mok, 2007), p.744). Concernant les familles avec enfants, « les deux parents employés ont tendance à vivre plus loin de leur lieu de travail » ((Mok, 2007), p 742).

Il faut souligner que les différences hommes femmes et l'importance des ménages à double salaire sont très liées à l'époque, à la culture et à la région d'étude. Bhat et Guo (2004), par exemple, dans leur étude des déplacements pendulaires entre Dallas et Fort-Worth à partir de données de 1996, ne constatent pas de différences statistiquement significatives entre hommes et femmes. À l'inverse Prashker, Shiftan et Hershkovitch-Sarusi (2008) constatent des différences significatives dans leur étude de Tel-Aviv, Israël, fondée sur des données du recensement de 1995. Prashker et coll. (2008) commencent par étudier l'hypothèse de la responsabilité du ménage, « qui affirme que les femmes se déplacent moins que les hommes parce qu'elles s'occupent davantage des enfants et de l'entretien du foyer » (334) en utilisant des données issues du recensement israélien dans un modèle logit de choix pour estimer les choix. Leur approche postule que la localisation des emplois est exogène, et teste la probabilité de choisir un lieu de résidence selon un lieu d'emploi. Les résultats indiquent que la sensibilité à la distance du lieu de travail est significative pour tous les individus, mais à plus forte raison pour les femmes, et ce, pour toutes les classes de salaires (Prashker et coll., 2008). Cette « forte sensibilité à la distance, [y compris] parmi les femmes ayant des salaires élevés » (Prashker et coll., 2008), p.339) pourrait résulter de facteurs culturels restreignant le temps que les femmes peuvent passer à l'extérieur du foyer, ce qui les rendrait plus enclines à payer des prix élevés pour résider près de leur lieu de travail. De manière surprenante, la situation familiale et le statut d'occupation n'apparaissent pas être des variables explicatives significatives dans ce modèle de choix résidentiel (Prashker et coll., 2008).

Polycentrisme, dispersion et incertitude

(A Anas et coll., 1998) se penchent sur l'effet de la localisation de centres d'emploi multiples comme facteur de choix résidentiel pour les ménages. Il existe de nombreuses façons de

calculer l'impact de ces centres d'emploi. On peut tout d'abord considérer que ces centres sont des substituts parfaits les uns des autres, et que « ... chaque centre génère donc sa propre fonction d'offre de loyer » (A Anas et coll., 1998, p.1441) – les ménages étant uniquement sujets à l'influence du centre le plus proche d'eux ou de leur résidence potentielle. Puisqu'il n'y a pas de chevauchement des zones d'influence dans cette approche, un ménage situé entre deux centres majeurs ne se comportera pas différemment d'un ménage situé à la même distance d'un centre unique. Pour illustrer cette conception de l'influence des centres d'emploi, on peut penser aux zones de livraison d'un centre de distribution régional : il n'existe aucun avantage à se trouver à proximité de deux centres puisque seul le centre le plus proche livrera des biens en temps normal.

Les centres d'emploi peuvent aussi être conçus comme étant complémentaires. Dans cette approche, on prend en compte l'accès à tous les centres pour mesurer l'accès à l'emploi depuis un lieu donné. Ainsi, si deux centres sont à proximité et qu'un troisième se trouve plus loin, la proximité des deux centres ne suffit pas à maximiser l'accessibilité; il faut prendre en compte les trois centres. Cette conception de l'accessibilité et de la minimisation potentielle des déplacements n'est pas très intuitive, car il n'y a pas de raison qu'un agent ait besoin de minimiser sa distance à tous les centres à la fois; il lui suffit de minimiser sa distance aux centres dans lesquels se situent ses activités.

Enfin, A Anas et coll. (1998) proposent une approche cumulative, dans laquelle l'accessibilité de chaque centre est représentée par une fonction d'offre de loyer individuelle, mais où les fonctions d'offre de loyer de tous les centres sont additionnées à un certain point. Cette approche est la plus réaliste, car elle tient compte de « la somme des influences de plusieurs centres diminuant exponentiellement » ((A Anas et coll., 1998), p.1442). Cette méthode supprime les erreurs causées par la localisation d'un ménage loin d'un centre en particulier, tout en tenant compte de l'accès aux centres dont l'accessibilité est élevée pour le ménage.

Dans la lignée de cette approche cumulative de l'accessibilité des centres d'emploi, Yiu (2011) étudie les choix de localisation dans les villes polycentriques. Plutôt que de pondérer simplement l'importance des centres d'emploi en fonction du nombre d'emplois divisé par la distance, les auteurs s'inspirent de la théorie de l'investissement et postulent que l'incertitude relative à la fréquence de travail dans un lieu ou dans un autre affecte les choix de localisation des individus. Tout comme dans la théorie du portefeuille, certains investisseurs sont enclins à investir massivement dans un type d'action, mais la plupart des investisseurs avertis au risque choisissent de diversifier leur portefeuille d'actions. Les auteurs expliquent comment la décentralisation des emplois, l'augmentation du nombre de travailleurs par ménage, et même l'augmentation du nombre de lieux de travail par travailleur augmentent l'incertitude de l'emploi.

Utilisant un modèle à deux centres et deux lieux de travail tenant compte de l'incertitude, Yiu (2011) démontre comment une telle configuration peut non seulement affecter les choix de localisation des ménages, mais peut aussi, par le biais de rétroactions, conduire à la création de nouveaux centres secondaires. Les ménages cherchent à s'établir stratégiquement entre deux centres principaux pour réduire les incertitudes relatives à leurs revenus, à leurs coûts de déplacements, à la qualité et aux externalités du quartier, et aux coûts d'entretien du logement.

Ce faisant, ils accentuent la demande pour les localisations stratégiques situées entre deux centres. Ceci provoque un ajustement du gradient d'offre de loyer et peut finalement conduire à l'émergence d'un nouveau centre. La démonstration empirique proposée par les auteurs est une étude des prix de marché le long d'une ligne de chemin de fer reliant Hong Kong à Shenzhen. Observant l'évolution du marché immobilier sur 15 ans, ils démontrent que les loyers des logements proches d'une gare stratégiquement située entre deux centres urbains ont augmenté plus rapidement que les loyers dans ces deux centres. Cette approche originale de la question de l'accessibilité dans les choix de localisation des ménages est particulièrement intéressante, car elle intègre le concept d'incertitude, un concept compatible avec la théorie de l'utilité aléatoire, en plus intuitif.

Selon Filion et coll., la dispersion est « associée à une diminution de l'importance de l'espace et une augmentation équivalente de l'importance du lieu et de la proximité » (Filion et coll., 1999, p. 1318). Les auteurs expliquent que « la dépendance croissante à l'automobile, les investissements massifs dans les voies rapides et les grands axes, et la dispersion des activités, révélant et accentuant le nivellement des gradients d'accessibilité », ont réduit le poids de l'accessibilité régionale (Filion et coll., 1999, p. 1321). Filion et coll. (1999) expliquent comment l'accessibilité des centres d'emploi et des centres de vente a été bouleversée par la dispersion des espaces commerciaux – un processus similaire à la décentralisation des emplois, affectant la quête d'aménités des ménages et non la minimisation de leur temps de déplacement.

Bien que la plupart des études décrivent des résultats observés aux États-Unis – et l'on pourrait penser que le Canada est moins affecté par la dispersion des activités – (Filion et coll., 1999) soutiennent que les aires métropolitaines canadiennes sont de plus en plus sujettes aux mêmes tendances que les villes américaines en matière d'« affaiblissement de l'hypercentre et de prédominance de la dispersion sur le polycentrisme » ((Filion et coll., 1999), p.1321). Cette tendance touche en premier lieu les quartiers périphériques du fait de l'uniformité de leurs formes urbaines, mais dans un contexte de diminution de la taille des ménages et d'expansion de la population, elle modifie aussi fortement la distribution générale de la population et des activités.

Filion et coll. (1999) concluent que « seule une crise énergétique profonde et prolongée pourrait mettre un terme à la dépendance à l'automobile, et donc à la dispersion » ((Filion et coll., 1999), p.1339). Cette conclusion suggère que les tendances évoquées dans l'étude ne sont que le début de changements régionaux qui verront les édifices du centre-ville progressivement remplacés par des logements et des entreprises plus récentes – ce qui entraînera encore davantage de décentralisation quand ces usages seront remplacés par de nouvelles structures au goût du jour.

Offre de logement, inadéquation spatiale et influence des promoteurs immobiliers

L'offre de logement (diversité et disponibilité) est un facteur important dans l'analyse des choix de localisation des ménages. Chez Brown et Moore (1970), ce facteur est mentionné comme étant une source d'erreur pouvant conduire à une interprétation erronée des coefficients et une compréhension faussée des préférences des ménages. L'offre de logement suffisante pour

offrir un potentiel de sélection aux ménages est un sujet d'intérêt majeur pour (Brown & Longbrake, 1970). Ils affirment qu'il faut interpréter les préférences des migrants avec prudence, car la prévalence générale des logements de mauvaise qualité conduit à une plus forte sélection de ces logements. Lorsque l'on étudie des données réelles sur la relocalisation des ménages, il est important de garder à l'esprit que le logement est un bien durable qui ne disparaît pas lorsqu'un ménage change de domicile. Le logement perdure, mais a tendance à se détériorer dans le temps et lorsqu'il change d'occupant, passant d'un groupe social ou de revenu à un autre. (Bhat & Guo, 2004) évoquent ce type de problèmes dans leur étude lorsque leurs résultats indiquent que les ménages sont plus susceptibles de s'installer dans les quartiers les plus denses. Ces résultats sont contraires à la plupart des études portant sur les préférences des ménages, ce qui « pourrait être dû une offre de logement plus abondante dans ces zones » (Bhat & Guo, 2004, p. 161); c'est-à-dire qu'en raison d'un taux de vacance particulièrement élevé, le modèle risque d'interpréter erronément les déménagements vers ces zones comme étant le signe d'une préférence des consommateurs.

L'importance de l'offre de logements et de la variété de choix pour analyser un cas concret est mise en lumière par les travaux de (Brown & Longbrake, 1970) établissant que « l'analyse de l'attractivité d'une zone révèle une forte relation inverse entre la qualité des logements et la probabilité de migration vers cette zone » (380). Les ménages ne sont pas attirés par les logements de mauvaise qualité, mais le marché est saturé par ce type de biens en raison de leur taux de vacance élevé. Si l'on se contente de regarder les chiffres bruts des migrations, on pourrait penser que les ménages cherchent en priorité des logements de relativement basse qualité. Selon Brown et Longbrake, « bien qu'il semble évident que les ménages ne puissent pas s'établir dans les zones dépourvues de logements disponibles, les géographes ont souvent négligé la dimension spatiale du marché résidentiel – incluant à la fois les vacances et les logements neufs » (Brown & Longbrake, 1970, p. 383).

La forte mobilité dans les quartiers relativement modestes peut être interprétée comme étant le signe que les ménages les plus défavorisés d'un quartier sont davantage susceptibles de chercher à déménager vers un quartier dans lequel ils augmenteront leur utilité spatiale en termes absolus, que de chercher à améliorer leur utilité spatiale relative en déménageant vers un meilleur logement, tout en restant dans le même quartier (Brown & Longbrake, 1970). Si les membres d'un ménage préfèrent conserver leur niveau de vie dans le quartier où ils résident, cette préférence sera renforcée par la forte mobilité entre quartiers à faible utilité spatiale dans toute zone offrant un large échantillon de migrations de ce type. On peut aussi interpréter ce phénomène comme signifiant que les ménages sont plus mobiles lorsqu'ils attachent davantage d'importance aux caractéristiques de leur quartier que de leur logement. C'est-à-dire que les ménages pour lesquels les caractéristiques du quartier comptent plus que celles du logement semblent plus enclins à déménager. Cette tendance semblerait indiquer une mobilité verticale sociale absolue plutôt que relative (Brown & Longbrake, 1970).

A Anas et coll. (1998) évoquent les insuffisances du modèle statique de base pour décrire les choix résidentiels des ménages. Ils reconnaissent qu'un défaut majeur des modèles comme celui de l'offre de loyer, ou de son adaptation par Wheaton et d'autres auteurs, est que « ... la durée de vie typique des bâtiments dépasse largement le cadre temporel à l'intérieur duquel on

peut considérer que les paramètres du modèle restent inchangés » ((A Anas et coll., 1998) p.1436). Ils ajoutent que les villes « ... ont tendance à croître vers l'extérieur par l'ajout d'anneaux de logements dont la densité reflète les conditions économiques contemporaines – la densité des anneaux antérieurs restant inchangée du fait de la durabilité des logements » (A Anas et coll., 1998, p. 1439). Ceci engendre des distorsions entre les choix de localisation des ménages dans la mesure où les préférences et la taille des familles changent fortement entre les générations, ce qui aboutit à une forme d'inadéquation spatiale généralisée.

Tournons-nous maintenant vers le rôle des promoteurs immobiliers. Puisque les ménages ne bénéficient pas de toutes les économies d'échelle de l'effet d'agglomération, les promoteurs immobiliers sont amenés à jouer un rôle majeur dans le choix des zones à bâtir et le type de constructions qui s'y développent. Pourtant, le rôle des promoteurs dans le développement de la ville est relativement mal connu (A Anas et coll., 1998). Néanmoins, il serait injustifié de reprocher aux promoteurs la création d'une offre incompatible avec les besoins de la population. En effet, d'après Filion et coll., seule une minorité des acheteurs considère que son choix idéal de résidence a été « contraint par un manque de disponibilité » (Filion et coll., 1999, p. 1335). Ceci pourrait signifier que les ménages sont très flexibles et acceptent l'offre disponible sur le marché, ou que l'offre disponible satisfait effectivement les besoins des acheteurs potentiels.

Le rôle du logement en tant qu'investissement est évoqué par (Filion et coll., 1999), qui notent qu'« un choix de localisation judicieux peut produire des bénéfices considérables » ((Filion et coll., 1999), p.1320). Tout comme l'influence des promoteurs immobiliers, il s'agit d'une force du marché que les modèles doivent intégrer pour prédire la mobilité des propriétaires de logements. Dans la mesure où les prix fluctuent en réponse à diverses tendances, ne pas prendre en compte le fait que les ménages cherchent à acheter à bas prix et à vendre au prix fort (ainsi qu'à éviter la situation inverse), constitue un défaut de modélisation, tout comme le fait de ne pas prendre en compte la dimension temporelle des évolutions du marché.

Autres facteurs affectant les choix de localisation des ménages

Dans la littérature étudiant l'influence des aménités sur la localisation des ménages, différents types d'aménités ont été définis et leur influence pondérée, parfois selon les caractéristiques des ménages ou la distance. Brown et Moore (1970) qualifient les aménités négatives de « stressseurs », car elles réduisent l'utilité résidentielle des ménages, qui peuvent ainsi être incités à changer de localisation. Selon les auteurs, les principaux facteurs influençant les choix de localisation des ménages sont l'accessibilité, les caractéristiques physiques du quartier, les services et les équipements, l'environnement social, et enfin, les caractéristiques propres au terrain et au logement. Ces facteurs sont définis de manière détaillée dans l'étude de Brown et Moore (1970), et sont fréquemment utilisés dans la littérature. Leur importance relative pour différentes études sera précisée.

Pour évaluer l'utilité de leur choix résidentiel, les ménages tiennent compte de trois catégories de caractéristiques selon (Brown & Moore, 1970) : les caractéristiques de l'unité d'habitation, les caractéristiques du quartier, et les caractéristiques de localisation. Les mêmes catégories sont utilisées par (Prashker et coll., 2008), et trois concepts très similaires le sont également

par (Filion et coll., 1999) sous les appellations de lieu, proximité et espace – ces concepts caractérisant un environnement résidentiel à plusieurs échelles.

Table 1. Space, place and proximity as factors of location

	Traditional monocentric city	Dispersed city
Space: metropolitan-wide accessibility	Accessibility to activities serving a metropolitan-wide market is of paramount importance in location decisions	Depleted importance of metropolitan-wide activities on location decisions because of generalised use of the car (leading to higher accessibility potential) and of a scattering of many activities previously concentrated in the core
Place: features of buildings, sites and of their surroundings	Preference for large lots and houses is frustrated by the space imperative	With a reduction of the space imperative, place comes to the fore as a factor of location. This leads to an enhanced influence of lot and structure size and of the character of surrounding areas (homogeneity, status, tranquillity ...)
Proximity: influence of close-by activities, amenities and disamenities	The targeting by activities of either metropolitan-wide and very local catchment areas is not conducive to middle-range proximity as a factor of location	Along with place comes increased attention to close-by amenities and disamenities. The tendency for activities to decentralise and target a segment of the agglomeration is also favourable to proximity as a factor of location

Figure 5 – Facteurs de localisation des ménages, Filion et coll. (1999)

(Filion et coll., 1999) choisissent de concentrer leur étude sur les « préférences résidentielles » de deux catégories de ménages ayant un impact considérable sur l'évolution globale de la forme urbaine : les ménages à hauts revenus et les ménages avec enfants ((Filion et coll., 1999), p.1318). Ils analysent l'« attachement prononcé aux grands terrains et aux grosses maisons », ainsi que certaines préférences individuelles telles que la recherche « d'un environnement calme, stimulant ... et esthétique » ((Filion et coll., 1999), p.1319). De telles préférences sont cohérentes avec le fait que les ménages accordent une importance croissante aux équipements locaux et valorisent moins l'accessibilité régionale. En raison d'une préférence croissante pour la banlieue dans les villes où l'accessibilité régionale n'est pas privilégiée, comme à Kitchener, la « tendance résidentielle a été de quitter les vieilles banlieues pour les banlieues nouvelles, pour finalement s'établir à la campagne » (Filion et coll., 1999, pp. 1329-1330). Parmi les aménités les plus prisées figurent la recherche d'une faible densité résidentielle et le désir d'intimité (Filion et coll., 1999). Ces préférences, ainsi qu'une attractivité fondée sur des caractéristiques diverses et la bonne accessibilité de Kitchener, ont été citées par les membres des groupes de discussion organisés par les auteurs (Filion et coll., 1999). « Le voisinage d'espaces ruraux (une caractéristique de proximité), de vastes parcs et espaces ouverts, l'absence de congestion, les grandes maisons ainsi que l'homogénéité visuelle et sociale (des caractéristiques de lieu), correspondent aux préférences de la majorité des répondants » (Filion et coll., 1999, p. 1335).

À l'inverse de ces résultats, Bhat et Guo (2004) établissent que les variables les plus significatives dans leur étude sont « la durée des déplacements pendulaires... la densité de population, la part d'un secteur occupée par des logements collectifs [les différences de revenu]... l'accès à l'emploi et aux commerces » (Bhat & Guo, 2004, p. 165) – les ménages recherchant des déplacements réduits, un faible pourcentage de logements collectifs, de faibles différences de revenu et de haut niveau d'accessibilité et de densité. Ces résultats, à l'opposé

de ceux de Filion et coll., illustrent la difficulté à identifier les préférences des consommateurs. Il est intéressant de noter que dans une autre étude utilisant une méthodologie similaire à laquelle l'un des auteurs a participé, « le degré d'accessibilité régionale n'apparaissait pas être statistiquement significatif pour expliquer les choix résidentiels » (Sener, Pendyala, & Bhat, 2011, p. 300). Les auteurs ont aussi observé que les ménages cherchaient à minimiser les disparités de revenus et la durée des déplacements (notons que les centres d'activité économique de la ville étudiée sont très dispersés, ou polynucléaires), tout en maximisant l'accès aux transports en commun et aux centres de loisirs récréatifs et sportifs. Le transport en commun est étonnamment peu souvent évoqué dans la littérature, peut-être en raison de biais d'échantillonnage considérant les villes étudiées – la plupart de ces villes sont situées aux États-Unis, où le transport en commun représente une part infime des déplacements. Bien qu'il s'agisse d'une ville canadienne, Kitchener a été étudiée spécifiquement à cause de sa structure décentralisée.

Brown et Longbrake (1970) cherchent à établir s'il existe une distance sociale que les ménages cherchent à minimiser lorsqu'ils choisissent un lieu de résidence. La différence entre le niveau social des quartiers d'origine et de destination a souvent été considérée comme un facteur de friction limitant les migrations entre deux zones. Néanmoins, les conclusions de Brown et Longbrake ne corroborent pas cette hypothèse. Les auteurs concluent plutôt que « les frictions migratoires entre quartiers de différents types ne sont pas très importantes » (Brown & Longbrake, 1970, p. 382).

Agglomération des ménages ou ségrégation

L'idée selon laquelle la ségrégation et les discriminations raciales influencent les choix résidentiels des ménages apparaît dès 1962 chez Kain (1962), et continue à être débattue trois décennies plus tard (Goodman, 1990). Steinnes et Fisher (1974) construisent un modèle structurel de localisation des ménages fondé sur un système d'équations linéaires stochastiques et constatent que des différences importantes subsistent entre populations blanche et noire, même après avoir contrôlé les variables « col blanc » et « col bleu » et le secteur d'emploi. Étudiant les coefficients de variables indépendantes en fonction de leur effet sur l'attractivité résidentielle d'une zone donnée, les auteurs observent « des signes opposés pour les deux groupes raciaux dans tous les cas, à deux exceptions près » (Steinnes & Fisher, 1974, p. 73). Une différence aussi sidérante dans les effets des variables sur les comportements individuels vaut assurément la peine d'être mise en contexte – les données utilisées dans cette étude décrivant Chicago dans les années 1950 et 1960.

Dans un article sur les structures spatiales urbaines, A Anas et coll. (1998) décrivent l'agglomération des ménages comme une force « encourageant la formation spatialement concentrée de capital (bâtiments) », ou comme une « force centripète » ((A Anas et coll., 1998) p.1427). Si l'on parle en général d'agglomération des entreprises, cet effet peut aussi concerner les ménages – au lieu de minimiser les coûts de communication ou d'interaction entre industries, l'effet d'agglomération est alors une forme de prolongation des externalités positives générées par une communauté.

Pour Filion et coll. (1999), les choix résidentiels reflètent le statut social d'un individu. Les choix de localisation définissent « le statut social et les valeurs des voisins avec qui l'on interagit, et surtout, des personnes que l'on souhaite tenir à distance » ((Filion et coll., 1999) p.1320). Cette description corrobore les études conduites sur l'homogénéité des quartiers, qu'elles portent sur la dimension raciale, architecturale, ou autre. La littérature fait état d'une préférence marquée pour les environnements résidentiels homogènes, au moins aux États-Unis (Filion et coll., 1999). Senet et coll. (2011), dans leur étude des choix de localisation à San Francisco, constatent également que les Blancs ont tendance à se regrouper entre eux.

Typologie et classification des ménages

Kain (1962) étudie l'influence du revenu sur les choix de localisation des ménages et constate que parmi des ménages ayant la même « fonction de loyer, la même fonction de coût de transport, les mêmes préférences spatiales, et la même valorisation du temps, mais des revenus [plus élevés], les ménages [à hauts revenus] effectuent des déplacements pendulaires plus longs » (Kain, 1962, p. 147). Pour tester cette théorie répandue dans la littérature, Kain classe les distances de déplacement des chefs de famille et constate qu'il existe une forte corrélation entre l'augmentation des revenus et l'allongement des déplacements. Il observe aussi que lorsque la taille d'un ménage augmente, ce dernier est susceptible de s'éloigner du centre afin de minimiser le prix de son loyer. Cette relation n'est cependant pas parfaitement linéaire, puisqu'au-delà d'une certaine taille, les ménages sont contraints par des pressions en matière d'approvisionnement, ce qui engendre une surpopulation les conduisant à accepter des logements plus petits (Kain, 1962).

De nombreuses explications justifiant les préférences des divers types de ménages ont été formulées dans la littérature. Kain (1962) explique que la banlieue est peu attirante pour les personnes seules et les jeunes couples sans enfant, car elle diminue leurs chances de socialisation, représentant ainsi une source d'ennui, d'isolement social et d'insatisfaction. Bien que cette explication reste d'actualité, les généralisations de ce type ont aujourd'hui été remplacées par des modèles statistiques complexes, comme ceux de Bhat et Guo (2004) ou de Sener et coll. (2011), cherchant à isoler les variables explicatives potentielles le plus objectivement possible.

Afin de diviser les différents types de ménages en plusieurs « sous-marchés », Brown et Moore (1970) proposent de prendre en compte « l'âge du ménage, la taille de la famille, et les lieux de travail », ainsi que « des caractéristiques socioéconomiques, les étapes du cycle de vie, etc. » (Brown & Moore, 1970, p. 3). Les résultats du travail de Bhat et Guo (2004) confirment « le phénomène de ségrégation résidentielle observé dans les études précédentes » ((Bhat & Guo, 2004)p.161) – mesurant les écarts de revenus par rapport au revenu moyen dans les zones d'origine et de destination des ménages. Comme bien d'autres auteurs Prashker et coll. (2008) constatent que la sensibilité à la distance de déplacement pendulaire est plus faible chez les ménages à hauts revenus.

Un point important rarement évoqué est que les individus, même lorsqu'ils sont répartis en différents groupes, n'arbitrent pas leur choix de manière parfaitement cohérente. Comme démontré par le travail de Kim et coll. (2005), les ménages ont de la difficulté à attribuer des

valeurs partielles aux aménités de manière économiquement rationnelle. Cette idée est reflétée dans « l'étude de Miller (1956) sur les perceptions individuelles, qui suggère que les objets peuvent rarement être distingués selon plus de neuf dimensions différentes » (Brown & Moore, 1970, p. 5). Cette limite pose évidemment un problème pour les choix de localisation des ménages, où différents facteurs entrent en jeu. White (1977) fait référence à des études plus anciennes établissant que différents types de travailleurs perçoivent différemment leurs coûts de déplacement par rapport à leurs salaires : « les employés de bureau valorisent leur temps de déplacement à 30% de leur salaire horaire » et les « cadres professionnels à 42% de leur salaire horaire » ((White, 1977), p.45). Ces chiffres varient fortement selon les zones géographiques, les modes de transport, le sexe et l'époque – on peut donc difficilement justifier de convertir le temps en une valeur monétaire pour effectuer des calculs économétriques.

Méthodes statistiques, structure de choix et isolation des facteurs

De nombreuses études ont comparé les résultats obtenus en utilisant différentes méthodes statistiques, ce qui a permis d'améliorer progressivement les méthodes utilisées et de mieux comprendre les mécanismes complexes influençant l'interprétation des résultats et l'isolation des relations observées. L'une de ces études a été conduite par Steinnes et Fisher (1974), qui concluent qu'en raison de la plus grande précision de la méthode des doubles moindres carrés (DMC) par rapport à celle des moindres carrés (MC), on peut conclure que les variables ayant trait à l'emploi sont de mauvais indicateurs pour prédire les choix résidentiels des Blancs et des Noirs à Chicago dans les années 1950-1960. Ce résultat est surprenant au vu du postulat, classique à l'époque, selon lequel les ménages suivent les industries primaires et manufacturières. Faute d'avoir comparé les résultats des deux méthodes, on aurait pu conclure à tort que les variables relatives à l'emploi avaient une influence importante sur les choix résidentiels de ces ménages.

Parmi les raisons pour diversifier les méthodes statistiques employées, on peut aussi citer l'importance croissante accordée au goût, ou le fait que différents ménages n'attribuent pas la même utilité à une aménité donnée (Goodman, 1990). Selon la théorie économique classique, tous les individus sont identiques, mais la théorie de l'utilité marginale a introduit l'idée que non seulement divers groupes d'individus répondent différemment à un même stimulus, mais aussi que les agents individuels n'ont pas les mêmes réponses. Comme (A Anas et coll., 1998) l'ont justement noté « les individus ont des préférences idiosyncrasiques pour des lieux particuliers, selon différentes combinaisons d'aménités locales et d'attachement pratique ou sentimental » ((A Anas et coll., 1998) p. 1444) – ces différences doivent donc être prises en compte pour décrire correctement les comportements des ménages. Dans le modèle de demande de logement construit par Goodman (1990), la demande pour un lieu est comprise comme étant fonction du revenu, du prix de vente, du taux de rendement, et enfin, d'un ensemble de variables démographiques. La complexité des approches mathématiques permettant d'interpréter les résultats (régression MC, logit, MNL, probit, mixte, hiérarchique, etc.) est accentuée par l'influence potentielle de l'ordre des variables sur le résultat. Goodman (1990) démontre par exemple que l'âge et la race ont une influence forte sur le statut d'occupation et le choix de logement, mais de tels résultats n'auraient peut-être pas été observables si l'analyse n'avait pas été conduite par groupes.

Les travaux de Knapp, White et Clark (2001) étudient les différentes approches de modélisation des choix résidentiels des ménages et adoptent une structure pyramidale pour déterminer quels sont les facteurs motivant les décisions de migration inter- ou intra-MSA, ainsi que le choix entre la banlieue et la ville. Cette approche est adoptée pour « capturer les effets subtils d’attraction du MSA de destination ... et le raffinement du choix résidentiel au sein de ce MSA – des effets que les autres techniques d’estimation ne permettent pas de distinguer » (Knapp et coll., 2001, p. 3). Les auteurs soutiennent en essence qu’il existe différents niveaux de structures définissant les micro et macrodécisions des ménages, et qu’il est nécessaire de séparer ces niveaux les uns des autres pour saisir les subtilités de ces décisions.

Adoptant une approche différente des choix de localisation, Kim et coll. (2005) utilisent des enquêtes de préférences déclarées conduites dans le comté de l’Oxfordshire au Royaume-Uni. Contrairement aux enquêtes de préférences révélées où les choix des individus sont la principale donnée collectée, les enquêtes de préférences déclarées permettent aux chercheurs de mieux comprendre les arbitrages individuels; les options *non* choisies sont explicitement connues, tout comme les options choisies. Les chercheurs utilisent cette approche et décomposent les choix de localisation en deux phases: d’abord, la décision de déménager, puis la sélection d’une destination. Ils construisent un plan factoriel fractionnaire utilisant les sept attributs suivants : le prix du logement, le temps et le coût des déplacements pendulaires, la localisation (ville ou banlieue), la densité de population, le temps et le coût des déplacements vers les commerces, et la qualité des écoles. La structure des choix est illustrée ci-dessous.

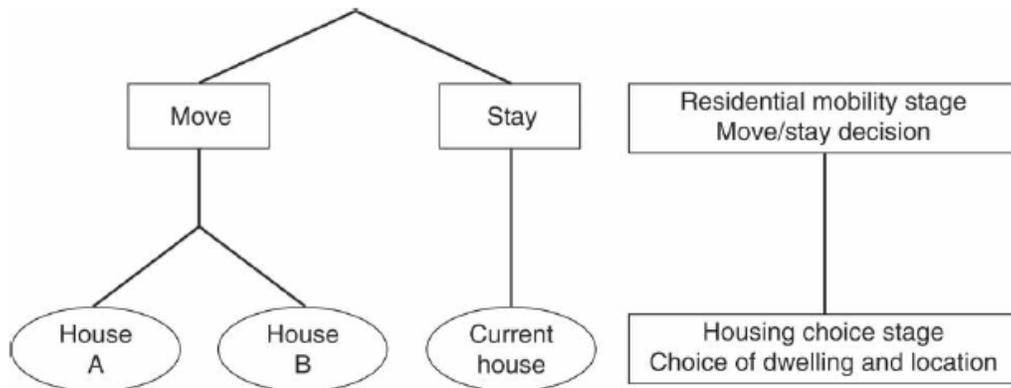


Figure 1. Sequence of the housing choice decision-making process.

Figure 6 – Structure des choix de mobilité résidentielle et de localisation, Kim et coll. (2005)

Les résultats obtenus par Kim et coll. (2005) suivent la logique attendue et indiquent que les ménages préfèrent « les localisations résidentielles offrant à la fois des temps de déplacements réduits, des faibles coûts de transport, une faible densité, des écoles de bonne qualité, et des prix immobiliers réduits » ((Kim et coll., 2005), p.1631).

Yates et Mackay (2006) se penchent aussi sur la question de la structure des choix. Plutôt que de supposer que les ménages choisissent successivement entre le statut de locataire et de propriétaire, puis entre ville et banlieue, et enfin entre maison individuelle et appartement – ce qui impliquerait que la probabilité de choisir une option plutôt qu’une autre ne dépend pas des

choix précédents - Yates et Mackay (2006) utilisent un logit multinomial et un logit imbriqué pour tester cette hypothèse.

Ils affirment que « le choix d'un statut d'occupation peut être plus important que le choix d'une localisation pour certains ménages, alors que c'est l'inverse pour d'autres » ((Yates & Mackay, 2006) p.565). Après avoir observé la baisse du taux de propriétaires parmi les jeunes ménages à Sydney, les auteurs se demandent si cette évolution a été causée par « un mode de vie ou une préférence de localisation[c'est-à-dire, si les jeunes ménages] ont été influencés par l'écart entre coût d'achat et coût de location en différents lieux et pour différents types de logements, ou s'ils ont plutôt été contraints par leurs capacités financières » (Yates & Mackay, 2006, p. 566). Les résultats confirment l'hypothèse des auteurs selon laquelle le postulat de l'indépendance des alternatives non pertinentes s'applique à la structure de choix classique (statut d'occupation, puis localisation, puis type de logement). Néanmoins, ces résultats ne permettent pas de déterminer quelle est la structure de choix valide, car les deux périodes auxquelles les postulats structurels ont été testés (1986 et 1996) produisent des résultats différents.

La conclusion des auteurs est que les contraintes financières et les préférences des consommateurs évoluent dans le temps et produisent des structures différentes de choix. Ce constat rappelle en outre l'importance de choisir correctement les moyens par lesquels sont évaluées les préférences des ménages, puisque les méthodes et structures utilisées peuvent influencer les résultats. Yates et Mackay (2006) craignent que la disponibilité croissante de « programmes informatiques conviviaux augmente le risque que les chercheurs se laissent séduire par la promesse d'une [manière facile de conduire leurs analyses] » ((Yates & Mackay, 2006), p.574). Ils mettent en garde les chercheurs contre les conclusions incohérentes pouvant résulter de telles analyses.

Selon Chang (2006), les premiers modèles utilisant la théorie de l'utilité aléatoire ont beaucoup contribué à la compréhension des fondements théoriques des processus de choix, et en particulier de comment les choix sont faits par les individus. À cet égard, P. Waddell (1993) a cherché à déterminer si les ménages choisissent leur résidence et leur lieu de travail simultanément ou séquentiellement – en d'autres termes, il a étudié s'il fallait utiliser un modèle logit conjoint ou imbriqué. D'autres auteurs (e.g. J. Abraham & J. Hunt, 1997) ont étudié les choix de localisation des ménages dont plusieurs membres travaillent, cherchant à les distinguer des choix des ménages dont seul l'un des membres travaille.

À partir de données issues d'une enquête sur les ménages de Dallas/Fort-Worth Bhat & Guo (2004) comparent différents modèles statistiques pour prédire les choix de localisation des ménages. Leur analyse se concentre plus particulièrement sur l'impact de la corrélation entre différentes options, et les manières dont cette corrélation peut être envisagée. Le principal motif de cette étude du rôle de la corrélation spatiale dans le pouvoir prédictif des modèles est que les modèles statistiques de localisation des ménages les plus répandus – comme le modèle logit multinomial – sont fondés sur la théorie de l'utilité aléatoire, mais postulent que les alternatives sont indépendamment et identiquement distribuées. Néanmoins, puisque les

alternatives sont corrélées en raison de leur proximité, Bhat et Guo affirment qu'une approche différente doit être adoptée.

Bhat et Guo (2004) proposent donc un modèle logit mixte spatialement corrélé pour résoudre le problème de la corrélation entre alternatives situées à proximité les unes des autres. Cette approche associe la simplicité de la forme fermée du logit multinomial à un modèle de valeurs extrêmes généralisées, plus adapté à la modélisation des choix entre options corrélées. En utilisant des informations relatives à la contiguïté des options disponibles, leur modèle assigne un « paramètre de dissemblance [pour établir] la corrélation existant entre unités spatiales contiguës » ((Bhat & Guo, 2004), p.151). Ce point illustre l'importance de bien comprendre les processus de choix de localisation des ménages, puisque « l'utilisation du sol à des fins résidentielles représente environ les deux tiers des espaces urbanisés, et les déplacements ayant pour origine le domicile comptent pour un large pourcentage de tous les déplacements » (Bhat & Guo, 2004, p. 157). Un modèle de choix de localisation mal défini produirait donc une mauvaise prévision des déplacements s'il était utilisé dans le cadre d'un modèle intégré.

L'approche du choix discret permet de « modélise[r] les choix résidentiels comme des arbitrages entre différentes caractéristiques spatiales telles que le temps de déplacement, le coût du logement, l'accès à différentes activités », tout en permettant des variations « entre différents segments sociodémographiques de la population, par le biais de variables d'interaction entre les caractéristiques des lieux et les caractéristiques des ménages » (Bhat & Guo, 2004, p. 157). L'utilité aléatoire est donc une approche particulièrement puissante produisant des prédictions correctes et cohérentes, qui peut encore être améliorée par l'inclusion d'un modèle de valeurs extrêmes généralisées pour compenser ou corriger les effets de corrélation.

L'étude de Bhat & Guo (2004) utilise un large ensemble de variables ainsi que des données sur 4839 ménages. Les résultats indiquent que les modèles logit multinomial et logit mixte spatialement corrélé prédisent la même direction pour les coefficients, mais les effets relatifs apparaissent très différents selon le modèle employé. Ces résultats fournissent « une indication claire qu'il existe une corrélation spatiale dans les choix de résidence et les variations de sensibilité entre les ménages, causée par des facteurs non observés » (Bhat & Guo, 2004, p. 165). Ceci renforce l'idée que les caractéristiques des modèles sont extrêmement importantes pour déterminer les relations entre variables, ainsi que leur élasticité.

Dans un travail faisant suite à celui de Bhat & Guo (2004), Sener et coll. (2011) revisitent le thème de la corrélation spatiale, améliorant la méthodologie originale en rendant les interactions moins restrictives. Plutôt que de concevoir la corrélation comme le produit de la contiguïté de plusieurs unités, ils utilisent les concepts de proximité et de diminution en fonction de la distance. Sener et coll. (2011) construisent un modèle logit spatialement corrélé généralisé pour tester la probabilité qu'un agent choisisse une zone donnée. Les résultats de cette approche sont comparés à ceux du logit multinomial et il apparaît que les valeurs et les signes des coefficients restent cohérents entre les différents modèles pour les variables d'intérêt, mais qu'il existe un plus haut niveau de corrélation spatiale entre zones contiguës et non contiguës dans

le modèle logit généralisé spatialement corrélé, ce qui rend sa qualité générale d'ajustement supérieure (Sener et coll., 2011).

Facteurs de mobilité des ménages et fréquence des décisions de mobilité

Brown et Moore (1970) étudient les causes de mobilité des ménages, et en particulier la manière dont on peut prédire la probabilité qu'un ménage recherche une utilité spatiale plus élevée. Leur approche est fondée sur la présence de « stressseurs ». Empruntant à la psychologie, les auteurs postulent que les ménages ont un seuil de tolérance au stress au-delà duquel ils cherchent à changer de résidence. Le niveau de ce seuil est déterminé par les caractéristiques du ménage et sa perception du potentiel d'amélioration de sa situation, ou de son évaluation cognitive de la zone qu'il connaît (Brown & Moore, 1970). Le stress n'est pas seulement considéré comme le produit de facteurs extérieurs en interaction avec les caractéristiques du ménage; les changements internes au ménage – comme un changement de besoins entraîné par une évolution de la composition du ménage ou le passage d'un à deux revenus – peuvent aussi être à l'origine d'un dépassement du seuil de stress. Selon Brown et Longbrake, « les migrations intra-urbaines peuvent être conçues comme un processus d'ajustement dans lequel un lieu de résidence est substitué à un autre pour mieux répondre aux besoins et désirs du ménage » (Brown & Longbrake, 1970, p. 370).

Brown et Longbrake (1970) soulignent en outre l'importance de collecter des informations aussi bien sur les non-migrants que sur les migrants pour mieux comprendre les facteurs conduisant les ménages à déménager. Dans leur étude des migrations à Cedar Rapids, les auteurs utilisent les caractéristiques des ménages ayant migré ainsi que leurs conditions de vie pour les comparer aux caractéristiques socioéconomiques des zones depuis lesquelles ils ont émigré. Pour cela, ils définissent une typologie des zones d'origine des migrants ainsi que de leur zone de destination. Ils comparent ensuite la manière dont ces migrants évaluent les caractéristiques de leur environnement actuel et de l'environnement auquel ils aspirent. Les plus fortes propensions à déménager sont observées « ... dans les zones où la population touche un revenu relativement bas et/ou est employée dans un secteur de bas niveau social par rapport aux normes de la zone étudiée » (Brown & Longbrake, 1970, p. 377). C'est-à-dire que dans toute zone donnée, la richesse relative des résidents est le meilleur indice de mobilité des ménages.

La principale conclusion de Brown et Longbrake (1970) est que la mobilité est plus forte parmi « les ménages dont le statut familial évolue » ((Brown & Longbrake, 1970) 376), les jeunes familles étant réputées être plus sensibles aux aménités et nuisances de leur environnement. Une autre conclusion généralisable de cette étude est que les locataires sont plus susceptibles de déménager que les propriétaires. Pour une analyse des raisons poussant les ménages à déménager dans le contexte canadien, on se référera au travail Filion et coll. (1999), fondé sur les réponses à une enquête.

Reason	Percentage reporting
Nicer dwelling	46.4 (269) ^b
Nicer neighbourhood	30.0 (174)
Convenient location	21.9 (127)
Put money into housing	14.5 (84)
To economise	12.9 (75)
Change in employment	12.8 (74)
New children	9.0 (52)
To live with others	8.3 (48)
Less house/yard work	5.3 (31)
Retirement	4.3 (25)
Illness/disability	3.3 (19)
Children moved	2.8 (16)
Loss of income	2.6 (15)
Adults moved	1.0 (6)
Death in household	0.9 (5)

Figure 7 – Causes de déménagement d'après une enquête auprès des ménages migrants de Kitchener, Canada. Filion et coll. (1999)

Les motifs évoqués ci-dessus se retrouvent dans d'autres études, comme celle de Kim et coll. (2005), où les principales motivations au départ sont l'insatisfaction vis-à-vis du logement, l'évolution des caractéristiques du ménage (enfants, mariage, revenu, etc.) et l'attrait exercé par les autres options disponibles.

Résumé de la revue de littérature sur les choix résidentiels des ménages

Cette recension de la littérature empirique sur les choix résidentiels des ménages révèle certaines tendances de fond : l'influence des temps de déplacement sur les choix de localisation est complexifiée par la décentralisation de la population; les villes sont de plus en plus polycentriques; et les ménages à double salaire sont de plus en plus nombreux. La littérature se penche aussi sur le rôle de l'offre de logement dans les choix de ménages, ainsi que sur les nombreux facteurs qui influencent ces choix. Il a été établi que ces facteurs sont multiples et ne se limitent pas à la distance de l'hypercentre. Ils comprennent des caractéristiques comme la taille et le prix des terrains, les types de logements, les caractéristiques des quartiers voisins (notamment, leur composition raciale), et l'accessibilité à divers services et activités. Il apparaît aussi que le poids de ces facteurs dans les choix résidentiels varie selon des caractéristiques intrinsèques aux ménages (âge, structure familiale, présence d'enfants, etc.). Tout comme dans la littérature sur la localisation des entreprises, l'usage de techniques statistiques sophistiquées est en progression, notamment en ce qui concerne les techniques de choix discret utilisées pour mieux comprendre les décisions de localisation des ménages.

1.1.3 Mesures d'accessibilité¹

La partie précédente traitait des modèles analytiques fondamentaux et des courants de recherches empiriques dans la littérature sur les choix de localisation des ménages et des entreprises. Conformément à la demande du MTQ, cette partie traite des mesures d'accessibilité. Comme on l'a vu dans les parties précédentes, les liens entre choix de localisation des entreprises et des ménages et le système de transport sont essentiels à la compréhension des dynamiques urbaines. Le concept d'accessibilité vise à quantifier le rapport entre, d'une part, activités et opportunités, et d'autre part, la distance à laquelle se situent ces opportunités par rapport aux entreprises et aux ménages.

Définitions

L'accessibilité a été définie de plusieurs façons par de nombreux chercheurs : comme un potentiel d'interaction (Hansen, 1959), comme des avantages liés au système de transport et à l'utilisation du sol (Ben-Akiva et Lerman, 1979), ou comme la facilité à atteindre des opportunités prisées (Morris, Dumble et Wigan, 1979). L'accessibilité est souvent définie par opposition à la mobilité (Handy, 2002). La mobilité représente la facilité de se déplacer à l'intérieur d'un réseau, la capacité de se rendre d'un point à l'autre (Handy, 1994; Hansen, 1959), alors que l'accessibilité représente la facilité d'atteindre les destinations. La mobilité est une mesure du système de transport, alors que l'accessibilité mesure l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport.

La demande en transports est une demande dérivée; on ne se déplace pas pour le plaisir de la chose, mais plutôt pour participer à différentes activités qui sont réparties dans l'espace. Le transport est un des coûts associés à la participation à des activités dispersées dans l'espace (Wachs et Kumagai, 1973). Ce coût dépendra d'une multitude de facteurs, par exemple, l'individu possédant une voiture aura accès à plus d'opportunités que celui voyageant en transport collectif.

La notion d'accessibilité a été initialement conçue dans les années 1950 (Hansen, 1959) et de nombreux chercheurs ont davantage développé le concept depuis ce temps. Un bon nombre d'études classent et évaluent des mesures selon divers critères (Baradaran et Ramjerdi, 2001; El-Geneidy et Levinson, 2006; Geurs, 2006; Geurs et Ritsema van Eck, 2001; Handy et Niemeier, 1997). Il existe différentes approches pour mesurer l'accessibilité; la plus simple consiste à compter les opportunités disponibles, par exemple le nombre d'emplois ou de parcs à partir d'un point i dans les limites d'un certain temps ou d'une certaine distance de déplacement. Les mesures complexes comprennent des mesures fondées sur le maximum d'utilité, lesquelles s'inspirent de théories microéconomiques traditionnelles, et les mesures d'accessibilité individuelle, qui proviennent de la géographie des espaces-temps développée par Hagerstand (1970).

¹ Cette partie est largement tirée de "Cerdá, A., & El-Geneidy, A. (2010). Mesures d'accessibilité: Mesures de performance pour la planification de l'utilisation du sol et du transport dans la région métropolitaine de Montréal. Montréal, Québec, Canada: Ministère des Transports du Québec."

Composantes

Toutes les mesures d'accessibilité sont établies avec essentiellement les mêmes composantes de base : une composante d'activité et une composante de transport (Handy et Niemeier, 1997; Koenig, 1980). La composante d'activité est une mesure relative à l'utilisation du sol. Elle est représentée sous forme de destinations ou d'opportunités, qui peuvent être des emplois, des hôpitaux, des garderies, etc. Il est possible d'examiner ces opportunités afin de déterminer leur attractivité ou leur concurrence.

La composante de transport, quant à elle, est une mesure du système de transport, tel que le temps ou la distance de déplacement. On la calcule pour différents modes de transport (automobile, transport collectif, marche, vélo) en utilisant le réseau des rues et les temps de déplacement simulés pour l'heure de pointe ou en dehors des heures de trafic intense. Une mesure qui évalue le coût de déplacement (l'impédance) pour les usagers est aussi comprise dans la composante de transport. Habituellement, il s'agit d'une fonction exponentielle négative qui est évaluée spécifiquement pour la zone étudiée, mais cela peut aussi être une fonction qui estime les coûts généralisés de transport en intégrant les coûts en argent et en temps.

Deux autres aspects qui devraient être inclus dans les mesures d'accessibilité sont les composantes temporelle et individuelle (Geurs et Ritsema van Eck, 2001). L'aspect temporel de l'accessibilité peut être décrit de façon très simple en estimant l'accessibilité dans les limites d'un temps de déplacement prédéterminé ou pour un moment de la journée spécifique (par exemple, l'heure de pointe du matin) ou en intégrant les contraintes du temps dans les calculs (par exemple, les heures d'ouverture des magasins). En ce qui a trait à la composante individuelle de l'accessibilité, elle reflète les aptitudes et les besoins individuels. Les recherches en géographie, par exemple, tentent de cerner les niveaux d'accessibilité des personnes selon leur genre, ethnicité ou niveau d'éducation afin de déterminer si ces sous-groupes ont le même accès aux opportunités, comme les emplois ou le système de santé (Kwan, 1999; Scott et Horner, 2008; Shen, 1998). La composante individuelle de l'accessibilité peut être mesurée en subdivisant les données selon des caractéristiques spécifiques telles que l'éducation ou le revenu, ou en mesurant l'accessibilité sur le plan individuel à l'aide de données provenant d'enquêtes de déplacements.

L'importance du concept

Les plans de transport ont pour but d'augmenter l'accessibilité (Handy, 2002), mais ils analysent surtout la croissance de la mobilité et ne tiennent pas compte de l'utilisation du sol (Levinson, Krizek et Gillen, 2005). Les mesures de mobilité sont simples à utiliser et leur interprétation est facile autant pour les planificateurs que pour le grand public (Geurs et Ritsema van Eck, 2001). On cite souvent les niveaux de congestion et la vitesse moyenne de déplacement, mais ces données sont trompeuses et ne représentent pas correctement la façon dont le système de transport interagit avec l'utilisation du sol dans une région. La congestion, en particulier, peut indiquer l'attractivité ou la stabilité économique d'une ville (Cervero, 1998; Downs, 2004) et, dans ce cas, ne peut pas démontrer à quel point le système de transport et l'utilisation du sol sont capables de fournir aux individus l'accès aux opportunités. En revanche, les mesures d'accessibilité peuvent être utilisées pour évaluer les plans et les politiques de transport et d'utilisation du sol, mesurer l'équité sociale du réseau, cerner les régions ou les populations mal

desservies et mieux comprendre les contraintes auxquelles les usagers font face. Les mesures d'accessibilité peuvent être appliquées à plusieurs modes de transport et cela, à toutes les étapes du processus de planification et de mise en œuvre.

Recension de la littérature existante

La recension de la littérature présentée dans cette section fournit une vue d'ensemble des mesures d'accessibilité actuelles et aborde les nouvelles recherches effectuées dans ce domaine. Le concept d'accessibilité existe maintenant depuis 50 ans; en conséquence, la littérature portant sur l'accessibilité est très riche. On peut mesurer l'accessibilité à un lieu, ce qui implique les mesures de séparation spatiale entre les individus et certaines activités, ou à l'échelle de l'individu; par exemple, on parle dans la littérature de mesures d'accessibilité axées sur les individus (Miller, 2005). Baradaran et Ramjerdi (2001) ont déterminé cinq façons différentes de mesurer l'accessibilité, alors que Handy et Niemeier (1997) ont cerné trois de ces cinq mesures pour l'usage potentiel des planificateurs. Les mesures d'accessibilité peuvent être classées en trois catégories principales : les mesures basées sur la localisation, les mesures individuelles et les mesures fondées sur le maximum d'utilité.

Les mesures d'accessibilité basées sur la localisation

Les premières mesures d'accessibilité qui ont été conçues sont axées sur la localisation. Elles mesurent l'accessibilité d'une zone ou d'un quartier. Ce type de mesure est avantageux pour comparer le niveau d'accessibilité d'une zone par rapport à une autre, ou, par rapport au niveau d'accessibilité régionale afin de mesurer les changements d'accessibilité provoqués par les nouveaux projets de transport ou d'aménagement et pour déceler facilement les gagnants et les perdants régionaux en matière d'accessibilité.

La mesure isochrone

La mesure isochrone est l'une des plus simples à calculer et l'une des premières mesures d'accessibilité à avoir été mise au point (Vickerman, 1974; Wachs et Kumagai, 1973). Elle recense le nombre d'opportunités disponibles à partir d'un point prédéterminé à l'intérieur d'un seuil de temps ou de distance de déplacement spécifique. La formule du modèle est la suivante :

$$A_i = \sum_{j=1}^J B_j O_j$$

où A_i est l'accessibilité mesurée au point i aux activités potentielles dans la zone j , où O_j représente les opportunités dans la zone j , et où b_j est une valeur binaire égale à 1 si la zone j est à l'intérieur du seuil prédéterminé; sinon, elle est égale à 0.

Par exemple, cette mesure peut être utilisée pour recenser le nombre de parcs à moins de 400 mètres (zone j) d'une résidence i . La distance peut être mesurée à l'aide d'un réseau dans un Système d'information géographique (SIG), qui est plus réaliste que la distance euclidienne. On peut aussi utiliser un temps de déplacement prédéterminé, par exemple le nombre de parcs à moins de 10 minutes de marche d'une résidence. Appelée aussi « modèle de zone de desserte », cette mesure a été citée de nombreuses fois dans la littérature comme une manière simple et

directe d'évaluer l'équité en matière d'accessibilité aux biens publics ou de mesurer les changements d'accessibilité provoqués par une infrastructure de transport (Gutierrez, 2001; Gutierrez et Gomez, 1999; Gutierrez et Urbano, 1996; Handy et Niemeier, 1997; Talen, 1996; Talen, 1998).

Avantages et inconvénients de la mesure

La mesure isochrone est simple à calculer, car elle utilise des données facilement disponibles. De plus, elle est facile à comprendre et à communiquer. Elle est largement utilisée dans les modèles hédoniques pour évaluer l'accès aux commodités dans un quartier et cette mesure a été beaucoup étudiée. Elle tient compte à la fois de la composante de transport et de la composante d'aménagement sans avancer d'hypothèse implicite quant à leur valeur pour les usagers (Geurs et Ritsema van Eck, 2001). Le défaut principal de cette mesure est qu'elle ne prend pas en considération l'impédance associée au déplacement, de sorte que toutes les opportunités sont considérées comme égales. Elle ne représente pas adéquatement comment les usagers perçoivent et valorisent certaines destinations spécifiques. En outre, le temps ou la distance de déplacement (zone j) sont évalués de façon arbitraire et en modifiant ce paramètre, on peut considérablement influencer les résultats. Cela crée une différence artificielle entre les opportunités situées à 399 mètres (valorisées) et celles situées à 401 mètres (qui n'ont aucune valeur) (Ben-Akiva et Lerman, 1979).

Le modèle gravitaire

Le modèle gravitaire est la méthode la plus répandue pour calculer l'accessibilité. Il a été initialement conçu par Hansen (1959) et a été adapté de nombreuses façons depuis. Contrairement à la méthode isochrone, où toutes les destinations sont jugées équivalentes, la mesure gravitaire établit une relation entre l'utilité d'une destination et le temps de déplacement qu'elle nécessite à partir d'un point d'origine (Miller, 2005). Cette mesure peut être exprimée de la manière suivante :

$$A_{im} = \sum_j O_j f(C_{ijm})$$

ou

$$A_{im} = \sum_j O_j \exp(\theta C_{ijm})$$

où A_{im} est l'accessibilité au point i aux activités potentielles au point j en employant le mode m , où O_j représente les opportunités dans la zone j , où $f(C_{ijm})$ est l'impédance ou la fonction du coût du transport pour se déplacer entre i et j en utilisant le mode m , et où $\exp(\theta C_{ijm})$ est une fonction exponentielle négative associée au déplacement entre i et j en utilisant le mode m .

Le coût associé au déplacement entre un point d'origine et une destination influe sur l'attractivité de l'opportunité. Plus une opportunité est éloignée du point d'origine, en matière de temps, de distance ou de coût général, moins son niveau d'accessibilité est élevé. Le choix du facteur d'impédance dans la mesure d'accessibilité peut jouer un rôle décisif; ce facteur

déterminera la relation entre l'accessibilité et les coûts du déplacement en matière de temps ou de distance. Une grande partie de la littérature définit l'impédance à l'aide de la fonction exponentielle négative. Évaluer la résistance au déplacement est une opération complexe, particulièrement pour les trajets en transport collectif ou multimodal (Miller, 2005); la fonction devrait être choisie avec précaution en utilisant les données les plus récentes (Geurs et Ritsema van Eck, 2001). En remplaçant la fonction d'impédance par une mesure généralisée qui évalue les coûts de déplacement, y compris le temps, la distance, les prix des billets et le temps d'attente, on devrait augmenter le réalisme des mesures (Bruinsma et Rietveld, 1998). Cependant, toute fonction d'impédance donnera plus de poids au centre qu'à la périphérie, ce qui pourrait conduire à sous-estimer les niveaux d'accessibilité dans les secteurs périphériques (Gutiérrez, Monzón et Piñero, 1998) ou à donner plus d'importance aux destinations rapprochées qu'à d'autres, plus attrayantes, mais éloignées (Gutierrez et Urbano, 1996).

L'équation précédente est utilisée pour mesurer l'accessibilité par un moyen de transport unique m . L'accessibilité peut être mesurée de la même façon pour divers moyens de transport, afin d'effectuer ensuite des comparaisons. Par exemple, l'accessibilité des emplois peut être mesurée par rapport à l'automobile, au transport collectif et au vélo. Les résultats peuvent ensuite être comparés pour identifier les zones et les lieux les moins bien desservis par un mode de transport donné.

Avantages et inconvénients de la mesure

Bien qu'elle soit plus complexe que la mesure isochrone, la mesure gravitaire est quand même relativement simple à calculer. Elle utilise des données disponibles et est facile à interpréter. De plus, elle correspond à une vision intuitive du système de transport, en ce sens qu'un grand nombre d'opportunités augmente les chances de trouver la destination choisie et que plus une opportunité est éloignée, moins elle est convoitée (Koenig, 1980). Ce fait est très important étant donné que les mesures d'accessibilité doivent correspondre à la perception que les gens ont de leur environnement pour être utilisées comme mesures de la performance (Handy et Niemeier, 1997).

Un inconvénient important de cette mesure d'accessibilité est qu'elle nécessite un facteur d'impédance (bien que l'on utilise souvent les coefficients de modèles de prévision de la demande et de distribution des déplacements pour la planification régionale des transports). Comme il a été dit plus haut, estimer les facteurs d'impédance peut être compliqué et requiert l'utilisation de données récentes. La prudence est de mise quand on utilise la fonction de décroissance dérivée empiriquement pour évaluer les scénarios présentant une distribution spatiale d'activités différente ou des comportements de déplacement différents (Geurs et Ritsema van Eck, 2001).

L'accessibilité gravitaire évalue l'accessibilité d'un emplacement et ne tient pas compte de l'accessibilité individuelle. On attribue à tous les individus résidant dans une certaine zone le même niveau d'accessibilité (Ben-Akiva et Lerman, 1979), même si, dans une même zone, il pourrait y avoir différents niveaux d'accessibilité selon les individus en raison de contraintes personnelles, tel qu'un handicap ou le fait de ne pas posséder de voiture. Un emplacement peut offrir un haut niveau d'accessibilité aux emplois, mais ce dernier pourrait quand même être peu

élevé pour un individu qui ne possède pas les compétences et la formation exigées pour le type d'emploi disponible. Si l'on veut tenir compte de cette situation, on doit désagréger les données en utilisant les facteurs socioéconomiques, par exemple mesurer l'accessibilité à l'emploi selon le niveau d'éducation. En calculant l'accessibilité pour des petites zones et en différenciant les ménages ou les individus selon des caractéristiques sociodémographiques, on devrait obtenir des résultats plus exacts (Handy et Niemeier, 1997).

La mesure gravitaire explique la distribution spatiale des opportunités offertes (par exemple, les emplois), mais ne tient pas compte de la demande et de la concurrence pour les opportunités disponibles (c'est-à-dire, les travailleurs). Elle présume que la demande pour les opportunités n'a pas d'incidence sur leur niveau d'attractivité. Si la distribution spatiale de la demande est inégale, la mesure d'accessibilité qui ne prend pas en considération la concurrence sera fautive et trompeuse (Shen, 1998).

Finalement, bien que la mesure gravitaire soit relativement simple et intuitive, les résultats peuvent être difficiles à interpréter parce qu'ils montrent une mesure d'accessibilité présentée comme un indice d'interaction potentielle; les niveaux absolus d'accessibilité ont peu de sens en eux-mêmes. Une solution que l'on peut apporter à ce problème est de comparer les niveaux relatifs en calculant le ratio d'accessibilité d'une zone par rapport à toute la région et en faisant un classement des emplacements. On peut aussi mesurer les changements de niveaux d'accessibilité provoqués par les changements dans le domaine des transports ou de l'aménagement (Baradaran et Ramjerdi, 2001; Handy et Niemeier, 1997).

Les facteurs de concurrence

Plusieurs variations du modèle gravitaire initial ont été élaborées afin de prendre en considération la concurrence lorsque celle-ci joue un rôle important au point d'origine ou à la destination quand on mesure l'accès aux opportunités. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la mesure gravitaire explique la notion de l'offre liée à l'aménagement et au système de transport, mais pas le concept de la demande. Elle est valide si l'une de ces deux conditions est remplie : la demande pour les opportunités disponibles est distribuée uniformément à travers l'espace, et ces opportunités n'ont pas de contraintes en matière de capacité (Shen, 1998). La première condition est rarement remplie dans les villes caractérisées par une distribution spatiale inégale de la population et des activités. En pratique, la deuxième condition peut être respectée dans certaines circonstances, mais ne peut jamais être appliquée à l'emploi, car chaque emploi est occupé par un seul travailleur à un moment précis. En outre, plusieurs considérations sont cruciales quand on mesure l'accessibilité à l'emploi, comme l'adéquation de l'offre et de la demande d'emploi (on utilise seulement le nombre pertinent de chercheurs d'emploi et d'offres d'emploi). On doit aussi inclure certaines caractéristiques sociodémographiques telles que l'éducation et le revenu (Shen, 1998).

Les modèles gravitaires avec facteurs de concurrence

Une des approches pour expliquer la concurrence, conçue au départ par Shen (1998), requiert que l'on intègre au calcul le potentiel de la demande (c'est-à-dire le nombre de personnes cherchant une opportunité déterminée). Le procédé est le suivant : diviser l'offre (c'est-à-dire le

nombre d'emplois) dans la zone j par la demande (nombre de chercheurs d'emplois) dans les limites de cette zone j .

Dans ce modèle, l'accessibilité équivaut au ratio du nombre total d'opportunités et du nombre total de chercheurs d'opportunités dans la zone j . On peut formuler cette mesure ainsi :

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{O_j f(C_{ij})}{D_j}}{D_j}, \quad D_j = \sum_{l=1}^n P_l f(C_{lj})$$

où A_i représente l'accessibilité des gens qui habitent dans la zone i , où O_j sont les opportunités dans la zone j , où $f(C_{ij})$ est l'impédance ou la fonction du coût du transport pour se déplacer entre i et j , où D_j est la demande pour les opportunités et où P_j est le nombre de personnes dans la zone j cherchant les opportunités.

Shen (1998) s'est servi de ce modèle pour mesurer l'accessibilité à l'emploi des travailleurs à faible revenu dans la région métropolitaine de Boston. En tenant compte de la concurrence pour les emplois parmi les travailleurs utilisant différents modes de transport, il a réussi à souligner l'importance de l'emplacement pour l'accessibilité à l'emploi, particulièrement l'avantage des quartiers centraux par rapport aux banlieues. Cependant, le fait de posséder une voiture s'est révélé être un facteur beaucoup plus important en matière d'accessibilité à l'emploi que la localisation.

Avantages et inconvénients de la mesure

Même si l'introduction de la concurrence dans la mesure gravitaire rend celle-ci plus réaliste, elle devient aussi plus difficile à interpréter et à communiquer. De plus, le modèle gravitaire comportant les facteurs de concurrence ne tient compte que de la concurrence à la destination. Autrement dit, cette mesure examine les effets du nombre de chercheurs d'emploi potentiels sur l'accessibilité aux emplois, mais ne considère pas l'incidence sur l'accessibilité d'autres emplois dans d'autres zones.

Les facteurs d'équilibre inverses

La deuxième approche utilisée pour expliquer la concurrence consiste à employer les facteurs d'équilibre inverses du modèle d'interaction spatiale doublement contraint (Wilson, 1971) comme mesure d'accessibilité. Dans le modèle d'interaction conçu par Wilson, les facteurs d'équilibre assurent que l'ampleur des flux en provenance et en direction de toutes les zones équivaut au nombre réel d'activités dans la zone. En utilisant cette mesure, on calcule le potentiel de l'offre et de la demande pour toutes les zones de façon itérative, en s'assurant que le nombre de déplacements en provenance et en direction de chacune des zones équivaut au nombre d'opportunités (Geurs et Ritsema van Eck, 2003).

Autrement dit, cette mesure estime le nombre de chercheurs d'emploi potentiels (O_i) dans la région et celui des emplois potentiels (D_j), et elle équilibre ensuite les chiffres jusqu'à ce que le modèle devienne stable. L'équation est définie comme suit :

$$A_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{B_j} O_j f(C_{ij}), \quad (1) \quad B_j = \sum_{i=1}^n \frac{1}{A_i} D_i f(C_{ij}) \quad (2)$$

où A_i représente l'accessibilité aux emplois des personnes résidant à l'emplacement i et où B_j est l'accessibilité aux travailleurs dans la zone j ; O_j est le nombre d'opportunités dans la zone j , D_j représente le nombre de personnes à l'emplacement i cherchant les opportunités et $f(C_{ij})$ est la fonction d'impédance qui mesure la séparation spatiale entre i et j .

La première étape dans l'opérationnalisation de la mesure consiste à calculer l'accessibilité aux emplois dans toutes les zones, en faisant en sorte que le facteur d'équilibre B_j soit égal à 1 (équation 1). Cela signifie qu'il faut calculer la mesure gravitaire pour toutes les zones. Le résultat de cette opération (A_i) est intégré dans le calcul du deuxième facteur (équation 2), puis dans celui du premier facteur (équation 1) et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. Le modèle converge quand les résultats de deux facteurs consécutifs A_i sont identiques. Si l'on veut indiquer les résultats sur une carte ou les appliquer en tant que variables dans une régression linéaire, il est recommandé de les réduire en multipliant le facteur A_i et en divisant le facteur B_j par une constante.

Une étude sur l'accessibilité à l'emploi dans les Pays-Bas a révélé que la méthode des facteurs d'équilibre inverses est la meilleure pour mesurer les effets de la concurrence, puisqu'elle produit un modèle complexe de changements en matière d'accessibilité locale (Geurs et Ritsema van Eck, 2003).

Avantages et inconvénients de la mesure

L'inconvénient principal des facteurs d'équilibre inverses est qu'ils sont plus difficiles à calculer et à interpréter que les autres en raison de leur nature itérative qui intègre à la fois les emplacements de la demande et ceux de l'offre. Cependant, on peut améliorer l'interprétation de cette mesure si l'on évalue séparément les divers effets des changements dans l'utilisation du sol, des projets d'infrastructure et de la congestion sur l'accessibilité (Geurs et Ritsema van Eck, 2003).

Le classement local

La méthode de classement local comme mesure d'accessibilité, présentée par El-Geneidy et Levinson (2006), est fondée sur les méthodes utilisées par les moteurs de recherche comme Google pour référencer les pages Web.

Les pages Web sont classées selon le nombre de liens qui mènent vers elles et ces liens sont à leur tour évalués selon le classement de leur hébergeur. Cela peut être traduit en une mesure d'accessibilité qui classe chaque lieu d'après le nombre de personnes qui s'y déplacent afin d'atteindre une opportunité. La contribution de chaque personne est classée selon l'attractivité que leur zone de départ représente en tant que destination finale. Cette mesure est fondée sur les flux entre les points d'origine et les destinations et elle tient compte du nombre d'opportunités auxquelles un individu renonce afin d'atteindre une opportunité dans une autre zone (El-Geneidy et Levinson, 2006). La formule mathématique du modèle est la suivante :

$$R_{j,t} = \sum_{i=1}^I E_{ij} * P_{i,t-1} \quad P_{i,t-1} = \left[E_j * \left[\frac{R_{j,t-1}}{E_i} \right] \right]$$

où $R_{j,t}$ est le classement local de la zone j en itération t (c'est-à-dire, le nombre total de personnes ayant pour destination la zone j), $P_{i,t}$ est la puissance de chaque personne quittant la zone i en itération t , I est le nombre total de zones i liées à la zone j , E_{ij} est le nombre de personnes quittant i pour se rendre à une activité en j , $P_{i,t-1}$ est la puissance de chaque personne quittant i dans l'itération précédente, E_j est le nombre de départ initial de personnes se déplaçant vers j , et E_i est le nombre initial de personnes résidant dans la zone i .

La mesure de classement local prend le nombre total de personnes qui participent à une activité précise (c'est-à-dire les travailleurs) et les redistribue entre les différentes zones. Chaque zone est pondérée selon son niveau d'attrait et l'importance de ses liens avec les autres zones. Cette mesure doit être calculée de façon itérative jusqu'à ce que la différence entre deux calculs consécutifs de classement soit égale à zéro. La valeur des résidents et des travailleurs dans le modèle est également pondérée en fonction du nombre d'opportunités auxquelles ils ont accès dans leurs zones d'origine et de destination.

Cette mesure requiert des données sur les origines et les destinations disponibles dans un grand nombre d'enquêtes. L'avantage d'utiliser les données origine-destination est que l'on connaît déjà les points d'origine et de destination des gens; la fonction d'impédance utilisée dans le modèle gravitaire traditionnel est déjà intégrée dans la matrice origine-destination.

Avantages et inconvénients de la mesure

Comme elle est fondée sur les origines et les destinations réelles des gens, la mesure de classement local peut nous aider à mieux comprendre l'interaction entre les transports et l'utilisation du sol dans une région en classant les différentes zones de la région selon leur niveau d'attractivité. Ce classement peut mettre en évidence les zones mal desservies et aider à y rediriger les efforts d'aménagement. Le plus grand avantage de cette mesure est qu'elle utilise les données déjà disponibles et que l'impédance et les temps de déplacement sont déjà intégrés dans les calculs, ce qui constitue habituellement la faiblesse des autres mesures d'accessibilité tel le modèle gravitaire. Elle prend aussi en considération la demande et l'offre pour une activité donnée, car elle estime à la fois la population participant à l'activité et les opportunités disponibles pour cette population.

Les inconvénients majeurs de la mesure sont la complexité de calcul et la difficulté à l'interpréter. À l'instar de la mesure de facteurs d'équilibre inverses, elle est calculée en plusieurs itérations, ce qui la rend moins transparente. Par ailleurs, les recherches devront être poursuivies afin de déterminer l'unité d'analyse spatiale appropriée, qui pourra être utilisée pour calculer cette mesure.

La mesure fondée sur le maximum d'utilité

Parmi toutes les mesures basées sur la localisation, la mesure fondée sur le maximum d'utilité est la plus complexe et la plus exigeante en matière de données. Elle a été conçue pour fournir

un cadre théorique solide au concept d'accessibilité (Ben-Akiva et Lerman, 1979). C'est donc le modèle d'accessibilité ayant le fondement théorique le plus solide : il est directement lié à la théorie microéconomique et il adhère aux théories du comportement de déplacement. Cette mesure repose sur la théorie d'utilité aléatoire selon laquelle la probabilité qu'un individu fasse un choix spécifique dépendra de l'utilité de tous les choix. Si on présume qu'un individu attribue un niveau d'utilité à chaque choix de destination dans une certaine série de choix C et qu'il choisit ensuite l'option qui maximisera son utilité, l'accessibilité peut être définie comme dénominateur du modèle logit multinomial, connu aussi sous le nom de « logsum » (Ben-Akiva et Lerman, 1979; Ben-Akiva et Lerman, 1985). Ce modèle correspond à la théorie traditionnelle microéconomique sur le surplus du consommateur : l'accessibilité représente les avantages offerts par les choix de transport. Voici la formule de la mesure :

$$A_n^i = 1_n \left[\sum_{\forall c \in C_n} \exp(V_{n(c)}) \right]$$

où A_n^i est le niveau d'accessibilité mesuré pour l'individu n à un emplacement i , où $V_n(c)$ est la composante spatio-temporelle observée de l'utilité indirecte du choix c pour la personne n , et où C_n est la série de choix de la personne n .

Contrairement au modèle gravitaire, qui implique que tous les individus dans la zone i ont le même niveau d'accessibilité, cette mesure introduit les préférences de déplacement de chaque individu comme partie intégrante de la mesure d'accessibilité.

Le modèle d'utilité est fondé sur deux axiomes : premièrement, les gens choisissent l'option qui leur procure un maximum d'utilité; deuxièmement, il est impossible d'évaluer tous les facteurs qui contribuent à l'utilité d'une destination. Cette utilité peut être exprimée comme la somme de composantes aléatoires (ou stochastiques) et non aléatoires (Koenig, 1980). Si on présume que les utilités non observées possèdent la même distribution spatiale et la même échelle que les utilités observées, nous pouvons extraire la mesure d'utilité maximale attendue du modèle logit emboîté de choix (nested logit choice model) (Ben-Akiva et Lerman, 1979).

Il existe une correspondance étroite entre l'utilité maximale attendue d'une situation où l'on effectue un choix et le concept de surplus du consommateur dans la théorie microéconomique (Ben-Akiva et Lerman, 1979; Miller, 2005). Le surplus du consommateur estime le profit net qu'un individu retire d'une transaction conclue au prix du marché, et il équivaut à la différence entre le montant que le consommateur serait prêt à payer pour un bien et le prix réel de ce bien. On peut percevoir la fonction d'utilité comme une courbe de demande pour une destination spécifique dans laquelle un changement d'attributs peut provoquer un changement en matière de surplus du consommateur. Par exemple, un changement de la fréquence du service d'autobus pourrait augmenter l'accessibilité d'une épicerie et accroître le surplus du consommateur des individus qui prennent l'autobus pour se rendre au magasin en question. Cette situation peut être convertie en valeur monétaire.

Avantages et inconvénients de la mesure

Un avantage important de cette mesure est son cadre théorique solide. Elle est directement liée aux grandes théories microéconomiques et s'inspire des théories sur le comportement de déplacement. En d'autres termes, elle simule le choix des gens en intégrant l'attractivité de chaque destination et elle est basée sur des avantages économiques que les gens obtiennent en ayant accès à certaines activités. De plus, elle représente l'accessibilité individuelle beaucoup mieux que les mesures gravitaires, qui ne démontrent que l'accessibilité d'un endroit ou d'un emplacement.

Le troisième avantage est que les résultats peuvent être convertis en valeurs monétaires; les résultats représentés en dollars facilitent la comparaison entre différents scénarios et régions. Cependant, on doit être prudent en interprétant les résultats de cette manière, car le surplus du consommateur mesuré de cette façon ne représente pas forcément la volonté de payer. Autrement dit, les valeurs monétaires ne démontrent pas nécessairement combien les consommateurs sont prêts à payer pour cette accessibilité (Miller, 1999).

L'inconvénient principal de ce modèle est qu'il est difficile à interpréter et à vulgariser, car il repose sur des théories assez complexes. En outre, il est difficile de comparer les diverses fonctions d'utilité, par exemple entre différents quartiers. Finalement, cette approche exige beaucoup de données et des calculs complexes, ce qui pourrait expliquer sa faible utilisation dans la pratique (Geurs et Ritsema van Eck, 2001).

Les mesures mixtes

Afin de pallier les points faibles de la mesure spatio-temporelle, particulièrement la difficulté d'y incorporer des vitesses de déplacement variées, et d'améliorer son cadre théorique, Miller (1999) et Wu et Miller (2002) ont conçu une mesure mixte qui combine la mesure spatio-temporelle et celle basée sur le maximum d'utilité. Cette approche introduit un plus haut niveau de complexité où se superposent les contraintes de temps. Elle mesure l'utilité de participer à une activité discrétionnaire dans le contexte des activités obligatoires qui présentent des coûts de déplacement définis et des horaires fixes. Donc, si une personne est au travail jusqu'à 17 heures et qu'elle doit être chez elle à 20 heures, la série d'activités auxquelles elle pourrait participer à l'intérieur de cet intervalle sera délimitée par les coûts de déplacement et la durée de l'activité.

Le modèle se définit comme suit :

$$u_{ij}(a_k, T_k, t_k) = a_k^\alpha T_k^\beta \exp(-\lambda t_k)$$

où i est la première activité obligatoire (maison), où j est la deuxième activité obligatoire (travail), où k est l'activité discrétionnaire (commerce), où a_k est l'attractivité de l'activité discrétionnaire et où T_k est le temps alloué à l'activité discrétionnaire, définie comme :

$$\begin{cases} t_j - t_i - t_k > 0 \\ 0 < \text{autre} \end{cases}$$

et t_i , t_j représentent, respectivement, l'heure de fin de l'activité obligatoire i et l'heure de début de l'activité obligatoire j .

$$t_k = (d(x_i, x_k) + d(x_k, x_j))v^{-1}$$

où x_i est le vecteur de l'emplacement de l'activité obligatoire i , où $d(x_i, x_k)$ est la distance entre l'emplacement de l'activité i et l'emplacement de l'activité k , $d(x_k, x_j)$ la distance entre l'emplacement de l'activité k et l'emplacement de l'activité j , et où v est la vitesse constante de déplacement (qui doit être assouplie à l'aide d'un réseau SIG dans d'autres équations (Miller et Wu, 2000)).

Avantages et inconvénients de la mesure

La mesure mixte de l'accessibilité exige plus de données que les mesures fondées sur le maximum d'utilité et elle est encore plus complexe à calculer. De plus, elle ne distingue pas les diverses opportunités selon leur attrait et elle ne tient pas compte de la concurrence. On présume que les vitesses de déplacement sont constantes; cela représente un important désavantage qui a été compensé par les méthodes plus récentes utilisant des réseaux dans les SIG. Ettema et Timmermans (2007) ont davantage développé ce modèle afin d'expliquer plusieurs facteurs absents du modèle spatio-temporel: la capacité des individus à modifier leur horaire, l'incertitude à l'égard des temps de déplacement, les temps de déplacement variables et l'influence de l'information sur le comportement de déplacement. Leur recherche a révélé que les pénalités de retard et la possibilité de décaler les activités avaient une incidence sur l'accessibilité. L'accès à de l'information en temps réel sur le temps des trajets (comme la localisation de la congestion) augmenterait l'accessibilité, particulièrement si les activités pouvaient entraîner des pénalités de retard. De plus, l'utilité de la mesure mixte a augmenté avec l'assouplissement des contraintes d'horaire, comme les heures de début et les durées. De tels éléments pointent vers certaines politiques à adopter pour accroître l'accessibilité, tels que les horaires de travail souples et les heures d'ouverture de commerce allongées.

Résumé des différentes mesures d'accessibilité

Comme nous l'avons décrit plus haut, les mesures d'accessibilité peuvent être réparties en trois groupes : les mesures basées sur la localisation, les mesures individuelles et les mesures fondées sur le maximum d'utilité.

Les mesures basées sur la localisation sont les plus répandues, car elles sont relativement simples à calculer et à interpréter et elles utilisent des données facilement accessibles. Elles évaluent l'accessibilité d'un emplacement et attribuent le même niveau d'accessibilité à tous les individus résidants à cet endroit. De plus, elles ne tiennent pas compte de l'enchaînement de déplacements, des déplacements à partir d'un point autre que le domicile, des différences individuelles et de la flexibilité dans la gestion de l'horaire. On doit porter une attention particulière au choix de la fonction d'impédance et inclure la concurrence si elle a une incidence sur l'activité mesurée. Ces mesures peuvent être très efficaces pour évaluer les changements dans l'accessibilité d'un lieu provoqués par des projets d'aménagement. On les utilise généralement dans les modèles hédoniques pour évaluer la volonté de payer des consommateurs pour accéder à diverses opportunités. Elles offrent une vision intuitive du

système de transport, ce qui en fait un outil précieux dans la planification participative ou communautaire.

Les mesures individuelles sont fondées sur le concept du prisme spatio-temporel et se préoccupent surtout des contraintes que les individus affrontent quotidiennement. Elles nécessitent des données recueillies au moyen d'enquêtes de déplacements ou des données GPS, qui peuvent être difficiles à obtenir. Elles sont idéales pour comparer les niveaux d'accessibilité des différentes populations dans une région selon des caractéristiques sociodémographiques. Elles aident à comprendre certaines contraintes liées à l'accessibilité qui sont habituellement négligées dans les mesures traditionnelles. Finalement, elles peuvent être utiles pour élaborer différentes politiques, par exemple les heures de travail flexibles.

Les mesures fondées sur le maximum d'utilité offrent le cadre théorique le plus robuste. Elles sont liées aux théories microéconomiques et au concept de comportement de déplacement. Cependant, elles sont difficiles à interpréter et à communiquer. Elles ont l'avantage de pouvoir être converties en valeurs monétaires, ce qui facilite la comparaison entre différents plans ou diverses régions, mais les théories sur lesquelles elles s'appuient sont très complexes. Elles exigent aussi beaucoup de données.

Quant aux mesures basées sur l'activité, elles ont beaucoup de potentiel. Elles incorporent plusieurs aspects liés au comportement de déplacement que les mesures traditionnelles ne traitent pas, mais elles nécessitent les données recueillies à l'aide d'un modèle de demande de déplacements basé sur les activités. Ces mesures sont surtout utiles pour évaluer les effets de certaines politiques ou de certains projets de transport sur différentes populations, comme l'effet d'un péage à l'heure de pointe sur les travailleurs et sur les individus qui ne travaillent pas ou la volonté des voyageurs à payer le montant d'un tel péage.

1.1.4 1.1.4 Modèles de transport et modélisation centrée sur les activités

Comme expliqué en introduction, en raison de contraintes temporelles, cette partie se concentre sur la partie du modèle urbain ayant trait à l'utilisation du sol. Néanmoins, le MTQ a fait part de son intérêt pour les modèles explicitement comportementaux afin de mieux comprendre et prévoir la demande de transport et les performances du système. Le MTQ a en outre précisé ne pas être intéressé par les approches apparentées aux modèles classiques en quatre étapes. Compte tenu de ces deux demandes, il semble évident que la direction la plus intéressante à explorer pour la partie transport du modèle urbain est la modélisation fondée sur l'activité.

Modèles de transport centrés sur les activités

Les études des années 1970 portant sur les fondements des comportements de mobilité ont identifié de nombreuses limites à l'utilisation de modèles séquentiels fondés sur les déplacements pour prévoir la demande de transport (Chapin, 1974; Hagerstrand, 1970). Néanmoins, jusqu'à ce jour, il existait peu d'incitations à revoir les procédures de prévision des déplacements. Les crises pétrolières des années 1970 ont orienté la recherche vers diverses mesures de réduction de la consommation d'énergie tournées notamment vers le contrôle de la demande et la gestion des systèmes de transport. Les modèles de prévision existants – largement statiques et agrégés – se sont alors révélés incapables d'anticiper les changements

de comportements susceptibles de résulter de ces mesures (McNally, 2000). Au cours des années 1990, une combinaison de facteurs a entraîné la résurgence d'un intérêt pour la conceptualisation des comportements de mobilité à des fins de modélisation.

L'achèvement du réseau autoroutier et les difficultés à étendre les réseaux routiers urbains ont conduit de nombreuses organisations de planification régionale à chercher à optimiser les systèmes de transport existants par le biais de mesures telles que les horaires de travail flexibles, la distribution d'information sur les déplacements, l'amélioration des flux motorisés, et la conversion de certains déplacements vers des modes de transport alternatifs.

Les changements de comportements de mobilité potentiellement engendrés par ce type de mesures ne peuvent pas être prévus au moyen de modèles fondés sur les déplacements, puisque ces modèles séparent les décisions de déplacement de leur contexte de participation à une activité et des contraintes temporelles. Au même moment, les progrès de l'informatique et l'utilisation des systèmes d'information géographique ont permis de formaliser et de tester des modèles qui n'existaient auparavant qu'à un niveau conceptuel ou empirique limité. Le soutien de la Federal Highway Administration a aussi eu un impact important, sous la forme du Travel Model Improvement Program (TMIP) dont le but était d'améliorer les pratiques de modélisation des transports et d'accompagner le développement d'une nouvelle génération de modèles de demande de transport.

La première démonstration d'un modèle opérationnel de déplacement centré sur les activités est antérieure au TMIP et a été conduite par Recker et coll. (1986a, 1986b). Le modèle STARCHILD a été développé pour étudier le covoiturage dynamique, mais il a été conçu uniquement à des fins de recherche et nécessite l'apport de nombreuses données restant aujourd'hui difficilement accessibles (McNally, 2000).

Les modèles de chaînes d'activités et de comportements de mobilité étaient couplés à une simulation mésoscopique de la circulation dans le travail d'Axhausen (1990). Pendyala et coll. (1997) ont développé un modèle de simulation fondé sur les activités capable de prédire comment les mesures de régulation des déplacements modifient la programmation des activités individuelles dans le temps. Les auteurs font la démonstration de leur modèle en l'utilisant pour évaluer l'impact de mesures régulatrices dans la région métropolitaine de Washington, D.C. Des modèles de prévision fondés sur les activités utilisant des systèmes d'information géographique ont aussi été développés par McNally (1998).

Bowman et Ben-Akiva (2001) ont construit un modèle économétrique de participation aux activités ayant pour cadre un logit imbriqué afin de prévoir des ensembles de déplacements (groupes de déplacements en chaîne). Leur modèle est calibré au moyen de données issues d'enquêtes de déplacements dans la région de Boston. Arentze et Timmermans (2004) ont développé un système de modèles visant à simuler les effets d'apprentissage chez les agents en matière de planification des activités et de comportement de mobilité. La tentative la plus ambitieuse à ce jour aux États-Unis a sans doute été le programme de recherche associé au système de modélisation TRANSIMS, décrit plus bas.

Les modèles fondés sur les activités sont nécessairement désagrégés et tentent de simuler des comportements de mobilité dans le cadre de limites spatio-temporelles. En raison d'interdépendances spatiales et temporelles, ce processus ne peut pas être modélisé dans un cadre qui considère les déplacements comme étant indépendants les uns des autres, et qui les génère à un niveau agrégé. Une approche alternative, centrée sur les agents plutôt que sur les déplacements, est généralement adoptée pour prévoir les déplacements de manière concrète.

Cette prise en compte des comportements des agents individuels, ainsi que l'ajout de paramètres temporels font des modèles de déplacement fondés sur les activités le complément naturel des modèles de microsimulation des transports et d'utilisation du sol se concentrant sur les activités des agents à l'échelle de l'individu ou du ménage.

Le Transportation Analysis and Simulation System (TRANSIMS) est un modèle prédictif fondé sur les activités combiné à un système de microsimulation de la circulation régionale (Barrett, 1995). Il contient cinq modules destinés à fournir des informations détaillées sur les impacts des embouteillages, les niveaux de congestion et la pollution (Meyer & Miller, 2000; Paul Waddell & Ulfarsson, 2004). Ces modules exécutent les quatre étapes du processus classique de planification des déplacements : génération des déplacements, distribution des déplacements, détermination des itinéraires, et affectation des itinéraires. Le cinquième module estime les émissions de polluants. Le modèle TRANSIMS est intéressant pour trois raisons : il fait évoluer les véhicules et les individus sur une grille de cellules de 7,5 m²; il comprend un modèle intégré d'utilisation des sols permettant de prendre en compte les changements d'usage, et il opère par incréments d'une seconde. TRANSIMS a été mis en œuvre à Portland, Oregon et Dallas, Texas (Hardy, 2011).

Un groupe de l'Université de Californie à Irvine a développé des modèles de microsimulation que Timmermans (2003) a appelés les « modèles de simulation Irvine ». À la suite de McNally (1998), Kulkari et McNally (2000) proposent un modèle de simulation des schémas d'activités-déplacements. Le modèle développé par Kulkari et McNally est fondé sur une classification de schémas représentatifs activités-déplacements. Plusieurs aspects fondamentaux de ces schémas sont fondés sur des données et utilisés pour simuler des schémas activités-déplacements dans un environnement particulier. Ce groupe a aussi étudié les systèmes multiagents (voir par exemple (Marca, Rhindt, & McNally, 2000; Rhindt, Marca, & McNally, 2003)).

Le Volet 1 a présenté la littérature traitant des modèles de localisation des entreprises et des ménages, des modèles développés pour représenter le concept d'accessibilité ainsi que la modélisation du transport. Les modèles théoriques fondamentaux ont été préalablement présentés et, par la suite, les modèles ayant une base empirique. Le Volet 2 décrit sept modèles opérationnels développés afin de modéliser la demande de transport et l'utilisation du sol. Par la suite, le Volet 2 présente ce que le modèle sans compromis devrait être et utilise ce modèle afin d'analyser la pertinence d'utiliser un des modèles opérationnels plutôt qu'un autre.

1.2 Volet 2

Le second volet de ce rapport passe en revue les cadres existants de modélisation intégrée des transports et de l'utilisation du sol. Comme précisé en introduction, cette partie est centrée sur les modèles intégrés et non sur les diverses approches connexes de modélisation des déplacements (à l'exception des cas où ces deux dimensions font partie du même cadre de modélisation). En outre, cette version du rapport ne traite pas de tous les modèles existants, mais se concentre sur sept modèles opérationnels parmi les plus connus. Après une présentation des différents modèles ainsi que de leurs avantages et inconvénients, les auteurs décrivent ce qu'ils considèrent être un modèle sans compromis. Ce modèle sera fondé sur les conclusions du premier volet concernant la modélisation des choix de localisation des entreprises et des ménages, ainsi que de l'accessibilité. La partie suivante explique comment et dans quelle mesure les modèles présentés pourraient servir de cadre à un modèle urbain sans compromis pour Montréal. Ce second volet se conclut par la proposition d'un cadre de modélisation, assorti d'un plan de développement.

1.2.1 Modèles intégrés de transport et d'utilisation du sol

Les modèles constituent un outil d'analyse fondamental pour les urbanistes travaillant à la prévision des déplacements et de l'utilisation du sol. Il est d'usage dans ce domaine de considérer qu'il existe une relation réciproque entre transports et utilisation du sol. Depuis plus de quarante ans, les chercheurs en urbanisme tentent de formaliser cette relation au moyen de méthodes mathématiques, statistiques et logiques, ainsi qu'à développer des modèles capables de prédire les conséquences d'interventions publiques sur les systèmes de transports et d'utilisation du sol.

Cette partie passe en revue les principaux cadres théoriques utilisés par les chercheurs pour représenter la relation complexe entre transport et utilisation du sol. Tous ces cadres théoriques ont orienté le développement de différents modèles opérationnels. Un modèle opérationnel est un modèle ayant été mis en œuvre à au moins une occasion, en utilisant des données réelles. Ce rapport présente plusieurs modèles opérationnels de manière relativement détaillée, afin d'illustrer comment ces cadres de modélisation sont utilisés pour représenter des évolutions urbaines. Les modèles présentés sont ITLUP, MEPLAN, TRANUS, PECAS, MUSSA, UrbanSim, et ILUTE. Ces modèles ont été retenus pour la robustesse de leurs fondements théoriques et/ou parce qu'ils ont été largement mis en œuvre ou testés (les modèles les plus anciens, comme ITLUP, ont souvent une base théorique représentant les choix de transport et d'utilisation du sol de manière moins fidèle que les modèles plus récents – mais en général, ils ont été plus largement appliqués).

Avant de présenter les modèles, quelques éléments de contexte seront fournis au sujet des relations entre transports et utilisation du sol ainsi que sur la chronologie de leur modélisation. Les deux premiers cadres de modélisation qui seront ensuite exposés sont fondés sur des modèles agrégés d'interaction spatiale et sur la théorie de l'utilité aléatoire. Ces deux cadres de modélisation forment le socle sur lequel est bâtie la grande majorité des modèles opérationnels actuellement utilisés dans le domaine de la planification urbaine et des transports. Ils peuvent être qualifiés de cadres de modélisation « descendants » (top-down) car ils déterminent les

interactions entre réseaux de transport et localisation comme un ensemble de relations agrégées à partir du comportement d'un individu représentatif. Le comportement de cet individu est généralement dérivé de la moyenne d'un échantillon représentatif de la population. Le troisième cadre de modélisation présenté est celui de la microsimulation désagrégée. Les modèles de microsimulation recouvrent un grand nombre d'approches illustrant les dynamiques de changements d'utilisation du sol et de comportements de mobilité. Néanmoins, les modèles de microsimulation partagent en général un objectif de désagrégation de la population et de simulation ascendante (« bottom-up ») des évolutions, redéfinissant ainsi la nature des acteurs dans le modèle.

La relation transport-utilisation du sol

Les réseaux de transport et les schémas spatiaux d'utilisation du sol s'influencent mutuellement dans le temps. Une évolution des réseaux de transport, comme la construction d'une nouvelle liaison ou l'extension d'une liaison existante, influence toujours la distribution des investissements fonciers qui, à son tour, influence la demande de transport depuis et vers un lieu donné. Cette relation est parfois qualifiée de « lien » ou de « cycle » transports-utilisation du sol pour souligner son caractère rétroactif (Kelly, 1994).

Les changements de localisation des activités et de demande de transports dépendent fortement de l'accessibilité – c'est-à-dire de la capacité à accéder à diverses activités et opportunités (travail, magasinage, etc.) à partir d'un lieu donné. L'évolution de l'accessibilité relative est mesurée indirectement lorsque les chercheurs tentent d'identifier l'influence d'infrastructures nouvelles (comme une liaison autoroutière ou une station de métro) sur les marchés fonciers locaux. Dans ce cas, l'accessibilité est généralement estimée par une mesure d'accès au réseau de transport – telle que le temps ou la distance de déplacement (Ryan, 1999). En général, le degré d'influence sur le marché foncier est fonction des conséquences de la nouvelle infrastructure de transport sur l'accessibilité régionale, et est donc à peu près proportionnel à l'augmentation de la vitesse (et à la réduction du temps de déplacement) permise par la nouvelle infrastructure (Cervero, 1984).

Afin de rendre opérationnelle la relation entre transports et utilisation du sol dans un modèle, on utilise des mesures d'accessibilité pour déterminer la localisation des activités. On postule généralement que les ménages cherchent à s'établir dans les zones offrant la meilleure accessibilité à des opportunités telles que l'emploi ou le magasinage, alors que les entreprises cherchent à s'implanter dans les zones offrant la meilleure accessibilité au marché du travail, parfois divisé selon des secteurs d'activité. Dans les modèles représentant explicitement le marché foncier et le marché des locaux d'activité, ces facteurs d'accessibilité peuvent avoir une influence déterminante sur les prix. La plupart des modèles de transport et d'utilisation du sol contiennent (ou sont lointainement couplés avec) une composante d'utilisation du sol intégrée à un modèle de demande de transport avec affectation aux réseaux. Il est donc possible de calculer des mesures d'accessibilité tenant compte des temps de déplacements sur réseaux congestionnés, ce qui fournit une mesure de l'impact de la congestion sur l'accessibilité régionale et la localisation des activités. Afin de simuler ces changements dans la modélisation de régions métropolitaines, la région est généralement divisée en un ensemble de petites zones géographiques, similaires (et dans bien des cas identiques) aux zones utilisées pour prévoir la

demande régionale de transport. On calcule l'accessibilité de chaque zone par rapport à toutes les autres zones de la région via le réseau de transport régional. Les changements du réseau de transport affectant le temps de trajet entre deux zones ont donc un impact sur l'accessibilité des lieux situés dans ces zones.

Modèles opérationnels étudiés

Modèles fondés sur le principe d'interaction spatiale

Plusieurs modèles ont prolongé le modèle Lowry de base (voir la section Modèles d'interaction spatiale, p. 20) dans de nouvelles directions. Garin (1966) développe le modèle Lowry en représentant les composantes du modèle sous forme de matrices et en adoptant comme base distributive un modèle d'interaction de type gravitaire, intégrant une contrainte de production. Le modèle Lowry-Garin offre un couplage amélioré entre distribution et génération en utilisant des sous-modèles distribuant toutes les activités à chaque itération (Timmermans, 2003).

À partir du travail de Goldner sur le modèle Lowry-Garin, Putman (Putman, 1974, 1983, 1991) développe le modèle Integrated Transportation and Land Use Package (ITLUP), généralement considéré comme étant le premier programme véritablement opérationnel de modélisation des transports et de l'utilisation du sol (e.g., Southworth, 1995). En 2007, Fehr et Peers rapportaient qu'ITLUP était le programme de prévision d'utilisation du sol le plus utilisé aux États-Unis (Fehr and Peers, 2007). ITLUP a été employé dans environ quinze régions aux États-Unis et a été calibré à plus de quarante reprises (J. D. Hunt, Miller, & Kriger, 2005). Ce programme offrait une représentation des réseaux de transport – incorporant les effets de la congestion sur les temps de déplacement à la distribution des activités.

ITLUP contient un modèle d'utilisation du sol et un modèle de transports. Le modèle d'utilisation du sol est composé de deux sous-modèles distributifs : un modèle de distribution des ménages appelé DRAM (Disaggregated Residential Allocation Model), et un modèle de distribution des emplois appelé EMPAL (Employment Allocation model). Le modèle de transports utilise une approche en quatre étapes, fondée sur les déplacements : génération des déplacements, distribution, choix modal et choix d'itinéraire. La génération et la distribution des déplacements sont effectuées par DRAM parallèlement à la distribution des ménages, alors que le choix modal et le choix d'itinéraire sont gérés par des sous-modèles séparés (Putman, 2001).

Tout d'abord, EMPAL distribue les emplois en fonction de l'accessibilité, de la population et du nombre d'emplois dans la période précédente. DRAM prévoit alors la distribution des ménages en utilisant les mesures d'accessibilité des lieux de la période précédente ainsi que la distribution zonale actuelle des emplois. À l'intérieur de DRAM, un sous-modèle calcule ensuite la consommation d'espace en combinant des données de l'année de référence à une prévision fondée sur une régression multiple. DRAM convertit alors les probabilités d'allocation d'un logement en déplacements motorisés. Les déplacements sont alloués au réseau, et les changements de coût de transport résultant de la congestion sont transmis aux modèles de localisation des emplois et des ménages, qui sont ensuite utilisés pour calculer la redistribution des activités en fonction de la nouvelle accessibilité des lieux (Southworth, 1995).

Comparé aux modèles opérationnels existants de transports et d'utilisation du sol, ITLUP requiert une quantité de données relativement modeste (en partie à cause de sa nature fortement agrégée), et peut ainsi largement être calibré à partir de données publiques existantes. Toutefois, ITLUP a aussi des limites importantes. Tout comme les autres modèles agrégés fondés sur des principes gravitaires d'interaction spatiale, ITLUP repose sur un socle théorique étroit. Par ailleurs, ce modèle ne tient pas compte du prix de la terre et ne peut donc pas modéliser explicitement les prix d'équilibre du marché dans les processus de développement immobilier.

De plus, les zones relativement larges utilisées dans ITLUP excluent son usage pour une analyse détaillée des mesures d'intervention publique en matière de transport (Putman, 2001). Zhao et Chung (2006) ajoutent aux limites d'ITLUP son incapacité à prendre en compte les incitations, monétaires ou autres, destinées à favoriser certains usages du sol. Ils notent aussi qu'ITLUP est susceptible de sous-estimer l'impact de l'amélioration de certaines infrastructures en raison de son nombre restreint de variables indépendantes. Bowman (2006) relève que ce modèle n'a pas de mécanisme de prix de marché des logements et requiert une prévision régionale exogène du nombre total de ménages par catégorie de revenus.

Le modèle TELUM (Transportation, Economic and Land Use Model), dérivé d'ITLUP, a été développé par Stephen Putnam pour la Federal Highway Administration en 1971 (Putman, 1983). TELUM contient trois modèles distincts : DRAM, EMPAL, et un modèle standard de demande de transport. Ces trois modèles prédisent la localisation et la croissance des nouveaux développements résidentiels et non résidentiels pour de multiples zones d'analyse définies par l'utilisateur à partir des développements existants et antérieurs, de la localisation des infrastructures de transport (ou de leur amélioration), et des coûts de déplacement entre zones (Duthie, Kockelman, Valsaraj, & Zhou, 2007).

Plus récemment, le modèle ITLUP a été mis à jour pour incorporer des modifications de certains de ses sous-modèles, ainsi que de nouveaux outils de visualisation des données (Putman, 2001). Ce nouvel ensemble, appelé METROPILUS, est intégré à un système d'information géographique (SIG) améliorant le traitement et la visualisation des données. Le modèle d'interaction spatiale est à contrainte simple et a été modifié pour intégrer un modèle de choix similaire au logit multinomial classique. Il intègre des fonctions d'attractivité multivariées et multiparamétriques, ainsi qu'un terme de décalage temporel dans les versions les plus récentes, afin de mieux prendre en compte les dynamiques de lieux et mieux prévoir les choix de localisation. De plus, de nouvelles procédures de contrainte permettant d'intégrer des contraintes spécifiques à une zone ou à un secteur peuvent limiter la distribution des activités dans certaines zones en fonction de la disponibilité des terrains. L'offre de terrains est gérée par une fonction *ad hoc* (LANCON), qui traduit la demande de localisation des employeurs (à partir d'EMPAL) et la demande de localisation des ménages (à partir de DRAM) en intensités d'utilisation du sol. L'utilisation du sol par catégorie est exprimée par un taux d'utilisation du sol calculé au moyen d'équations prenant la forme de fonctions de production.

La première génération de modèles d'utilisation du sol, et de modèles intégrés de transport et d'utilisation du sol fondés sur la formulation d'interactions spatiales, a donné naissance à de

nombreux modèles ayant été testés et appliqués dans des contextes variés. Certains modèles, comme le système METROPILUS de soutien à la planification, prolongent l'héritage de ces modèles aujourd'hui. Néanmoins, très peu d'exemples de ce type de modèle continuent d'exister. En effet, ils présentaient de nombreux défauts : la plupart étaient des modèles d'équilibre statiques, incapables de tenir compte des dynamiques du système urbain. Aucun ne modélisait explicitement les prix sur le marché foncier; les zones étaient fortement agrégées et manquaient de niveau de détail spatial, et les modèles n'avaient pas de fondements théoriques robustes. Ce manque de fondements est peut-être la raison pour laquelle les prévisions de la plupart de ces modèles étaient erronées. Plusieurs tentatives d'utilisation de ces modèles pour analyser des politiques publiques se sont ainsi soldées par des échecs retentissants (Batty, 1979). Certaines d'entre elles sont retracées par Lee (1973), dans une critique soulignant certaines failles des modèles de première génération.

Modèles centrés sur les intrants-extrants

MEPLAN

MEPLAN et TRANUS, deux des modèles les plus importants et les plus utilisés de transport et d'utilisation du sol, sont fondés sur l'approche intrants-extrants ainsi que sur la théorie de l'utilité aléatoire, et largement construits autour d'un modèle économique régional central. Le modèle MEPLAN a été développé dans les années 1960 par Marcial Echenique & Partners, une entreprise de conseil privée, située à Cambridge, Royaume-Uni (M. H. Echenique, 2004; M. H. Echenique, Crowther, & Lindsay, 1969; M. H. Echenique et coll., 1990; J. D. Hunt, 1994; J. D. Hunt & Simmonds, 1993). À ses débuts, MEPLAN était un modèle relativement simple de stock urbain et d'activités (M. H. Echenique et coll., 1969), qui s'est développé au cours des années 1970 pour devenir un modèle complet de simulation urbaine incluant les transports, le marché foncier, l'évaluation économique, ainsi qu'un modèle régional intrants-extrant (T. De la Barra, Echenique, Quintana, & Guendelman, 1975; Flowerdew, 1977; Geraldès, 1978; Hirton & Echenique, 1979; Williams, 1978). Au milieu des années 1980, le modèle intégré complet a été compilé en un ensemble de programmes informatiques pouvant être utilisés dans n'importe quelle région urbaine sous réserve d'avoir les données nécessaires. Hunt et coll. (2005) estiment que MEPLAN a été utilisé dans plus de 25 régions urbaines dans le monde, dont Sacramento (Californie), le Cross-Cascades Corridor aux États-Unis, Helsinki, Santiago, Vicenza, Sao Paulo, et Naples (Italie). MEPLAN a également été utilisé pour modéliser les impacts régionaux du tunnel sous la Manche, entre la France et l'Angleterre (J. D. Hunt et coll., 2005; Rohr & Williams, 1994; Wang & Wu, 2010; Michael Wegener, 1994).

Les ménages et les activités économiques sont alloués à des zones, et les interactions entre ces secteurs – définis par un modèle spatial intrants-extrants à utilité aléatoire servant à prédire les flux commerciaux par secteur entre les zones d'une région – produisent une demande de transport (M. Echenique, Moilanen, Lautso, & Lahelma, 1995; M. H. Echenique et coll., 1969). Le système spatial intrants-extrants remplace donc les étapes de génération et de distribution des déplacements des modèles de transport centrés sur les déplacements.

Le cadre intrants-extrants est utilisé pour estimer la valeur nominale et la quantité de produits de chaque secteur qui seront consommés dans une zone. Une fois la consommation de chaque

secteur connue, un modèle de choix à utilité marginale distribue cette consommation entre toutes les autres zones pour déterminer leur production (An, 2009). La désagrégation spatiale est obtenue en attribuant la production à une consommation distribuée entre les zones selon des modèles de choix discrets répondant aux prix de production et de transport (J. D. Hunt et coll., 2005). Les interactions entre les différents secteurs dans les différentes zones génèrent des déplacements prenant la forme de flux de marchandises et de circulation de passagers distribués entre modes de transport par des modèles logit imbriqués, puis répartis sur le réseau de transport au moyen d'un équilibre stochastique des utilisateurs (J. E. Abraham & J. D. Hunt, 1997; An, 2009; Fehr and Peers, 2007). La congestion et les temps de déplacement issus du modèle de transport sont ensuite retransmis aux modèles économiques et d'utilisation du sol pour la période suivante, générant des effets graduels sur l'accessibilité. Ce mécanisme affecte les choix de localisation des entreprises et des ménages puisque l'utilisation du sol est déterminée par le niveau d'accessibilité et les schémas d'utilisation du sol observés dans la période précédente. L'aspect le plus remarquable du cadre MEPLAN est le modèle intrants-extrants, qui traite les déplacements comme une demande dérivée (J. D. Hunt et coll., 2005). La structure de MEPLAN permet à la fois une modélisation à l'échelle intra-urbaine et interurbaine. L'une des faiblesses du modèle est qu'il doit utiliser des zones relativement grandes pour modéliser les flux spatiaux dans le modèle intrants-extrants, ce qui rend difficile l'analyse des politiques publiques concernant les réseaux de transport. De plus, MEPLAN requiert des prévisions extérieures concernant les développements résidentiels et l'espace de bureau pour chaque période (Bowman, 2006).

TRANUS

Le modèle TRANUS (Transporte y Uso del Suelo – (Tomas de la Barra, 1989) est similaire à MEPLAN en ce qu'il utilise un modèle spatial intrants-extrants pour générer et distribuer les activités. Ce modèle convertit les flux économiques entre zones et secteurs en flux de passagers et de marchandises. L'économie régionale est divisée en secteurs, la demande pour chaque zone et chaque secteur étant ensuite générée puis distribuée aux secteurs et aux zones de production au moyen d'un modèle logit multinomial. Si les niveaux de production dans un secteur sous contrainte sont supérieurs à leur niveau maximal, le prix d'équilibre est ajusté à la hausse; s'ils sont inférieurs, il est ajusté à la baisse. Un modèle d'offre foncière simule le comportement des développeurs qui choisissent où construire (par exemple, sur des terrains nouveaux plutôt que des terrains existants), quel type d'espace construire, et à quelle densité. Ce processus de choix est décrit par un ensemble de modèles logit régis par des prix ou des loyers explicites pour le stock neuf et le stock de remplacement, ainsi que les coûts de construction et de démolition.

L'une des caractéristiques distinctives de TRANUS est son modèle relativement avancé de prévision de la demande de transport fondé sur les déplacements. Les flux de circulation entre zones sont générés de la même manière que dans MEPLAN : le modèle d'utilisation du sol génère des matrices représentant la demande potentielle de transport, puis le modèle de déplacements convertit cette demande potentielle en déplacements réels attribués aux différentes options d'offre de transport. Les coûts sont alors recalculés de manière itérative pour intégrer l'effet de la congestion sur les temps de déplacement. Les parts modales sont ensuite estimées au moyen d'un modèle logit et les déplacements sont attribués aux différentes

combinaisons modales par le biais d'un second modèle logit. Les déplacements sont ensuite convertis en nombre de véhicules par mode de transport pour chaque maillon du réseau. Enfin, la vitesse des déplacements et les temps d'attente sont ajustés selon les niveaux de congestion – qui dépendent de la demande et de la capacité de chaque maillon du réseau. L'accessibilité est calculée comme une mesure d'utilité logarithmique composite à partir du modèle de choix modal et directement transmise au modèle d'utilisation du sol pour générer un nouvel ensemble de flux spatiaux. Ce processus se poursuit de manière itérative jusqu'à ce qu'une convergence soit atteinte (Timmermans, 2003). Une autre innovation de TRANUS est le recours à la théorie de l'utilité aléatoire (McFadden, 1973). Bien que MEPLAN utilise l'approche des choix discrets dans ses modèles de transport, TRANUS s'en sert dans toutes les composantes du modèle, y compris pour la génération des déplacements, les choix modaux, les choix d'itinéraire, les choix de localisation, les choix d'utilisation du sol, etc. TRANUS est en essence une longue chaîne de modèles de choix discrets (Modelistica, 2007). Une autre des caractéristiques propres à TRANUS est sa représentation détaillée des transports collectifs.

TRANUS a initialement été appliqué à la région de Caracas au Venezuela (Tomas de la Barra, 1989; Tomas de la Barra & Rickaby, 1982). Ce modèle a également été mis en œuvre dans certaines régions des États-Unis, comme à Baltimore, Sacramento et Portland (Bowman, 2006; Tomas de la Barra, 1984, 1989; Tomas de la Barra & Rickaby, 1982; Hardy, 2011; J. D. Hunt et coll., 2005). Tout comme MEPLAN et ITLUP, TRANUS a été compilé dans un logiciel pouvant être utilisé sur un ordinateur personnel (Tomas de la Barra, 1984). Parmi les points forts de TRANUS, Zhao et Chung (F. Zhao & Chung, 2006) notent sa disponibilité commerciale, ses applications passées dans plusieurs pays, son interface utilisateur conviviale sous Windows, ses bases de données orientées objet, ses capacités d'interface SIG, et sa compatibilité avec des contextes variés, allant du simple modèle urbain au modèle national complexe. Parmi les limites de TRANUS, on peut citer ses larges zones et les coûts élevés d'assistance logicielle et de conseil.

PECAS

Le modèle PECAS (Production, Exchange, and Consumption Allocation System), développé par Hunt et Abraham à l'Université de Calgary (J. D. Hunt & Abraham, 2003; J. D. Hunt & Abraham, 2005; J. D. Hunt & Abraham, 2009) est une généralisation de l'approche spatiale intrants-extrants utilisée par MEPLAN et TRANUS. Ce modèle est fondé sur une structure d'équilibre quasi-dynamique avec flux d'échanges – incluant biens et services, main d'œuvre, et espace – entre production et consommation. Il utilise des coefficients techniques variables sensibles au coût des ressources et à l'accessibilité des transports ainsi que des prix variables d'équilibre du marché. Les flux entre zones de production et zones d'échange ainsi qu'entre zones d'échange et zones de consommation sont issus de modèles logit imbriqués tenant compte des prix d'échange et de l'utilité négative du transport. Comme dans d'autres modèles spatiaux intrants-extrants, les flux commerciaux sont convertis en demande de transports et répartis sur les réseaux pour calculer les temps de déplacements en intégrant la congestion (désutilité). Les prix de l'espace stimulent les actions des développeurs en définissant l'évolution de l'offre. Les actions des développeurs sont représentées au niveau de la parcelle, de la cellule de grille, ou de la zone. Ce système est exécuté pour chaque année de la

simulation – l'utilité des déplacements et l'évolution de l'espace enregistrés au cours d'une année influençant les flux d'échange l'année suivante (J. D. Hunt & Abraham, 2005).

PECAS est composé de deux parties : un modèle spatial intrants-extrants et un modèle de développement foncier. Le modèle intrants-extrants est un modèle logit imbriqué de trois types de choix. Le premier est le choix de localisation des activités. Le second est la combinaison de biens, services, main d'œuvre et surface disponible à consommer ou à produire. Le troisième est le lieu d'échange des biens et services consommés ou produits. Les choix de lieu d'échange produisent les matrices origines-destinations des mouvements de biens et de personnes, qui peuvent être utilisées pour répartir la circulation et générer les impédances de la période suivante. La seconde partie de PECAS est le modèle de développement foncier. Les échanges entre acteurs engendrent de la rareté, ce qui affecte les prix, l'offre, et la demande pour la période suivante. Les développeurs décident ce qu'ils vont développer lors de la période suivante en fonction des profits attendus – utilisés comme fonctions d'utilité dans un modèle logit du choix de développement. Cette information est alors renvoyée au modèle de décisions de localisation (Bowman, 2006; Clay, 2010; Fehr and Peers, 2007; Johnston & McCoy, 2006).

En plus des deux modules de base décrits ci-dessus, PECAS se combine à deux autres modules pour représenter le système économique spatial dans son ensemble. Ces deux autres modules sont le modèle de transport – qui peut être un modèle standard agrégé de planification des transports – et le modèle de prévisions économiques et démographiques agrégé – qui est utilisé pour générer des prévisions économiques agrégées pour la région d'étude (J. D. Hunt & Abraham, 2009).

PECAS comprend maintenant des modules de déplacements centrés sur les activités, ainsi que des microsimulations de l'aménagement foncier à l'échelle de la parcelle. Bien que PECAS soit exécuté à l'échelle de la région métropolitaine, il peut aussi – comme d'autres modèles intrants-extrants – être adapté pour une application à plus grande échelle. Des versions récentes de ce système de modélisation ont été appliquées à des modèles d'utilisation du sol ou de transport à l'échelle d'un État dans l'Oregon et l'Ohio, ainsi qu'à l'échelle métropolitaine à Sacramento (Californie) et à Calgary et Edmonton au Canada (J. D. Hunt & Abraham, 2003). Hunt et Abraham (2003) relèvent que la collecte de données et le développement du modèle posent problème, et que la calibration de PECAS est rendue difficile par le nombre de coefficients dont les valeurs doivent être calculées.

Modèles de marché foncier

MUSSA

De nombreux modèles basés sur l'utilité aléatoire de transport et d'utilisation du sol sont caractérisés par une représentation fine du marché foncier.

Martinez a développé un modèle du marché foncier urbain et du marché de la surface de plancher appelé Modelo de Uso de Suelo de Santiago (MUSSA) pour la ville de Santiago du Chili (F. J. Martinez, 1992, 1996). Sa principale innovation est l'utilisation d'un modèle « offre-choix », fondé sur le travail d'Ellickson (1981). Le cadre offre-choix combine les approches du marché foncier fondées sur l'offre de loyer et sur les choix discrets en traitant simultanément les

deux côtés d'une enchère dans un cadre à deux niveaux. L'application MUSSA fournit un modèle d'équilibre de l'offre et de la demande de surface de plancher dans lequel les acheteurs maximisent leur surplus, les vendeurs maximisent leurs prix, et les développeurs maximisent leurs profits. Les prix du stock de bâtiments sont déterminés de manière endogène à l'intérieur du modèle.

La composante transport de MUSSA est un modèle sophistiqué de demande de transport en quatre étapes appelé ESTRAUS et lié au modèle d'utilisation du sol. ESTRAUS offre une représentation exceptionnelle des réseaux de transport et la possibilité de modéliser la demande pour onze alternatives modales différentes, comprenant la route, le transport collectif et les modes mixtes. Les modèles combinés de transport et d'utilisation du sol sont appelés 5-LUT (modèles de transports et d'utilisation du sol en cinq étapes) et peuvent fournir des prévisions équilibrées d'utilisation du sol et de demande de transport.

Une fonction de prix proposé est utilisée pour prédire la localisation des ménages et des entreprises et les loyers qui en découlent, d'après le travail d'Ellickson (1981). Les variables utilisées dans le modèle de localisation des ménages incluent la proportion de terrains résidentiels, des mesures d'accessibilité, et des caractéristiques des quartiers comme la mixité d'utilisation des sols et le prix de la terre. Les variables utilisées dans le modèle de localisation des emplois incluent la proportion de terrains industriels, l'accessibilité des emplois, le nombre d'emplois de proximité, et le prix de la terre (An, 2009). Un modèle logit multinomial est utilisé pour estimer les offres de prix. L'utilisation de la théorie de l'offre de loyer est identique à celle qui en est faite dans le modèle RURBAN (K. Miyamoto, 1993; Kazuaki Miyamoto, Nakamura, & Shimizu, 1986; K. Miyamoto & Udomsri, 1996; Wang & Wu, 2010), présenté plus loin.

Pour chaque année de prévision, MUSSA requiert les données suivantes : index d'accessibilité; nombre total de ménages par zone; activité totale des agents non résidentiels par grappe; revenu moyen des résidents; surface de plancher allouée aux commerces et aux services pour chaque zone; règlement d'urbanisme; régime fiscal et subventions; taille des terrains; surface de plancher; et type de bâtiment pour chaque logement (F. Martinez & Donoso, 2004). MUSSA présente l'avantage d'avoir une structure hautement désagrégée. Les zones d'analyse de transport (ZATs) sont utilisées comme unités d'analyse spatiale de base, et un niveau de désagrégation plus poussé est à l'étude. De même, les types de ménages sont très désagrégés : on en compte 65 différents dans le modèle de Santiago au Chili. On a dit que son niveau de désagrégation permettrait facilement la conversion de MUSSA en un modèle fondé sur des microsimulations (J. D. Hunt et coll., 2005). Bowman (2006) relève que MUSSA ne distribue apparemment pas les ménages par catégorie selon un modèle comportemental.

Modèles d'équilibre général calculable

RELU-TRAN

L'amélioration de la puissance des ordinateurs et une meilleure collecte de données rendues possibles par l'avancement technologique ont permis l'élaboration de modélisation régionale intégrant l'économie et le transport. Les modèles d'équilibre général calculable sont une sous-classe de modèles économiques permettant de modéliser une économie et d'estimer l'impact sur celle-ci de modifications contextuelle tels qu'un changement de taxation, l'impact de

changement réglementaire ou la construction d'infrastructure majeure. Les modèles prévisionnels utilisant l'approche d'équilibre général calculable sont passés par deux phases évolutives distinctes (Anas, 2007). Premièrement, les modèles se sont améliorés en intégrant de mieux en mieux les fondements théoriques microéconomiques sur lesquelles est basée l'idée d'équilibre général calculable. Deuxièmement, les modèles développés ont essayé à divers degrés d'intégrer explicitement l'interaction entre le transport et l'utilisation du sol.

RELU-TRAN (Regional Economy, Land Use, and Transportation) est un modèle basé sur ces fondements théoriques. Le modèle a été développé par Alex Anas du département d'économie de l'université d'état de New York à Buffalo entre 1999 et 2005. Le modèle simule les marchés urbains clés afin de déterminer l'impact de mise en place de nouvelles politiques ou de modifications de celles existantes. Le modèle a été utilisé précédemment afin de déterminer l'impact de nombreuses politiques gouvernementales telles que l'instauration de péage, la taxation de l'essence et certains règlements de zonage, et afin d'évaluer l'effet de certaines réalités sociales tel que l'itinérance.

La structure du sous-module RELU est composée de zones où interagissent les acteurs économiques fondamentaux. La région métropolitaine est divisée en zones principales accompagnées de zones secondaires représentant la région avoisinante ainsi que le reste du monde. Chaque zone est composée d'édifices résidentiels, commerciaux et industriels de certains types et de terrain non développé. Les zones sont également composées d'industries, de consommateurs, de promoteurs ainsi que de propriétaires.

Les consommateurs sont distribués selon des groupes de compétences auxquelles est rattaché un certain salaire. Les consommateurs font une série de choix discrets déterminant leur impact dans le système économique régionale. Premièrement, en fonction de ses compétences, un consommateur décide dans quelle zone il travaillera. Deuxièmement, il choisit dans quelle zone de résidence habitée et dans quel type d'édifice. Les choix subséquents dépendent des deux premières décisions et du budget disponibles. Le consommateur tentera d'optimiser la fonction d'utilité composée de la quantité d'espace résidentielle utilisée, le nombre d'heures annuel travaillé ainsi que la consommation de biens dans les différents commerces de détail. Les décisions prises par les consommateurs sont utilisées afin de construire la matrice origine-destination utilisée par le sous-modèle TRAN gérant le trafic dans la région.

Les industries sont classées dans des catégories produisant différents biens et services (extrants) nécessitant certaines ressources (intrants). L'utilisateur peut choisir le nombre d'industries de base souhaité pouvant exporter ses extrants, en plus de trois industries imbriquées dans le modèle. L'industrie du commerce de détail se démarque des autres par le fait que ses extrants ne sont pas exportables, mais plutôt consommés dans la région par les consommateurs. L'autre exception est une industrie spécialisée qui est rattachée à chacun des types d'édifices, ne produisant que sa construction ou sa démolition et ne vendant ses services qu'aux promoteurs présentés plus bas. Les industries minimisent les coûts rattachés à la main-d'œuvre, à l'espace locatif utilisé, aux intrants achetés des industries intermédiaires et, dans le cas des commerces aux détails, le coût de déplacement que doivent encourir les consommateurs voulant acheter les extrants.

Les propriétaires font un choix unique. Ils doivent décider de louer un espace ou de le laisser vacant. Cette décision donnera le taux d'occupation régional des édifices. La décision est basée sur la maximisation des profits en comparant le coût d'entretien d'un espace vacant et le revenu d'un espace occupé soustrait de son coût d'entretien. Le logit binomial résultant donnera la probabilité qu'un édifice soit occupé ou non.

Les promoteurs déterminent la densité parcellaire et agrégée en décidant si un lot doit être développé ou demeurer vacant. La construction ou la démolition d'un édifice est décidée par les promoteurs, mais l'action est entreprise par l'industrie spécialisée à cet effet mentionnée ci-dessus. Les promoteurs maximisent leurs profits en fonction des coûts de construction ou de démolition et des coûts non financiers rattachés à chaque type d'édifice dans chaque zone de la région. Un développeur achète un lot d'un propriétaire au début d'une année et décide à la fin de l'année, afin de maximiser son profit, s'il souhaite garder le lot vacant, construire un nouvel édifice, conserver le lot comme tel ou démolir l'édifice occupant le lot.

Le gouvernement n'est pas un acteur actif du modèle, mais agit plutôt comme trame de fond aux activités économiques régionales. Ainsi, le gouvernement va affecter les décisions des autres acteurs en mettant en place des taxes et des réglementations. Les taxes de base sont l'impôt sur le revenu et sur la valeur foncière. Toutefois, le modèle permet d'intégrer d'autres formes de taxation telles que le péage ou une taxe sur l'essence ce qui influencera les décisions des acteurs.

TRAN est le sous-modèle intégrant la demande de transport générée par l'activité des consommateurs provenant du sous-modèle RELU. Il gère la matrice origine-destination résultant des déplacements pendulaires de la zone de résidence à la zone de travail, et des déplacements de la zone de résidence aux commerces de détail. TRAN débute par octroyer un mode (automobile, transport en commun et autres) à tous les déplacements des consommateurs prenant place dans la région puis affecte les déplacements automobiles dans le réseau routier. L'affectation se fait par une équation minimisant les coûts généraux perçus de déplacement en recherchant une convergence suite à de multiples itérations. Les coûts incluent le temps de déplacement et les coûts encourus par unité de distance. Le flot de déplacement généré pour chaque segment de route est fonction de sa capacité et de la demande en transport résultant de l'affectation routière.

De nombreux aspects de RELU-TRAN pourraient être améliorés, particulièrement dans le sous-modèle TRAN qui ne prend en compte que les déplacements des consommateurs utilisant l'automobile. Le modèle est utilisé aux États-Unis afin de déterminer l'impact de politique publique et reçoit un financement constant de l'Environmental Protection Agency (EPA) depuis 2006. Le modèle n'a pas été utilisé par des agences de transport afin de modéliser la demande, de l'affecter dans le réseau et de prévoir son évolution.

Modèles désagrégés et modèles de microsimulation

Depuis la fin des années 1980, les progrès dans les domaines des capacités informatiques de calcul et du stockage de données ont permis aux chercheurs de commencer à développer des modèles corrigeant les défauts des tentatives précédentes de modélisation à grande échelle et intégrant des processus d'évolution urbaine avec un niveau de détail adéquat (Clarke, 1996).

Plusieurs modèles de microsimulation de l'utilisation du sol et des transports ont été développés (Hayashi & Tomita, 1989; John D. Landis, 1992; John D Landis, 1994; Mackett, 1990; Miller & Salvini, 2001; M. Wegener & Spiekermann, 1996). On trouve parmi eux des modèles de comportement de mobilité centrés sur les activités, des modèles multiagents de transport et d'utilisation du sol, et des modèles d'utilisation du sol fondés sur des grilles de cellules. Le fondement conceptuel commun à tous ces modèles est qu'ils tentent de représenter les processus de changement de manière ascendante (« bottom-up »); c'est-à-dire qu'ils tiennent compte du comportement d'agents individuels dans l'espace et/ou dans le temps, ainsi que des interactions entre agents. Tous ces modèles peuvent être qualifiés de « microsimulations », ce qui appelle une définition plus précise. Telle que définie par Miller (2003), la microsimulation est « une méthode ou approche (plutôt qu'un modèle en tant que tel) de mise en œuvre d'un modèle désagrégé dans le temps ». Les méthodes de microsimulation sont particulièrement efficaces pour modéliser la nature complexe et dynamique des systèmes urbains, où les interactions entre agents du modèle engendrent de nouvelles propriétés.

Les modèles de microsimulation fondés sur les comportements individuels se sont révélés être des instruments efficaces pour modéliser le développement complexe de la structure spatiale urbaine, ils sont aussi de plus en plus utilisés dans les récents modèles ascendants de comportements de mobilité et de simulation de transport et d'utilisation du sol.

En fait, l'application la plus avancée de la microsimulation semble être la modélisation des déplacements dans la plupart des modèles urbains (M. Wegener, 2004). Les principes de microsimulation offrent une flexibilité supplémentaire pour les prévisions à moyen et long terme lorsque l'univers de choix des agents évolue avec le temps (Miller, 2003). Ce type d'approche peut être particulièrement utile pour les modèles intégrés de transport et d'utilisation du sol lorsque l'évolution du contexte au cours de la période de prévision et les changements démographiques (vieillesse, migrations, etc.) risquent de rendre inexacts les modèles de prévisions statiques traditionnels.

En ce qui concerne la modélisation des transports et de l'utilisation du sol en milieu urbain, les modèles de microsimulation se prêtent facilement aux méthodes émergentes d'analyse de comportements de mobilité, comme la modélisation des déplacements centrée sur les activités. La nécessité de développer des manières plus flexibles et plus précises de mesurer les dynamiques des schémas de déplacement et les défauts reconnus des modèles classiques en quatre étapes pour évaluer des scénarios de mesures d'intervention publique impliquant une gestion de la demande de transport ou la mise en place de systèmes de transport intelligents, ont stimulé le développement de modèles prédictifs utilisant une approche centrée sur les activités.

Les dernières avancées dans le domaine de la modélisation des transports et de l'utilisation du sol visent à développer des systèmes complets de microsimulation pour une aire urbaine, représentant les agents au niveau individuel (personnes, ménages, entreprises, etc.) et simulant les comportements de toute la population d'intérêt. Une telle approche de la modélisation des systèmes urbains présente de nombreux avantages (Miller, 2003) :

- Les systèmes urbains sont dynamiques; ils comportent une dimension temporelle importante et leurs composantes évoluent à des vitesses différentes.
- Le fonctionnement de ces systèmes est complexe; les agents interagissent entre eux, les processus de décision sont complexes, et les facteurs probabilistes nombreux.
- Les représentations mathématiques et statistiques donnant des formes fermées aux systèmes urbains introduisent souvent un risque d'erreur important et produisent des prévisions erronées.

ILUTE

Le modèle ILUTE (Integrated Land Use, Transportation, Environment – (Miller & Salvini, 1998; Miller & Salvini, 2001; Salvini & Miller, 2005), développé par un consortium de chercheurs canadiens des universités de Toronto, Calgary, Laval, et McMaster, est conçu pour représenter l'évolution de la population, de l'utilisation du sol et des déplacements urbains dans le temps. Il s'agit d'un système de microsimulation fondé sur les objets et les agents (les objets étant les véhicules et les logements, les agents étant les personnes, les familles, les ménages, et les entreprises). ILUTE traite de phénomènes urbains variés, comme l'utilisation du sol, l'activité et les déplacements, le taux de motorisation, la démographie, l'économie (taux d'intérêt et inflation), le marché du travail, et les émissions de polluants. Ce modèle est le fruit d'un effort de long terme pour construire un modèle sans compromis de simulation des transports et de l'utilisation du sol. Il est organisé autour d'un axe comportemental constitué de quatre composantes interdépendantes : utilisation du sol, choix de localisation, taux de motorisation, et schémas d'activités et de déplacements. ILUTE est largement intégré et possède des mécanismes de rétroaction permettant aux décisions de niveau supérieur (c'est-à-dire, de plus long terme), comme la mobilité résidentielle, d'influencer les décisions de niveau inférieur (de plus court terme), comme la participation à une activité ou les déplacements.

ILUTE n'est pas fondé sur une technique de modélisation unique (par exemple, l'utilité aléatoire), mais utilise une variété d'approches pour représenter le comportement des agents du modèle, comme les modèles de changement d'état, les modèles d'utilité aléatoire, les modèles basés sur les règles de calcul informatique, les modèles d'apprentissage, et les modèles hybrides combinant plusieurs approches. Dans leur évaluation d'ILUTE, Hunt et coll. estiment que la conception de ce modèle vise à intégrer de nombreuses caractéristiques d'un modèle sans compromis (J. D. Hunt et coll., 2005).

ILUTE traite le marché foncier en postulant explicitement un principe de déséquilibre permanent, ce qui permet par exemple à une maison donnée de rester sur le marché plusieurs mois sans être vendue, puisque l'équilibre de l'offre et de la demande n'est pas automatique. Le pas de temps du modèle est le mois, et non l'année, permettant ainsi d'obtenir une meilleure précision temporelle. Le principe de déséquilibre employé dans ILUTE (Miller, Farooq, Chingcuanco, & Wang, 2010) et l'absence de rencontre de l'offre et de la demande permettent aussi de prendre en compte les projets dont le temps de construction est supérieur à un an. Le sous-modèle de marché du logement dans ILUTE adopte un processus en trois étapes pour décrire la mobilité résidentielle, composé d'une décision de mobilité, d'un processus de recherche, et d'une proposition de prix marquant la fin de la recherche. La composante transport d'ILUTE est très sophistiquée et comprend des sous-modèles pour l'achat et la vente

d'automobiles ainsi que la programmation d'activités. Le sous-modèle de programmation des activités caractérise le cadre spatio-temporel dans lequel les activités se déroulent, tenant compte des interdépendances de programmation pour représenter les contraintes temporelles (Roorda, Doherty, & Miller, 2005).

La composante marché du travail modélise les changements d'emploi des travailleurs, représente les entrées et sorties du marché du travail, distribue les emplois disponibles aux chercheurs d'emploi, et définit les salaires par profession, par secteur et par lieu. La composante marché du logement inclut l'offre endogène de logement par type et par lieu ainsi que les prix de vente et les loyers déterminés de manière endogène. Le taux de motorisation des ménages évolue de manière dynamique selon des modèles de transactions automobiles des ménages et de choix de type de véhicule.

Les paramètres démographiques sont mis à jour à chaque pas de temps, y compris les migrations. Une dimension importante d'ILUTE est aussi son intégration du « marché du mariage ». Le modèle de simulation commence avec un ensemble d'agents et d'objets compilés à partir de l'année de recensement de référence. Après avoir modélisé la démographie des ménages, les caractéristiques du marché du travail, les localisations résidentielles et les taux de motorisation, les schémas d'activités et de déplacements de chaque individu dans chaque ménage pour un jour de semaine ordinaire sont estimés par un modèle de microsimulation centré sur l'agent pouvant être connecté à un modèle de répartition sur le réseau par microsimulation. Une composante environnementale modélise les émissions des véhicules – à la fois à partir des maillons du réseau et à partir des zones – et permet de calculer l'exposition d'un individu à la pollution dans le temps (Miller et coll., 2010).

Plusieurs points méritent d'être notés au sujet de ce modèle (Timmermans, 2003). Premièrement, ILUTE distingue les personnes des ménages. Deuxièmement, l'état du système urbain évolue à partir de l'année de référence sans qu'il soit nécessaire de postuler l'équilibre du système. Troisièmement, ILUTE distingue les entreprises les unes des autres en les modélisant comme des agents. Quatrièmement, en plus des zones, les bâtiments sont pris en compte. Cinquièmement, des modèles de transport centrés sur les activités remplacent les modèles plus simples centrés sur les déplacements.

Les projets de développement à venir envisagent l'ajout d'un modèle de réseaux nécessaire au calcul des temps et des coûts de déplacement par mode, ainsi qu'un modèle formel de participation aux activités. Les développeurs du modèle cherchent à mettre en œuvre un modèle firmographique et un modèle de microsimulation des trajets des véhicules commerciaux. Ils ont aussi l'intention de rendre possible l'évolution endogène de certaines composantes, comme les réseaux routiers et de transport collectif, en réponse à l'aménagement de nouveaux terrains (Miller et coll., 2010). Tout comme la plupart des modèles intégraux de microsimulation, ILUTE n'a pas terminé la calibration de certains de ses sous-modèles et n'a jamais été utilisé pour une application prédictive complète, bien que la composante demande de transport ait été utilisée pour simuler les effets d'une intervention publique (Roorda & Miller, 2006).

UrbanSim

Le modèle UrbanSim, développé par Waddell et ses collègues (P. A. Waddell, 2000, 2002b), est un modèle désagrégé de microsimulation de l'utilisation du sol pouvant être associé à un modèle de transport. Des extensions ont été envisagées pour y ajouter un modèle de prévision des déplacements centré sur les activités (P. A. Waddell, 2002a), ainsi qu'un module d'analyse environnementale (P. A. Waddell & Borning, 2004). UrbanSim est désagrégé aussi bien spatialement qu'au niveau des agents. Sur le plan spatial, il peut fonctionner à différentes échelles, mais il est généralement exécuté à l'échelle d'une grille de cellules dont les dimensions sont fixées par l'utilisateur, et plus récemment, à l'échelle de la parcelle. Il peut aussi fonctionner à l'échelle des ZATs – il s'agit là d'une caractéristique relativement récente destinée à faciliter son usage. Sur le plan comportemental, il est désagrégé puisque les ménages, les emplois (ou les entreprises) et les promoteurs immobiliers sont représentés et considérés comme étant les moteurs du système urbain (Z. Patterson & M. Bierlaire, 2010).

Au total, UrbanSim contient sept modèles distincts traitant de l'accessibilité, des transitions économiques et démographiques, de la mobilité, des choix de localisation, du développement immobilier, et du prix de la terre. Ces modèles sont exécutés séquentiellement pour chaque année de simulation. La théorie des choix discrets est utilisée pour déterminer les changements d'utilisation du sol, la distribution de la population, les types de ménages et d'entreprises, les densités, et le prix des terrains (Hardy, 2011).

Un modèle de transition démographique simule l'évolution de la population (à partir de projections exogènes de la population et des emplois) et un ajustement itératif proportionnel est utilisé pour générer les ménages de différents types, tandis qu'un modèle de transition économique fait de même pour les différents secteurs d'activités. La mobilité des ménages et des emplois ou des entreprises est caractérisée par un processus en deux étapes dans lequel les agents décident d'abord de chercher, puis de se relocaliser. Les modèles de mobilité des ménages et des activités simulent les décisions de relocalisation, la probabilité qu'un agent change de localisation étant basée sur des données historiques. Les nouvelles entreprises et les nouveaux ménages (nouvellement créés ou ayant rejoint le système) sont localisés au moyen d'un modèle de choix discret tenant compte de caractéristiques spatiales (prix de la terre, accessibilité, caractéristiques du quartier – les facteurs à intégrer sont choisis par l'utilisateur). Le prix de la terre est déterminé par un modèle de prix hédonique, puis ajusté après la distribution des entreprises et des ménages.

La forme de ce modèle est définie par l'utilisateur, mais inclut généralement des informations sur les types de bâtiments, les caractéristiques du quartier et l'accessibilité régionale aux emplois et aux commerces. Le modèle de développement détermine où les nouveaux développements se produiront en fonction des taux de vacance et des caractéristiques des terrains disponibles – également au moyen d'un modèle de choix discret calibré par l'utilisateur. Un modèle logit multinomial distribue les nouveaux ménages et les ménages migrants à des lieux résidence, et les emplois à des lieux de travail. Le modèle de prix de la terre utilise une régression hédonique pour simuler le prix des terrains dans chaque cellule de la grille. Le modèle utilise une mesure d'accessibilité logarithmique, calculée par un modèle de demande de transport (Timmermans, 2003; P. A. Waddell et coll., 2003).

L'équilibre du marché de la terre, ou de tout autre marché, n'est pas postulé. Le modèle opère en déséquilibre dynamique d'une année à l'autre – avec un pas de temps annuel. Ce qui est plus court que la plupart des autres modèles. Les prix sont décalés temporellement pour refléter l'ajustement de l'offre et de la demande au fil du temps. Cette caractéristique différencie UrbanSim de la plupart des autres modèles incorporant le marché foncier, qui sont généralement statiques à chaque pas de temps de la simulation. Des chercheurs dans le domaine de la modélisation urbaine ont souligné par le passé l'importance de modéliser les différents éléments des systèmes urbains à l'échelle temporelle la mieux adaptée (Miller, 2003; Michael Wegener, 1994).

Puisque les régions urbaines n'atteignent en réalité jamais d'équilibre général sur le marché foncier ni sur celui des déplacements, l'approche du déséquilibre sera sans doute adoptée dans les tentatives à venir de modélisation des marchés fonciers. Si la structure d'UrbanSim repose largement sur des modèles économétriques, ses prédictions sont fondées sur la méthode de simulation Monte-Carlo, ce qui en fait aussi un modèle de microsimulation. Les mesures de performance du système de transport utilisées dans les divers modèles économétriques (localisation et prix de la terre) proviennent d'un modèle de transport externe. Les projections d'utilisation du sol d'UrbanSim sont transmises au modèle de transport externe qui peut prendre des formes variées.

Pour fonctionner, UrbanSim nécessite les éléments suivants : prévisions de population, prévisions de taux d'emploi, prévisions économiques, zonage et autres règlements d'urbanismes, ainsi qu'un modèle de transport. Ces éléments sont utilisés pour prévoir l'accessibilité (à l'échelle inter et intrazonale), la création, la perte et la migration des ménages et des emplois, la localisation, le type et la quantité de développements neufs, et le prix de la terre. Ces prévisions sont ensuite utilisées pour générer les décisions de relocalisation et le type de surface que les promoteurs immobiliers décident de construire. Les extrants du modèle sont : les nouveaux prix pour chaque type de surface, le nombre de ménages et d'emplois de différents types pour chaque zone, et le nombre d'unités de logement et la surface de plancher par type et par zone. Les prix calculés influencent les décisions de relocalisation pour la période suivante, et les nouvelles utilisations du sol sont transmises au modèle de demande de transport (Fehr and Peers, 2007; P. A. Waddell, 2002a).

Afin d'exécuter UrbanSim, il est nécessaire de disposer des données de l'année de référence pour tous les emplois, les bâtiments et les ménages de la région (Duthie et coll., 2007). UrbanSim peut utiliser des données du recensement pour compiler une base de données sur les ménages pour l'année de référence, contenant des informations sur la taille des ménages, les revenus, le nombre de véhicules, et le nombre de travailleurs. Les emplois de l'année de référence doivent être géocodés et distribués dans une grille de cellules et tenant compte de caractéristiques comme le secteur d'activité et le nombre de travailleurs. Une carte des terrains incluant des données sur les prix de la terre et des bâtiments ainsi que sur les règles d'urbanisme à l'échelle de la parcelle doit aussi être disponible au format SIG.

Parmi les objectifs de développement à long terme d'UrbanSim figurent la construction d'une architecture logicielle capable de prendre en charge une microsimulation fondée sur les agents

ainsi que l'exploration de nouvelles techniques d'estimation et structures de modélisation afin de mieux représenter la complexité des choix et l'interdépendance caractérisant les modèles de microsimulation des choix de localisation, d'activité et de déplacement (P. A. Waddell et coll., 2003).

Une caractéristique unique d'UrbanSim est que ce modèle a été développé sous la forme d'un logiciel dont le code source est libre, ce qui permet aux utilisateurs de télécharger et de modifier la structure du modèle pour l'adapter à des usages particuliers. UrbanSim a par exemple été adapté pour simuler les effets de changements importants en matière de transports et d'utilisation du sol dans la région du Grand Zurich, en Suisse (Burgle, Lochl, & Waldner, 2005). Dans ce cas, le cadre basique de simulation des changements d'utilisation du sol a été couplé à un modèle mésoscopique de simulation des déplacements, incorporant des groupes et des flux homogènes.

Originellement calibré pour la région métropolitaine d'Eugene–Springfield, Oregon, UrbanSim a aussi été utilisé à Hawaii, dans l'Utah, et dans la région de Puget Sound dans l'État de Washington. Son application à Honolulu (Hawaii) est un cas intéressant dans lequel le modèle d'utilisation du sol a été associé à un modèle de transport intégré centré sur les activités. UrbanSim a aussi été développé pour d'autres zones, comme dans le Michigan par exemple (Alberti & Waddell, 2000; Hardy, 2011; Johnston & McCoy, 2006; Timmermans, 2003; P. A. Waddell, 2002b).

Zhao et Chung (F. Zhao & Chung, 2006) relèvent quelques-uns des points forts d'UrbanSim : ses fondations comportementales dynamiques (qui en font un modèle transparent, plus facilement explicable aux utilisateurs et aux décideurs), sa haute résolution spatiale, ses modules de visualisation produisant des tableaux et des graphiques ainsi que des cartes en deux et trois dimensions, et le fait que le logiciel et son code source soient libres. Les limites notées par les auteurs concernent l'ampleur des besoins en données, le faible nombre d'applications à ce jour, et le fait que le modèle évolue encore rapidement.

1.2.2 Solution proposée/solution sans compromis

Caractéristiques d'un modèle sans compromis

Avant de proposer un modèle sans compromis, il est nécessaire d'envisager les caractéristiques d'un tel modèle. Le choix de ces caractéristiques découle des conclusions de ce rapport et est basé sur cinq grands principes. Premièrement, un modèle sans compromis doit offrir certaines fonctions indispensables à un modèle intégré. Deuxièmement, un modèle sans compromis doit intégrer le plus grand nombre possible de facteurs influençant les systèmes urbains ayant été identifiés dans la littérature étudiée. Troisièmement, ce modèle doit tenir compte du plus grand nombre possible de phénomènes/schémas/tendances identifiés. Quatrièmement, les fonctions de ce modèle doivent répondre aux besoins du MTQ concernant la partie transports d'un modèle intégré. Cinquièmement, un modèle sans compromis doit correspondre à la conception que se fait son utilisateur du principe d'équilibre.

Premièrement, si l'on part de la recension de la littérature – sur la localisation des ménages et des emplois, les mesures d'accessibilité et les modèles opérationnels – la liste des fonctions

essentielles d'un modèle intégré de transport et d'utilisation du sol est étonnamment courte. Du côté transport, un modèle sans compromis doit offrir une représentation exacte des performances du système de transport dans différents cas de figure (il s'agit principalement de représenter les temps de déplacements intra-urbains à une échelle aussi fine que possible). Dans l'idéal, il s'agit d'une représentation comportementale permettant de modéliser des scénarios de système de transport de plus en plus complexes. Ceci inclut aussi des scénarios plus classiques de modification de la demande et du système de transport au moyen de techniques de prévision traditionnelles. Le modèle doit aussi tenir compte des effets des performances du système sur la demande (c'est-à-dire, de la demande induite) ainsi que des effets de scénarios d'intervention publique de plus en plus sophistiquée sur la demande de transport (par exemple, l'impact de l'introduction d'une taxe sur la congestion, péages routiers, etc.). Du côté de l'utilisation du sol, la fonction indispensable du modèle est sa capacité à expliquer et à prévoir la localisation des ménages, des entreprises, et des développements immobiliers en fonction, entre autres choses, des performances du système de transport.

Deuxièmement, en plus de ces fonctions essentielles, un modèle sans compromis devrait tenir compte du plus grand nombre possible de facteurs parmi les suivants pour localiser les entreprises/emplois et les ménages :

- les caractéristiques locales explicites (loyer/prix du terrain, taille, zonage, régime fiscal);
- les caractéristiques de la zone environnante (par exemple, présence d'entreprises ou d'aménités);
- les caractéristiques ayant trait au transport; et
- l'accessibilité (des emplois, des ménages, etc.).

Troisièmement, il ne suffit pas que le modèle sans compromis prenne correctement en compte les facteurs précédemment cités, mais il faut aussi que ces facteurs représentent fidèlement les phénomènes, schémas et tendances identifiés dans la littérature. Bien que ces phénomènes, schémas et tendances se chevauchent partiellement pour ce qui est des entreprises et des ménages, nous les présentons ici séparément :

Pour les entreprises, les phénomènes pertinents sont : la décentralisation des emplois, les agglomérations d'emplois, et l'importance de la proximité de leur implantation antérieure lorsqu'elles se relocalisent. De plus, un modèle sans compromis devrait être suffisamment flexible pour représenter la localisation des entreprises par type d'entreprise, ainsi que le caractère endogène des choix de localisation des entreprises et des ménages.

En ce qui concerne les ménages, les principaux phénomènes à prendre en compte sont : la décentralisation, le polycentrisme, le rôle critique des promoteurs en matière d'offre de logement, et l'agglomération résidentielle. En outre, un modèle sans compromis devrait être suffisamment flexible pour saisir la mobilité des ménages, les différences de localisation résidentielle entre différents types de ménages, ainsi que le caractère endogène des choix de localisation des entreprises et des ménages.

Quatrièmement, les principes du modèle sans compromis doivent être compatibles entre les parties déplacements et utilisation du sol. Comme décrit dans la section Objectifs du MTQ - Précision du mandat de recherche du rapport, le MTQ s'intéresse au développement des aspects comportementaux et prédictifs de la demande de transport. Néanmoins, le MTQ ne souhaitait pas adopter une approche traditionnelle centrée sur les déplacements. Ainsi, l'approche correspondant aux besoins du MTQ en est une centrée sur les activités. Les approches centrées sur les activités sont par nature désagrégées et reposent donc sur des agents individuels. Dans ces modèles, les agents fondamentaux sont les ménages et les individus. Un modèle sans compromis devrait aussi adopter ces principes dans sa partie utilisation du sol. Ceci suppose donc également que le modèle soit centré sur les agents dans sa partie utilisation du sol. Afin de représenter fidèlement les dynamiques du système urbain, le modèle sans compromis devrait inclure au minimum les agents suivants : entreprises, ménages, individus, et entreprises spécifiques pour le secteur immobilier.

Cinquièmement, et il s'agit de l'élément le plus théorique de la définition, il convient d'aborder la question d'équilibre. L'équilibre est un concept économique signifiant que l'offre est égale à la demande sur un marché. L'équilibre général est un équilibre dans lequel la demande est égale à l'offre sur tous les marchés à la fois. Certains modèles d'utilisation du sol postulent un équilibre général, d'autres non. L'équilibre des marchés est un postulat simplificateur, et pourtant, une hypothèse forte dans un contexte urbain. Toute forme de modélisation doit par nature arbitrer entre représentation fidèle de la réalité et utilisation d'un modèle malléable. Fondamentalement, le choix de postuler ou non l'équilibre des marchés revient à déterminer si la simplicité offerte est plus importante que l'irréalisme engendré. À nos yeux, l'hypothèse d'équilibre est trop forte pour être retenue. Ainsi, nous pensons qu'un modèle sans compromis ne devrait pas l'utiliser.

Évaluation des modèles présentés

Cette partie évalue les modèles présentés au vu des critères décrits dans la partie précédente. Pour conduire cette évaluation, les modèles ont été regroupés selon les catégories ayant servi à les présenter. C'est-à-dire qu'ITLUP est classé comme modèle d'interaction spatiale; MEPLAN, TRANUS et PECAS sont classés comme modèles intrants-extrants; MUSSA comme modèle de marché foncier; et ILUTE et UrbanSim comme modèles de microsimulation. Ce classement est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 1– Classement des modèles présentés

Modèle	Type de modèle
ITLUP	Interaction spatiale
MEPLAN	Intrants-extrants
TRANUS	Intrants-extrants
PECAS	Intrants-extrants
MUSSA	Marché foncier
RELU- TRAN	Équilibre général calculable
UrbanSim	Microsimulation

ILUTE	Microsimulation
-------	-----------------

Quatre tableaux résumant les caractéristiques de ces modèles sont présentés plus bas. Les trois premiers tableaux indiquent si le type de modèle est capable de saisir les différents phénomènes pertinents identifiés plus haut et si le type de modèle est capable d'incorporer les facteurs importants identifiés pour localiser les entreprises et les ménages. Le quatrième tableau caractérise les différents types de modèles selon : la représentation des comportements au niveau des agents individuels; leur représentation du marché foncier; l'hypothèse d'équilibre des marchés; le caractère explicite des mesures d'accessibilité qu'ils emploient; et la dérivation explicite de la demande de transport à partir du modèle d'utilisation du sol. Bien sûr, tous les modèles étudiés comprennent des mécanismes de localisation des ménages et des entreprises, qui dépendent en partie des performances du système de transport.

Modèles d'interaction spatiale

Les modèles d'interaction spatiale ont les capacités de représentation les plus limitées. En matière de localisation des entreprises, ils peuvent saisir les phénomènes de décentralisation et d'agglomération. Ils incorporent aussi différents schémas de localisation pour différents types d'entreprises. Néanmoins, ils ne sont pas en mesure de saisir le caractère endogène observé de la localisation des entreprises et des ménages, ni de la relocalisation des entreprises, et donc de l'importance de la proximité de l'implantation antérieure. Enfin, ils n'incorporent pas d'autres facteurs que les coûts de transport et la localisation des autres ménages ou entreprises dans leurs mécanismes de distribution spatiale des entreprises.

Tableau 2- Phénomènes et facteurs clés pour la localisation des emplois/firmes

Type de modèle	Décentralisation	Causalité	Intègre de nombreux facteurs	Typologie des entreprises	Agglomération	Proximité de relocalisation
Interaction spatiale	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NON
Intrants-extrants	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON
Marché foncier	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Équilibre général calculable	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON
Microsimulation	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

Tableau 3- Phénomènes et facteurs clés pour la localisation des ménages (1)

Type de modèle	Décentralisation	Double salaire	Polycentrisme	Offre de logement	Influence des promoteurs	Intègre de nombreux facteurs
Interaction spatiale	OUI	NON	OUI	NON	NON	NON
Intrants-extrants	OUI	NON	OUI	NON	NON	NON
Marché foncier	OUI	OUI	OUI	NON	NON	OUI
Équilibre général calculable	OUI	NON	NON	OUI	OUI	OUI
Microsimulation	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

Tableau 4- Phénomènes et facteurs clés pour la localisation des ménages (2)

Type de modèle	Agglomération	Typologie des ménages	Mobilité des ménages
Interaction spatiale	OUI	OUI	NON
Intrants-extrants	OUI	OUI	NON
Marché foncier	OUI	OUI	NON
Équilibre général calculable	OUI	OUI	NON
Microsimulation	OUI	OUI	OUI

Tableau 5– Autres critères

Type de modèle	Centré sur les agents	Équilibre	Marchés fonciers	Accessibilité	Transport de passagers	Transport de marchandises
Interaction spatiale	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NON
Intrants-extrants	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Marché foncier	NON	OUI	OUI	OUI	NON	NON
Équilibre général calculable	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON
Microsimulation	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NON

En matière de localisation des ménages et des entreprises, les modèles d'interaction spatiale sont capables de représenter les phénomènes de décentralisation, d'agglomération et de polycentrisme. Ils peuvent aussi représenter les différences de localisation entre différents types de ménages. Cependant, ils ne peuvent pas saisir les autres phénomènes pertinents cités plus haut et se contentent de traiter les facteurs de localisation des ménages les plus basiques (coûts de transport, localisation des emplois et espace résidentiel disponible).

En ce qui concerne les autres critères, les modèles d'interaction spatiale ne sont pas centrés sur les agents; ils postulent l'équilibre des marchés; et ne représentent pas les marchés fonciers. Ces modèles, par leur construction, génèrent une demande de transport de passagers, mais pas de demande de transport de marchandises. Le fait qu'ils reposent sur des modèles gravitaires implique cependant qu'ils utilisent certaines mesures d'accessibilité.

Modèles intrants extrants

Les modèles intrants-extrants sont plus flexibles et ont des capacités plus étendues que les modèles d'interaction spatiale. La principale différence en matière de localisation des entreprises est qu'ils sont capables de saisir la relation endogène liant les choix de localisation des entreprises et des ménages. Ceci dit, ils n'intègrent pas les relocalisations d'entreprises et incorporent un nombre limité de variables dans les choix de localisation des entreprises.

En ce qui concerne les choix résidentiels des ménages, les modèles intrants-extrants ont des capacités similaires aux modèles d'interaction spatiale (à l'exception de PECAS qui modélise explicitement la localisation des développements immobiliers à une échelle fine).

En ce qui concerne les autres critères, les modèles intrants-extrants sont similaires aux modèles d'interaction spatiale, sauf par deux aspects importants. Tout d'abord, puisqu'ils reposent sur des tableaux régionaux intrants-extrants, ils tiennent compte des migrations de main d'œuvre, d'intrants et d'extrants entre les zones du modèle – ce qui produit explicitement une demande de transport de passagers et de marchandises. De plus les modèles intrants-

extrants prennent clairement en compte le marché foncier et les prix de la terre. Tout comme les modèles d'interaction spatiale, ils ne sont pas centrés sur les agents.

Modèles de marché foncier

Cette catégorie ne compte que le modèle d'utilisation du sol MUSSA, aujourd'hui incorporé à CUBE Land. Puisque ce modèle repose sur la théorie « offre-choix » de localisation des entreprises et des ménages – et donc sur l'estimation empirique du consentement à payer (ou fonction d'offre de prix) – il est très flexible en matière de phénomènes représentés, de variables incorporées et de typologie des entreprises intégrées. De fait, grâce au paramétrage des fonctions de consentement à payer, il peut représenter tous les phénomènes de localisation des entreprises et tous les facteurs identifiés – cela est aussi vrai pour la localisation des ménages. Le seul phénomène ou facteur que les modèles de marché foncier ne peuvent pas représenter est la mobilité des ménages.

En ce qui concerne les autres critères, ces modèles sont similaires aux modèles intrants-extrants, à l'exception de la manière dont ils traitent la demande de transport. Puisque le modèle de marché foncier est principalement un modèle d'utilisation du sol et qu'il n'est pas centré sur les agents, mais fonctionne au niveau des types de ménages (et d'entreprises), il ne produit pas automatiquement de demande de transport – de passagers comme de marchandises. Alors que les modèles d'interaction spatiale et intrants-extrants ont implicitement recours à des mesures d'accessibilité dans leur fonctionnement, MUSSA offre beaucoup plus de flexibilité quant aux types de mesures d'accessibilité pouvant être intégrées à ses fonctions de consentement à payer. Enfin, l'hypothèse d'équilibre de MUSSA est nuancée – il s'agit d'une hypothèse d'équilibre partiel sur le marché foncier.

Modèles d'équilibre général calculable

Les modèles d'équilibre général calculable répondent bien à de nombreux critères et reposent sur des fondements théoriques forts. La localisation des ménages se fait par des équations maximisant l'utilité des locations basée entre autres sur l'accessibilité au lieu de travail et la localisation des entreprises de chaque type varie en fonction du marché foncier et la proximité d'entreprises complémentaires.

Les modèles d'équilibre général calculable sont fondés sur une approche microéconomique et sur des choix discrets pris par les acteurs économiques fondamentaux. Ils ont démontré une bonne performance dans la représentation des réalités sociales, économiques et démographiques régionales, mais doivent prouver leur utilité dans la simulation de réseau de transport complet. En effet, le plus utilisé de ce type de modèle, RELU-TRAN, n'intègre que les déplacements automobiles dans son sous-modèle TRAN. De plus, les modèles d'équilibre général calculable n'intègrent pas les interactions ne provenant pas du marché ni les externalités inhérentes à celui-ci.

Modèles de microsimulation

Les modèles de microsimulation – centrés sur les agents et utilisant des modèles empiriquement estimés (en particulier, de choix discret) – offrent une flexibilité extraordinaire. En conséquence, selon la manière dont ils sont paramétrés, ils peuvent saisir tous les

phénomènes et facteurs identifiés affectant les choix de localisation des entreprises et des ménages.

Pour ce qui est des autres critères, tels que ceux évoqués ci-dessus, les modèles de microsimulation sont centrés sur les agents. En outre, leur structure flexible permet d'incorporer des mesures d'accessibilité variées. Bien qu'ils ne postulent pas d'équilibre (sur aucun des marchés), ils opèrent en équilibre dynamique (ou « recherche d'équilibre ») sur le marché foncier. Ainsi, les prix des terrains et l'offre immobilière répondent de manière dynamique aux évolutions des caractéristiques des systèmes de transport et d'utilisation du sol. En ce qui concerne les déplacements, les modèles de microsimulation d'utilisation du sol sont connectés à des modèles de transport. Ce sont donc les caractéristiques des modèles de transport qui déterminent s'ils incorporent ou non le transport de marchandises. Il faut mentionner qu'ILUTE comprend un sous-modèle centré sur les activités qui détermine les choix résidentiels des ménages ainsi que la localisation des emplois. Par conséquent, ce modèle offre la structure fondamentale nécessaire pour modéliser le transport de passagers.

Le modèle sans compromis

À partir de cette recension de la littérature sur la localisation des entreprises et des ménages, l'accessibilité, et les modèles intégrés, les auteurs du présent rapport livrent les conclusions suivantes concernant le modèle urbain du MTQ.

Pour ce qui est de l'utilisation du sol, une approche de microsimulation centrée sur les agents constitue à nos yeux le cadre de modélisation sans compromis. Par ailleurs, le système de transport devrait être modélisé dans un cadre centré sur les activités. Vu l'importance croissante du transport de marchandises dans la performance globale des systèmes de transport, ce facteur devrait être explicitement représenté dans le modèle. Tout comme les systèmes d'utilisation du sol et de transport de passagers, le système de transport de marchandises sans compromis devrait être explicite sur le plan comportemental et centré sur les agents. Enfin, le modèle sans compromis devrait être à même d'intégrer la progression économique d'un système urbain afin qu'il existe une interaction entre système de transport et système économique. Ceci permettrait de saisir, par exemple, l'impact d'une évolution du système de transport sur la croissance économique et l'emploi. À notre connaissance, il n'existe pas de modèle en mesure de saisir ce dernier phénomène, puisque la plupart des modèles utilisent des données économiques exogènes, produites par des modèles extérieurs de prévision économique.

1.2.3 Plan de développement

La partie précédente a conclu que le modèle urbain sans compromis pour le MTQ serait un cadre de modélisation de microsimulation centré sur les agents afin de représenter l'évolution conjointe des systèmes économiques et de transport. Aucun système de modélisation actuel n'est capable d'intégrer tous ces éléments. Il existe cependant plusieurs systèmes de modélisation opérationnels intégrant les éléments fondamentaux du système sans compromis décrit (c'est-à-dire, les systèmes d'utilisation du sol et de transport de passagers). Le modèle intégrant au mieux le plus grand nombre de ces éléments est ILUTE.

L'objectif de cette partie est d'esquisser un plan de développement pour un modèle sans compromis. Cette tâche est cependant entreprise sans avoir connaissance des ressources disponibles ni des contraintes existantes en matière de temps et de données. En conséquence, ce plan de développement se contente de tracer les grandes lignes de ce qu'un tel plan pourrait être.

Le développement de tout modèle ou système de modélisation devrait être conçu de manière à ce que ses principaux éléments puissent être compartimentés et développés de manière incrémentale. La compartimentation des éléments implique que différents aspects du système de modélisation puissent être développés sans reposer sur – ou limiter – le développement des autres aspects du système. Néanmoins, il doit exister un objectif commun d'intégration guidant le développement de chaque partie du système afin que tous ses éléments puissent être intégrés correctement.

Le développement incrémental des éléments du système implique que les étapes de développement initiales des différents éléments soient simplifiées afin de produire rapidement des sous-systèmes opérationnels capables de générer des résultats. Ceci suppose en outre qu'il est nécessaire de prendre en compte les possibilités futures de complexification du système de modélisation. Au vu de ces deux principes, le plan de développement suivant est proposé.

Tout d'abord, le MTQ devrait décider s'il souhaite traiter le lien entre système économique et système de transport – qui est la dimension la moins bien connue d'un modèle sans compromis. Il s'agit au fond de définir les limites du système. Si ce choix était fait, il nécessiterait une première étape de développement conceptuel visant à définir comment intégrer au mieux le système économique.

Si cet élément n'est pas jugé pertinent, le processus de développement devrait commencer par les éléments du modèle pour lesquels on dispose de la plus grande expérience, c'est-à-dire, les systèmes d'utilisation du sol et de transport centrés sur les agents. Bien qu'ils soient peu utilisés pour analyser les mesures d'intervention publique, ces deux systèmes ont été largement étudiés dans le monde académique. L'approche des déplacements centrée sur les activités est aujourd'hui répandue parmi les outils d'analyse de l'intervention publique. L'approche de l'utilisation du sol centrée sur les agents est elle aussi en train de se répandre. À ce niveau de réflexion, il faudra que le MTQ décide s'il souhaite utiliser un système de modélisation existant (par exemple, ILUTE ou UrbanSim).

Cette décision dépendra des spécificités techniques requises par le MTQ, de la mesure dans laquelle les systèmes existants y répondent, et de la facilité avec laquelle ils pourraient être adoptés et adaptés. ILUTE et UrbanSim peuvent tous les deux saisir tous les phénomènes et incorporer tous les facteurs identifiés dans ce rapport ayant trait au système d'utilisation du sol. ILUTE comprend aussi un module de transport de passagers fondé sur les activités. Ceci dit, on dispose de beaucoup plus de retours d'expérience avec UrbanSim qu'avec ILUTE. De plus, UrbanSim jouit d'un réseau d'utilisateurs bien structuré, est téléchargeable gratuitement, et son code source est libre – c'est-à-dire qu'il peut être adapté par ses utilisateurs. Les contraintes

des autres systèmes devraient être évaluées en comparaison à la possibilité de concevoir en interne un modèle sur mesure.

Commencer par les systèmes de transport et d'utilisation du sol sera avantageux pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit des éléments principaux du système, généralement considérés comme étant les plus importants pour la planification des transports. Ensuite, ces deux éléments ont des besoins communs (par exemple, le développement de populations synthétiques). Enfin, le développement de ces deux systèmes devrait progresser relativement vite, grâce aux retours d'expérience disponibles.

Les autres dimensions du système sans compromis (par exemple, le transport de marchandises centré sur les agents, le système transport-économie) sont beaucoup plus expérimentales. Ils pourraient être développés en parallèle ou après les composantes principales. La modélisation centrée sur les agents du transport de marchandises est en progrès – bien qu'expérimentale – et devrait donc avoir la priorité sur le système transport-économie.

1.3 Conclusion

Ce chapitre est le résultat de la première étape du projet « Nouveau modèle urbain : vers la mise en place d'un cadre intégré de modélisation du développement urbain et des transports dans la région de Montréal », mandat confié par le MTQ. Il fournit une recension de la littérature sur les modèles de localisation des ménages et des entreprises, les mesures d'accessibilité et les modèles opérationnels intégrés de transport et d'utilisation du sol.

À partir de cette recension de la littérature, il a : mis en lumière les principaux modèles expliquant la localisation des entreprises et des ménages; examiné les principaux phénomènes empiriques associés à la localisation des entreprises et des ménages; présenté différentes mesures d'accessibilité; et expliqué comment ces éléments influencent les systèmes de transport et d'utilisation du sol. Après avoir passé en revue les modèles opérationnels intégrés, et à partir de la littérature étudiée, ce rapport répertorie les caractéristiques d'un modèle sans compromis et examine dans quelle mesure les modèles opérationnels existants y correspondent.

Les auteurs concluent que les approches de microsimulation centrées sur les agents sont présentement les plus appropriées afin de modéliser adéquatement les systèmes d'utilisation du sol et de transport. Ce plan souligne l'importance de diviser le système développé en plusieurs sous-systèmes, tout en assurant sa cohérence et l'intégration de ses composantes. Il conseille enfin d'accorder la priorité au développement des sous-systèmes pour lesquels le plus d'expérience a été accumulée, c'est-à-dire, les systèmes de transport et d'utilisation du sol.

2. DEUXIÈME CHAPITRE

2.0 Description et analyse des pratiques actuelles du MTQ

Cette partie s'en tient aux éléments prévus dans la description de l'Étape 2 du projet. Il est structuré comme suit. Tout d'abord, une partie décrit brièvement l'enquête Origine-Destination (O-D), l'un des piliers de la planification des transports dans la région de Montréal. Ensuite, la comparaison du système de modélisation actuellement en usage à un modèle sans compromis (voir section Caractéristiques d'un modèle sans compromis, p. 92) permet d'évaluer les avantages de ce dernier, et voir comment il pourrait améliorer le modèle actuel. La partie suivante analyse le modèle actuel et le modèle sans compromis au vu des exigences fondamentales formulées par le MTQ au sujet d'un éventuel Nouveau modèle urbain.

Afin de supporter l'analyse des auteurs, des documents fournis par le MTQ traitant de la description des pratiques actuelles du Service de la modélisation et des systèmes de transport (SMST) ainsi que des procédures et des plateformes logicielles actuellement utilisées sont présentés en annexe (annexes 1 à 4). Ces documents ont été entièrement rédigés par les professionnels du SMST (MTQ) à titre de documentation des modèles aux fins du présent projet de recherche, d'ailleurs, les professionnels du SMST terminent la description de leurs modèles par une appréciation des avantages et inconvénients de ceux-ci en regard des besoins auxquels ils doivent répondre. Ces documents concernent quatre éléments du cadre actuel de modélisation des transports : le modèle de prévision de la demande, la modélisation du transport routier, la modélisation du transport collectif, et le modèle de transfert modal. Il est préférable que le lecteur en prenne connaissance afin de comprendre l'analyse qui suit.

2.1 L'Enquête Origine-Destination de Montréal²

L'Enquête Origine-Destination (O-D) est l'un des éléments-clés pour analyser la modélisation des transports à Montréal, et plus largement, au Québec. Cette enquête a été réalisée régulièrement au cours des quarante dernières années, ce qui en fait l'une des enquêtes O-D les plus anciennes et les plus détaillées du monde. Elle constitue également la colonne vertébrale de l'approche désagrégée de la planification des transports urbains collectifs—introduite par le Professeur Chapleau³—à la base de la planification des transports urbains collectifs à Montréal ainsi que dans le reste du Québec.

Depuis 1970, l'enquête O-D a été conduite environ tous les cinq ans à Montréal, la taille de l'enquête évoluant avec l'augmentation de la population et l'expansion de la région métropolitaine. L'enquête O-D est fondée sur les ménages et concerne entre 4% et 5% des ménages de la région. Cette enquête est extrêmement détaillée et recueille des informations sur les ménages, les individus et les déplacements de chacun des membres de la famille (à partir de l'âge de cinq ans). Au niveau des ménages, les informations collectées concernent : la

² Cette partie est tirée du document intitulé « Enquête Origine-Destination 2008 : La mobilité des personnes dans la région de Montréal » et enrichie par plusieurs expériences de travail avec l'Enquête O-D.

³ Chapleau, R., La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée. In *Proceedings of the 6th World Conference on Transportation Research*, Lyon, France, 1992.

localisation du ménage (adresse), le nombre d'individus dans le ménage, le nombre d'automobiles possédées, et, dans les enquêtes les plus récentes, le revenu du ménage. En ce qui concerne les individus, les informations recueillies concernent l'âge, le sexe, la possession d'un permis de conduire, le statut (par exemple, travailleur à temps plein, étudiant, etc.) et tous les déplacements effectués la veille du jour de l'enquête. Les informations sur les déplacements comprennent l'origine, la destination, l'heure de départ, le motif du déplacement, l'itinéraire emprunté, les autoroutes, ponts et parcs de stationnement utilisés (y compris les parcs relais). Des données de localisation (latitude et longitude) des ménages, des origines et des destinations, sont également recueillies.

Les résultats de l'enquête constituent une base de données (convertie en un fichier plat pour des applications pratiques), chaque observation représentant un déplacement. Chaque déplacement est associé à un ménage (et à ses caractéristiques), à l'individu qui l'effectue (et à ses caractéristiques), ainsi qu'aux caractéristiques du déplacement. Les individus n'effectuant pas de déplacement sont tout de même représentés dans la base de données sous la forme d'une observation.

Dans la mesure où l'enquête O-D repose sur un échantillon, ses observations sont « étendues » pour représenter la population totale et, par conséquent, la demande de transport globale. Un échantillonnage aléatoire stratifié est utilisé pour réaliser l'enquête, les strates employées étant les « secteurs municipaux » - une centaine dans la région (108 en 2008). L'enquête est pondérée pour correspondre à la population du dernier recensement (pour chaque secteur municipal, et donc pour la région au complet), à partir des caractéristiques des ménages, et parfois des individus. Ainsi, chaque ménage observé (et dans certains cycles de l'enquête, chaque individu et chaque déplacement) se voit attribuer un facteur d'expansion. Par conséquent, la moyenne des facteurs d'expansion est comprise entre 20 et 25, selon la taille de l'échantillon – dans la pratique, ils varient davantage.

En tant que telles, les données collectées dans l'enquête O-D sont complètement désagrégées : par rapport aux ménages et aux individus, mais aussi, spatialement – les coordonnées géographiques de chaque ménage et des origines et destinations de chaque membre d'une famille sont enregistrées. Ces données sont utilisées pour estimer la demande totale de transport de passagers pour tous les modes et constituent donc une source d'information fondamentale pour le processus de planification. Les parties suivantes de ce rapport faisant fréquemment référence à l'enquête O-D, il est utile de conserver ces informations en mémoire. La partie suivante met en relation les principaux éléments du système actuel de modélisation des transports au MTQ (voir les annexes Annexe 1 : Le modèle de prévision à Annexe 5 : Schéma de modélisation utilisé actuellement, p. 159 à 193) avec les conclusions tirées de la partie 1 du rapport.

2.2 Mise en relation avec le premier chapitre

Les documents fournis en annexe présentent les méthodes et plateformes utilisées par le MTQ pour modéliser la demande en transport, ainsi que leurs forces et améliorations possibles, principalement du point de vue du MTQ. Ces parties forment le socle sur lequel les auteurs se sont fondés pour comprendre les approches de modélisation adoptées par le MTQ. Ces

informations ont été complétées par des entretiens avec Pierre Fournier et Brigitte St-Pierre, professionnels au MTQ, des documents fournis apportant des précisions concernant les méthodes de modélisation, ainsi que de présentations par Pierre Desgagnés et Hubert Hardy sur le modèle de projections démographiques le 10 janvier 2013. Dans certains cas, les auteurs ont fait appel à leur expérience de travail avec l'enquête O-D et les méthodes de modélisation en question.

Cette partie vise à mettre en relation les méthodes développées et utilisées actuellement au MTQ avec le modèle sans compromis décrit dans la partie 1 de ce projet. Elle se fonde sur les informations données par le MTQ pour évaluer les avantages d'un modèle sans compromis, et la manière dont il pourrait apporter des améliorations au système actuel. Si la plupart des avantages et améliorations possibles des méthodes actuelles ont été identifiés par le MTQ, les auteurs y ont parfois ajouté des remarques personnelles et enrichi les observations formulées.

Avant d'aller plus loin, il est utile de résumer l'objectif et les conclusions de la première partie. L'objectif de ce rapport était double :

1. D'une part, conduire une recension de la littérature sur la localisation des ménages et des emplois/entreprises, ainsi que sur les modèles intégrés de transport et d'utilisation du sol.
2. D'autre part, proposer un système de modélisation sans compromis capable de prévoir l'évolution conjointe des systèmes d'utilisation du sol et de transport.

Après concertation avec les professionnels du MTQ, ces objectifs ont été précisés comme suit. Tout d'abord, des intervenants ont exprimé leur désir d'approcher la prévision de la demande de transport en utilisant des fondements comportementaux. De ce fait, il a été souhaité que le Nouveau modèle urbain repose sur des approches plus comportementales. Ensuite, le MTQ a identifié deux exigences fondamentales pour ce nouveau modèle. Premièrement, le modèle sans compromis doit être en mesure de tenir compte explicitement des interactions entre le système de transport et d'occupation du sol. Deuxièmement, ce modèle doit prendre en compte les comportements de mobilité – c'est-à-dire, les comportements humains sous-jacents à la demande de transport. Ainsi, il a été explicitement stipulé que les méthodes issues des approches « traditionnelles » fondées sur les déplacements (par exemple, les modèles en quatre étapes) ne devaient pas être retenues pour le « Nouveau modèle urbain ». Enfin, il a été convenu que les recommandations formulées devaient être inspirées de la solution sans compromis.

À partir de la recension de la littérature, et tenant compte du fait que la solution proposée devait être fondée sur les comportements sans nécessairement tenir compte d'emblée de la disponibilité ou non des données, les auteurs sont parvenus aux conclusions suivantes :

Concernant le nouveau système de modélisation sans compromis :

- Une approche par microsimulation, fondée sur les agents, devrait être considérée comme le cadre de modélisation pour le système d'utilisation du sol.
- Le système de transport (de passagers comme de marchandises) devrait aussi être modélisé dans un cadre reposant sur les agents (centré sur les activités).

- Le modèle devrait aussi être en mesure d'intégrer l'évolution économique du système urbain afin que le système de transport et le système économique soient en interaction – c'est-à-dire, que le réseau routier puisse affecter l'efficacité et la croissance économique d'une région.

En ce qui concerne le développement d'un tel modèle sans compromis, force est de constater qu'aucun système de modélisation existant n'est capable d'intégrer tous ces éléments à la fois. Il existe cependant des systèmes de modélisation opérationnels capables d'intégrer les éléments-clés du système sans compromis décrit ci-dessus (par exemple, les systèmes d'utilisation du sol et de transport de passagers). Compte tenu de ces observations, ainsi que des conclusions relatives au système de modélisation sans compromis, les recommandations suivantes ont été formulées :

- Le MTQ devrait décider s'il est nécessaire de prendre en considération les éléments les moins étudiés/connus du modèle sans compromis, c'est-à-dire le lien entre système de transport et système économique, et le transport de marchandises fondé sur les agents.
- Si cela n'est pas jugé nécessaire, le processus de développement devrait commencer par les éléments pour lesquels il existe les retours d'expérience les plus fournis. Il s'agit des systèmes d'utilisation du sol et de transport de passagers fondés sur les agents.
- À ce stade, le MTQ devrait décider s'il souhaite utiliser un système de modélisation existant (par exemple, ILUTE ou UrbanSim) ou développer son propre système en interne.
- Les autres composantes du système sans compromis (par exemple, le système de transport de marchandises fondé sur les agents ou le système transport-économie), pouvant être considérées comme expérimentales, pourraient être développées parallèlement aux composantes principales – ou à leur suite. Le transport de marchandises fondé sur les agents, bien qu'également expérimental, devrait sans doute être prioritaire par rapport au système d'interaction transport-économie.

Tout en gardant ces remarques à l'esprit, on peut mettre en perspective les conclusions du premier chapitre par rapport aux pratiques actuelles du MTQ. C'est ce que visent à faire les parties suivantes en se demandant « Quels seraient les avantages et inconvénients d'un modèle sans compromis par rapport au système de modélisation des transports actuellement utilisé? » et « Comment un tel modèle pourrait-il contribuer à l'amélioration du modèle actuel? » Dans bien des cas, il est difficile de répondre à ces questions en l'absence d'un modèle sans compromis concret sur lequel appuyer une telle comparaison. Par conséquent, on comparera ici le système de modélisation du MTQ à des éléments typiques ou attendus d'un modèle sans compromis. L'adjectif typique est ici employé dans les cas où certains éléments considérés comme étant constitutifs d'un modèle sans compromis ont été mis en œuvre dans des cas concrets. Dans certains cas, comme pour les modèles de transport commercial fondés sur les activités (encore au stade expérimental), le système de modélisation actuel est comparé aux caractéristiques qui pourraient raisonnablement être attendues d'un modèle sans compromis.

D'après la documentation fournie par le MTQ, les avantages et améliorations possibles liés à l'environnement de modélisation utilisé par le MTQ peuvent être organisés selon les thèmes suivants – correspondant à peu près aux principaux éléments du système de modélisation actuel : l'approche de la prévision de la demande et ses hypothèses constitutives, l'affectation

du trafic routier, l'affectation des déplacements en transport en commun, et le modèle de transfert modal. La partie suivante commence par l'approche de la prévision de la demande du MTQ, car c'est dans ce domaine que les plus grandes différences vis-à-vis du système de modélisation sans compromis sont observées. Les autres éléments sont ensuite traités dans l'ordre où ils ont été présentés.

2.3 Pratiques actuelles du MTQ

2.3.1 Le modèle de prévision du MTQ

Il faut d'abord reconnaître que le modèle actuel de prévision est le fruit de quelques dizaines d'années de travail, qu'il a été testé et calibré, et produit des prévisions fidèles aux données historiques observées. Le fait que le système en place soit opérationnel ne devrait pas être sous-estimé. Le but de cette section est d'évaluer comment le système actuel répond aux nouvelles orientations exprimées par le Ministère des Transports du Québec et de le comparer avec les caractéristiques d'un modèle sans compromis. C'est-à-dire, un modèle fondé sur des bases comportementales explicites et qui tient compte explicitement des liens entre le système de transport et l'occupation du sol.

Dans un certain sens, le modèle actuel, basé sur les projections de tendances observées dans des données historiques de recensement, prend en compte l'évolution de comportements agrégés de la population et des emplois – des comportements qui sont affectés par le système de transport. Toutefois, ces changements comportementaux et l'influence du système de transport capturés par le modèle, sont observés de manière agrégée et ne le sont qu'après avoir eu lieu.

Le prolongement de la ligne orange à Laval en 2007 est un bon moyen d'illustrer ce fait. En théorie, l'arrivée de nouvelle station de métro dans ce secteur augmenterait l'accessibilité au transport en commun de la population avoisinante. L'augmentation d'accessibilité augmenterait l'attraction de cette zone, et donc, influencerait la localisation des ménages et possiblement, des emplois dans la région. Dans le modèle actuel, l'accélération de la croissance démographique induite par le prolongement de la ligne de métro ne serait capturée que lorsque les données du recensement de 2011 deviennent disponibles.

Un modèle sans compromis fonctionnerait selon une perspective comportementale désagrégée qui capturerait de manière explicite l'effet du système de transport sur les décisions de localisation des ménages et des firmes. Cette approche permettrait d'inférer sur les changements comportementaux induits par des modifications au système de transport avant que les données de recensement soient disponibles. Ainsi, le modèle serait plus sensible aux changements du système de transport, ce qui pourrait améliorer les projections démographiques et d'emplois. Le reste de cette section explique comment un modèle sans compromis procéderait dans une telle situation en comparaison du système actuel.

Dans le modèle sans compromis, la génération de la demande résulte de processus comportementaux. L'objectif et le défi d'un tel modèle est de comprendre les processus comportementaux sous-jacents à la génération de la demande. Les processus

comportementaux sont donc réputés stables, mais le comportement des individus change selon les circonstances : lorsque les individus vieillissent, lorsque de nouvelles infrastructures sont construites, etc. Contrairement au système actuel du MTQ, le poids d'un individu reste constant (en tant qu'individu), mais son comportement peut changer.

Contrairement au système de modélisation actuel, fondé sur l'observation des déplacements individuels (associés à un ménage) pondérés par un facteur d'expansion, un modèle sans compromis reposerait sur les déplacements générés par les comportements modélisés des agents individuels.

La mise en œuvre typique d'un tel système requerrait deux composantes : un système fondé sur les activités, centré sur les ménages et les individus, et un système de localisation des ménages et des entreprises. Ces deux systèmes exigeraient que chaque ménage, individu, entreprise, et emploi soit explicitement représenté.

En raison de contraintes relatives à la disponibilité des données concernant les ménages ainsi qu'à la confidentialité de ces données, on génère typiquement une population « synthétique » à partir de données du recensement anonymisées.⁴ De cette manière, chaque ménage et individu peut être représenté. Bien que les agents ne représentent pas nécessairement des ménages ou individus réels, ils possèdent les caractéristiques générales de la population réelle (en termes de revenus, de localisation, etc.). Ainsi, on peut considérer que cette population synthétique représente la population réelle.

Les informations requises sur les entreprises et les emplois (localisation et classification des industries) pour ce type de modèle peuvent être obtenues à l'aide de bases de données de fournisseurs telles qu'Infogroup Canada, Dun & Bradstreet ou le Registre d'entreprise maintenu par Emplois-Québec. Un système classique serait centré sur la demande de transport privée (et non sur la demande commerciale⁵), et nécessiterait donc comme données fondamentales de connaître la localisation des ménages, des entreprises et des institutions.

Les modèles comportementaux (de choix discret) des activités des ménages et des individus permettraient de générer des activités et des chaînes de déplacements, puis d'attribuer un mode de transport à chaque déplacement individuel. Ces déplacements seraient influencés par les caractéristiques du réseau de transport (par exemple, la durée des trajets) et l'accessibilité des ressources, telles que les personnes et les emplois. Ceci permettrait d'obtenir une demande de transport (origines et destinations) par mode. Les différents sous-modèles seraient calibrés et validés à l'aide de données issues d'enquêtes telles que l'enquête O-D, le recensement, etc.

Par ailleurs, la demande de transport future serait influencée par l'évolution de la distribution des ménages et des entreprises (utilisation du sol), ainsi que par les caractéristiques du système de transport. La distribution future des ménages et des entreprises serait calculée par le système de localisation des ménages et des entreprises. Ce système répartirait spatialement

⁴ Dans le cas de Montréal, cette démarche pourrait évidemment être adaptée en créant une population synthétique à partir de l'enquête O-D et du recensement.

⁵ Comme expliqué dans la partie 1, les modèles commerciaux centrés sur les activités restent très expérimentaux.

les nouveaux ménages et les nouveaux emplois, ainsi que ceux ayant changé de localisation, à l'aide de modèles comportementaux (de choix discret). Les facteurs déterminant la relocalisation des ménages et des entreprises seraient les caractéristiques des ménages et des entreprises, les caractéristiques des lieux (par exemple, les coûts d'accessibilité), les limites de disponibilité et de prix. Les comportements de mobilité futurs, et donc la demande de transport, seraient influencés par ces nouveaux facteurs.

Partant de cette brève description des principaux éléments constitutifs d'un modèle sans compromis, on peut y comparer le système de modélisation actuel du MTQ pour établir quels seraient les avantages et inconvénients de l'un par rapport à l'autre.

La documentation fournie par le MTQ identifie des limitations perçues au "Modèle de prévision" présentement utilisé. Ces limitations concernent principalement deux sous-modèles, ou plutôt, hypothèses du Modèle de prévision, ceux concernant la croissance démographique et la distribution des emplois.

La première limitation identifiée par rapport à la croissance démographique est liée aux contraintes d'aménagement. En effet, elles sont uniquement tenues en comptes lorsque les besoins en logement des ménages sont supérieurs aux capacités d'accueils de certaines unités géographiques.

Habituellement, dans un modèle sans compromis, les enjeux liés à la croissance démographique seraient capturés par les modèles de localisation des ménages et des emplois/firmes. Contrairement à l'approche actuelle du MTQ, les projections démographiques se concentreraient sur la région en tant qu'ensemble, et non pas sur des sous-régions. Ainsi, le modèle de localisation des ménages distribuerait les ménages à l'intérieur de la région à des lots ou parcelles précis. Aussi, la distribution des ménages prendrait en tout temps et explicitement en compte les contraintes liées à la disponibilité des résidences en offrant comme localisation potentielle, uniquement les résidences disponibles. Donc, ces contraintes sont toujours prises en compte par défaut.

La seconde limite concernant la croissance démographique est que l'approche actuelle permet de formuler des prévisions concernant la population, mais pas les ménages. Dans un modèle sans compromis, l'unité d'analyse de la population est le ménage. La constitution du ménage (nombre d'individus, de véhicules, la localisation et caractéristique du domicile, le revenu) permet de prévoir son comportement et son évolution dans le temps. Les individus, et donc, la population, sont également pris en compte dans ce type de modèle, mais comme composante du ménage. Néanmoins, ceci exige de projeter le nombre et les caractéristiques des ménages. Ainsi, un modèle sans compromis serait donc sujet aux mêmes limites que le cadre de modélisation actuel du MTQ.

La troisième limite concernant la croissance démographique est que l'indice de similarité et le facteur d'attractivité des zones sont construits de façon *ad hoc*. Dans un modèle sans compromis, les ménages seraient spatialement distribués en fonction de modèles de choix discret. Les modèles de choix discret reposent sur l'idée que les différents lieux offrent des utilités différentes aux ménages. Ces derniers sont plus susceptibles d'être assignés aux lieux

ayant une utilité élevée. L'utilité peut être perçue comme un indice, mais cet indice est obtenu au moyen d'une estimation statistique, et est basé sur des fondements mathématiques formels. Une amélioration dans les mesures d'accessibilité et de mobilité, par l'instauration d'une nouvelle station de métro par exemple, modifierait l'utilité d'une zone et donc, son attractivité. Un modèle sans compromis intégrerait ces changements de manière explicite et prévoirait leurs impacts avant qu'ils commencent à être perçus dans des enquêtes.

L'autre sous-modèle du modèle de prévision pour lequel des limites ont été identifiées concerne la distribution des emplois. Les emplois sont distribués différemment en fonction du type d'emploi, « industriel » ou de proximité. Les emplois de type industriels sont localisés en fonction du modèle « shift-share » présenté précédemment, tandis que les emplois de proximité sont distribués en fonction de la population présente dans une zone donnée et les caractéristiques de cette zone. Un modèle sans compromis devrait permettre de s'affranchir de cette limite, car, comme pour les ménages, la distribution des emplois serait déterminée par le biais de modèles de choix discret. Ainsi, tel que présenté dans la section « Modèles de localisation des entreprises et des ménages » de l'étape 1, de nombreux facteurs devraient normalement être pris en considération dans le processus de distribution spatiale des emplois : accessibilité des autres emplois du même secteur d'activité, accessibilité des emplois dans les autres secteurs d'activité, accessibilité aux ménages, prix du foncier, proximité des infrastructures de transport, etc.

La seconde limite concernant la distribution des emplois est que les modèles de prévision démographique et le modèle de distribution des emplois ne sont intégrés que partiellement par le biais de la distribution des emplois de proximité basée sur la prévision démographique. Un modèle sans compromis améliorerait cette estimation en localisant ce type d'emploi à l'aide d'un modèle de choix discret. De plus, dans les modèles distribuant les ménages vers les lieux, l'accessibilité aux emplois (par exemple, dans le secteur de la vente au détail) est généralement intégrée aux variables du modèle. De même, les modèles de distribution spatiale des entreprises/emplois intègrent généralement des mesures d'accessibilité aux ménages. De ce fait, ces deux modèles peuvent être considérés comme étant des modèles intégrés.

La troisième limite concernant la distribution des emplois est que le modèle de prévision fondé sur les facteurs d'expansion limite la prise en compte des prévisions d'emploi et dépend fortement de l'enquête O-D. En d'autres termes, l'influence des emplois sur le choix des destinations futures est limitée, car elle s'exerce uniquement en modifiant le poids relatif des déplacements vers les emplois à différentes destinations. Comme expliqué plus haut, dans un modèle sans compromis, le comportement futur des individus devrait évoluer et être en partie influencé par la localisation future des emplois. Ainsi, les comportements ne seraient pas fixés et seraient moins dépendants des comportements associés aux déplacements observés dans l'enquête O-D. Toutefois, tel que mentionné précédemment, il resterait probablement fondé sur cette dernière dans la création d'une population synthétique.

En résumé, le modèle sans compromis serait basé sur les comportements individuels et prendrait explicitement en compte l'interaction entre le système de transport et la distribution des ménages et des firmes puisque leurs localisations seraient déterminées par des modèles

de choix discret qui incorporent les variables explicatives du système de transport. Ainsi, le modèle serait plus sensible aux changements du système de transport, ce qui pourrait améliorer les projections démographiques et d'emplois.

2.3.2 Approche du MTQ quant à l'affectation du trafic routier

Le MTQ a identifié des améliorations potentielles pouvant être apportées à l'approche prise actuellement concernant l'affectation du trafic routier. Ces améliorations possibles sont structurées autour de trois thèmes principaux. Le premier concerne les méthodes d'affectation du trafic, et en particulier, les inconvénients d'une affectation statique par rapport à une affectation dynamique. Le deuxième est lié à l'intégration de l'affectation du trafic routier et des déplacements en transport en commun, en particulier dans un contexte multimodal. La question du choix modal est abordée dans les commentaires relatifs au modèle de transfert modal. Le troisième concerne la demande des véhicules commerciaux. Dans le cadre de ce projet concernant la question de l'intégration du transport et de l'utilisation du sol, une autre amélioration potentielle pourrait être soulignée dans l'approche actuelle. Il s'agit du fait qu'il n'existe pas de mécanisme permettant de représenter la « demande de transport induite » par la construction de nouvelles infrastructures. La suite de cette partie traite donc de la question de l'affectation des déplacements routiers (et de son intégration au transport en commun).

Le premier chapitre concluait qu'un modèle sans compromis (voir section Caractéristiques d'un modèle sans compromis, p. 92) devrait être composé d'une approche de la prévision de l'utilisation du sol centrée sur les agents et d'une approche de la demande de transport centrée sur les agents et les activités. Sur le plan conceptuel, l'association de ces deux systèmes de modélisation permettrait de calculer la demande de transport privé et, par la suite, de l'affecter au réseau de transport. Par conséquent, on peut considérer que ces modèles sont *antérieurs* à l'affectation du trafic. En pratique, différents outils (logiciels) et méthodes d'affectation peuvent être utilisés pour affecter la demande produite par de tels systèmes centrés sur les agents. Dans la mesure où l'expertise des auteurs concerne le processus de génération de la demande en transport et, puisque le MTQ possède une expérience et une expertise solides dans le domaine de la modélisation du trafic, nous pensons que ce dernier est le plus à même de décider des méthodes et outils (logiciels) d'affectation du trafic qu'il juge les mieux adaptés à ses besoins et ses ressources. Néanmoins, il semble intuitivement pertinent d'imaginer que l'affectation du trafic routier et du trafic en transport en commun devraient se faire à l'intérieur d'un même système de modélisation (logiciel) et être dynamiques afin de répondre aux changements dans le réseau.

Le troisième inconvénient perçu de l'approche actuelle de l'affectation du trafic concerne la génération de la demande des véhicules commerciaux. Le premier chapitre a conclu qu'un modèle sans compromis devrait inclure pour les véhicules commerciaux un modèle centré sur les agents, qui permettrait de générer la demande des véhicules commerciaux. Ceci offrirait une base comportementale solide ainsi, idéalement, qu'une reproduction et une prévision fidèle de la demande des véhicules commerciaux. Combinée à la demande des passagers, cette dernière produirait une représentation fidèle de la demande globale sur le réseau routier. Bien qu'un tel modèle puisse corriger le fait que les méthodes actuelles de calcul de la demande des véhicules commerciaux ne soient pas fondées sur une base comportementale, il en est un autre

qu'il ne pourrait pas corriger : il s'agit du manque de données suffisantes pour appréhender les mouvements de marchandises. Le domaine du transport des marchandises en général, et des mouvements de véhicules commerciaux en particulier, est hautement compétitif, ce qui fait en sorte que les données sont très difficiles à obtenir. Qui plus est, ces modèles étant expérimentaux, leur succès est loin d'être assuré.

La dernière amélioration possible identifiée ne fait pas partie de celles qui ont été répertoriées par le MTQ, mais elle représente néanmoins aux yeux des auteurs un enjeu important dans le domaine de la modélisation – centrée sur les activités ou intégrée – des transports et de l'utilisation du sol. Il s'agit de la question de la demande induite. Il est de plus en plus reconnu que la construction de nouvelles infrastructures de transport pour diminuer la congestion n'apporte pas toujours les résultats escomptés. La raison en est que les prévisions concernant l'usage des nouvelles infrastructures tiennent généralement compte de leurs effets en matière d'affectation du trafic et de choix/report modal, mais ignorent le plus souvent leurs effets à court et long terme sur le nombre de déplacements engendrés. Parmi les effets à court terme, on peut citer l'induction de nouveaux déplacements qui n'auraient pas été réalisés en l'absence de la nouvelle infrastructure (et de l'amélioration de l'accessibilité qu'elle engendre). Les effets à long terme concernent la localisation des ménages et des entreprises aux alentours de la nouvelle infrastructure, car l'amélioration de l'accessibilité qui en résulte peut modifier le niveau d'attraction de différents secteurs.

La méthode actuelle peut prendre en compte la demande induite causée par les nouvelles infrastructures, mais tel qu'expliqué précédemment dans la section « Le modèle de prévision du MTQ », cet effet est capturé *ex post* et de façon implicite. Il devient possible, en utilisant un système de modélisation basé sur les comportements prenant explicitement en compte les liens entre la location des ménages et des firmes et le système de transport, d'améliorer les estimations futures de la demande, de mieux capturer l'impact des changements du système de transport et d'améliorer la précision de la modélisation.

On pourrait envisager d'adapter les méthodes actuelles de prévision de la demande, mais un tel ajustement serait sans doute trop contraignant. Des tentatives ont été faites pour tenir compte des effets à long terme par le biais d'une procédure connue sous le nom d'« ensemencement », mais aucune méthode éprouvée n'a encore été mise au point à ce jour.

Il se trouve que ces deux effets font partie des motivations pour utiliser des modèles de transport et d'utilisation du sol intégrés et centrés sur les activités. Les modèles centrés sur les activités intègrent généralement des sous-modèles de prévision du nombre de déplacements ou des chaînes de déplacements qui dépendent eux-mêmes de l'accessibilité. De ce fait, ils possèdent des mécanismes permettant de tenir compte des effets à court terme de la demande induite. Par nature, un modèle sans compromis devrait intégrer des mécanismes permettant de représenter la demande induite.

2.3.3 Affectation des déplacements en transport collectif

Les avantages et inconvénients identifiés par le MTQ en termes de modélisation du transport collectif touchent en premier lieu le logiciel MADIGAS utilisé pour affecter les déplacements

effectués en transport en commun. Un autre inconvénient du système actuel de modélisation du transport en commun – identifié dans la partie sur la modélisation routière (ci-dessus) – concerne la non-intégration de la modélisation du trafic routier et du transport en commun.

MADIGAS est considéré comme étant la référence des programmes de planification du transport collectif dans la région de Montréal. En effet, ce modèle est utilisé par toutes les agences de transport de la région métropolitaine et est intégré en profondeur dans l'enquête O-D. De plus, MADIGAS a offert des performances inégalées en matière d'analyse désagrégée de l'utilisation du transport en commun et des caractéristiques de ses usagers. Toutefois, l'utilisation de MADIGAS prévient l'affectation du transport en commun de manière intégrée avec l'affectation du trafic routier. Néanmoins, comme mentionnée précédemment, l'expertise principale des auteurs de ce rapport concerne le processus de génération de la demande en transport. Au vu de l'expérience et de l'expertise du MTQ en matière de modélisation du trafic et du transport en commun, nous jugeons que le Ministère des Transports du Québec est le mieux placé pour décider quels sont les méthodes et outils (logiciels) d'affectation qu'il considère correspondre le mieux à ses besoins. Cependant, les auteurs réaffirment qu'il semble intuitivement pertinent que les affectations du trafic routier et des déplacements en transport en commun soient réalisées à l'intérieur d'un même système de modélisation (logiciel).

2.3.4 Le modèle de transfert modal

Le MTQ a fourni des documents détaillant la méthode utilisée afin de représenter certaines tendances de transfert modal dans la demande de transport. Certains avantages et inconvénients du procédé y étaient identifiés. Les avantages perçus du MTM sont qu'il s'agit d'un modèle complètement désagrégé et incrémental. Ses inconvénients perçus sont les suivants : les modes actifs ne sont pas pris en compte; les nombreuses courbes de transfert modal doivent être calibrées individuellement; il aboutit parfois à des changements minimes et peu plausibles dans l'usage d'un mode en raison d'un nombre trop faible d'observations dans l'enquête O-D; la notion de déplacements captifs est peut-être trop restrictive; le modèle est semi-opérationnel et difficile à automatiser; sa mise en œuvre repose sur certaines hypothèses pouvant être considérées comme *ad hoc*; le modèle ne prend pas en compte *a priori* les effets à long terme des interventions sur les infrastructures (par exemple, en matière de relocalisation des ménages et des entreprises). Ces points sont traités dans cet ordre dans la partie suivante.

En ce qui concerne les avantages perçus, un point mérite d'être mentionné. Bien que cette approche fasse partie intégrante d'une modélisation entièrement désagrégée, il ne s'agit pas à proprement parler d'une approche désagrégée. Dans son application, cette approche s'adresse aux déplacements individuels (IPEREs) et peut en ce sens être considérée comme étant désagrégée. Néanmoins, la calibration des courbes individuelles de transfert modal est réalisée à partir de données *agrégées*. Puisque les courbes sont fondées sur une régression de la part modale par rapport au ratio de la durée des déplacements en transport en commun sur la durée des déplacements automobiles, cette opération exige l'agrégation d'informations sur de nombreux déplacements. Ainsi, le niveau de désagrégation réel de cette approche est limité. Cette question mérite d'être soulevée, car elle a trait à la façon dont le transfert modal serait représenté dans un modèle sans compromis. La partie suivante offre donc une description de la manière dont le transfert modal serait pris en compte dans un modèle sans compromis, ainsi

que de l'intérêt de cette approche au vu des avantages et inconvénients évoqués par le MTQ à ce sujet.

Tout d'abord, dans un modèle sans compromis, le transfert modal devrait être intégré au module centré sur les activités. Dans ce module, le transfert modal serait classiquement représenté par un modèle de choix discret (cf. Première partie pour plus d'informations sur les modèles de choix discret). Ce modèle de choix discret pourrait être plus ou moins sophistiqué. Il pourrait simplement consister en un modèle de choix modal expliquant le choix d'un mode de transport selon les caractéristiques des différents modes, du voyageur, et du déplacement. Il est utile de rappeler que tous les modes pourraient être inclus dans un tel modèle – l'automobile comme le transport collectif, les modes actifs, les modes combinés, etc. Le modèle de choix discret pourrait aussi consister en un modèle plus complexe de destination-choix modal, voire un modèle encore plus sophistiqué. En général, de tels modèles sont calibrés à partir d'observations réelles des déplacements individuels (issues, par exemple, de l'enquête O-D). L'utilisation de ces modèles dans le cadre d'un changement d'investissements en matière d'infrastructures n'est cependant généralement pas faite de manière incrémentale. Il y a donc bien une estimation de la situation « avant » et « après », en règle générale. De plus, les agents individuels représentés dans le modèle centré sur les activités seraient intégralement affectés à l'une des options modales.

Une telle approche améliorerait plusieurs autres aspects relatifs au MTM. Une approche modale centrée sur les activités serait désagrégée (c'est l'un des avantages du MTM) dans le sens où le modèle serait estimé à partir de données à l'échelle de l'individu. De surcroît, une telle approche attribuerait un mode de transport à des agents individuels.⁶ En ce qui concerne les limites du MTM actuel, un modèle sans compromis permettrait de répondre à la plupart d'entre elles.

Un modèle de choix modal peut incorporer autant de modes, de caractéristiques (disponibles) des alternatives (temps de marche, temps d'attente, coût du transport en commun, coût du stationnement, etc.), de caractéristiques individuelles (âge, sexe, statut, etc.), et de caractéristiques concernant les déplacements que souhaité. Tous ces facteurs peuvent être intégrés à un unique modèle, réduisant ainsi la complexité opérationnelle, le nombre de modèles et les difficultés de mise à jour et de révision telles qu'observées pour le MTM. Les effets trop faibles et peu plausibles des investissements en matière d'infrastructures sur le transfert modal dans les cas où l'on ne dispose que d'un nombre limité d'observations O-D pourraient être corrigés. En effet, puisque les analyses reposeraient sur une population synthétique spatialisée, la distribution des observations (agents) dans l'espace serait moins irrégulière et ainsi moins susceptible d'aboutir à des effets de transfert modal trop faibles et peu plausibles causés par l'échantillonnage. Cependant, ces analyses seraient fondées sur une population synthétique. Par ailleurs, il pourrait être possible d'incorporer la « captivité » des voyageurs au modèle avec moins de rigidité. Par exemple, au lieu de ne pas tenir compte des

⁶ Il convient de rappeler que les agents individuels seraient ici le produit d'une population synthétique. Bien qu'il s'agisse d'« individus », ils ne représenteraient pas nécessairement des individus concrètement observés (voir section Mise en relation avec le premier chapitre ou la section Le modèle de prévision du MTQ pour plus d'informations sur les populations synthétiques).

voyageurs « captifs », il serait possible d'inclure le concept de captivité – par exemple, pour les individus effectuant de longues chaînes de déplacements en voiture – parmi les caractéristiques du voyageur afin d'évaluer son impact sur la probabilité d'utiliser un mode de transport alternatif.

Bien qu'elle puisse améliorer certaines parties du modèle actuellement utilisé, l'approche centrée sur les activités n'est pas sans inconvénient. En ce qui concerne la facilité d'automatisation, cette question tient autant de la programmation que de la modélisation. Il existe plusieurs logiciels capables de calibrer, valider et simuler au moyen de modèles de choix discret. Si un modèle de choix était intégré à un module plus large centré sur les activités, ces caractéristiques seraient vraisemblablement programmées dans le cadre du module. On peut supposer que l'ensemble du module serait codé dans le même langage de programmation, même si cela n'est pas toujours le cas. D'autres langages adaptés pourraient être développés dans l'avenir, ce qui compliquerait davantage la démarche. En définitive, ces questions touchent fondamentalement à la programmation et à la conception des logiciels, et se posent dans tout contexte de modélisation complexe – qu'il s'agisse d'un modèle centré sur les activités ou du MTM.

Tout comme la méthode actuelle du MTM, dans une approche centrée sur les activités, certaines hypothèses nécessaires à sa mise en œuvre seraient *ad hoc*. Plus précisément, les seuils d'amélioration du temps de déplacement à atteindre pour que les individus changent de mode de transport doivent également être fixés dans une telle approche. Si un modèle de choix modal, incluant l'idée de transfert modal, était adopté, bien qu'il existe des méthodes communément employées pour déterminer si un individu change de mode, le choix d'une méthode plutôt qu'une autre demeurerait relativement arbitraire. Cependant, le fait qu'il s'agisse d'un choix entre des options relativement courantes est peut-être préférable à la méthode actuellement employée par le MTM, qui ne repose sur aucune référence extérieure.

Le dernier inconvénient du MTM identifié par le MTQ est qu'il ne tient pas compte *a priori* des effets à long terme qu'un projet d'infrastructure peut avoir sur la localisation des entreprises et des ménages. Il ne s'agit pas d'une question concernant à proprement parler de choix modal, mais plutôt la demande de transport en général. On pourrait penser qu'il s'agit d'une question de choix modal, car la localisation des ménages et des entreprises par rapport aux infrastructures de transport détermine l'accessibilité, et donc les modes de déplacement. Néanmoins, c'est en premier lieu une question ayant trait à la localisation des ménages et des entreprises, et donc, une question d'utilisation du sol. Comme expliqué dans la partie « Le modèle de prévision du MTQ », ces phénomènes pourraient être modélisés dans le module « utilisation du sol » d'un modèle sans compromis, où l'accessibilité est prise en compte explicitement.

2.4 Le système de modélisation actuel et les exigences d'un « Nouveau modèle urbain »

Au-delà de la comparaison du système actuel avec un système de modélisation sans compromis sur des points précis, il est nécessaire d'évaluer le système actuel de manière plus large, sous l'angle des exigences formulées par le MTQ. Comme expliqué dans le premier

chapitre et dans la section Mise en relation avec le premier chapitre, un « Nouveau modèle urbain » (ci-après, « Nouveau modèle ») doit avoir au moins deux caractéristiques souhaitables. Tout d'abord, il doit prendre en compte les comportements de mobilité – c'est-à-dire, les comportements humains sous-jacents à la demande de transport. Ensuite, il doit être en mesure d'intégrer explicitement les interactions entre système de transport et utilisation du sol.

Après avoir passé en revue dans ce document les différentes méthodes utilisées dans le système actuel, il est maintenant possible de prendre du recul et d'évaluer ce système à l'aune des deux orientations évoquées ci-dessus. Le système actuel est opérationnel et donne des résultats satisfaisants. Il permet de considérer les changements de comportement quant à la localisation des firmes et des ménages de manière implicite, une fois qu'ils ont été observés (c.ad. *ex post*). Comme expliqué dans la section Le modèle de prévision du MTQ (p. 107), la pierre angulaire du système actuel est l'enquête O-D. L'utilisation de cette enquête pour évaluer la demande de transport, bien que fondée sur l'observation des comportements, ne vise pas à comprendre ou à expliquer ces comportements. En effet, dans le système actuel, une fois observés, les comportements sont réputés stables, et seul le poids relatif des individus qui y sont associés évolue dans le temps. L'évolution de ce poids dans le temps (calculée par le Modèle de prévision) n'est pas basée sur une approche explicitement comportementale (à l'exception de l'une de ses composantes). La plupart des facteurs pris en compte pour ajuster ces poids (population, nombre d'emplois, taux de motorisation) sont projetés à partir de tendances historiques observées. Les estimations du modèle pourraient s'améliorer si les changements de comportement étaient intégrés explicitement dans le modèle.

De la même façon que le système pourrait s'améliorer s'il intégrait de manière explicite l'évolution des comportements, la composante utilisation du sol du modèle (le sous-modèle démographique et le sous-modèle de distribution des emplois) s'améliorerait grandement si l'interaction utilisation du sol et comportement était intégrée explicitement. Dans le modèle actuel, les impacts d'une modification dans l'utilisation du sol sont ressentis uniquement suite à un nouveau recensement ou une nouvelle enquête O-D. Un modèle sans compromis basé sur une approche comportementale permettrait d'estimer l'impact de ces changements avant qu'il se produise. Par exemple, l'effet du prolongement d'une ligne de métro, telle que la ligne orange à Laval en 2007 ou un éventuel prolongement de la ligne bleue, serait ressenti dans le modèle actuel après que les comportements aient été modifiés. Si l'interaction utilisation du sol et la perspective comportementale étaient explicites, l'évolution des comportements, et donc les prévisions démographiques par le biais de la localisation des ménages, pourraient être appréhendées avant la parution d'une nouvelle enquête. Par conséquent, le Nouveau modèle offrirait une opportunité d'améliorer les prévisions en répondant à la première orientation formulée.

La seconde caractéristique souhaitable d'un éventuel Nouveau modèle est qu'il prenne explicitement en compte les interactions entre le système d'utilisation du sol et le système de transport. Le système de transport est bien pris en compte dans le modèle actuel. Qui plus est, le système de transport tient compte du système d'utilisation du sol dans le Modèle de prévision. Néanmoins, le système d'utilisation du sol est influencé en général par le système de transport d'une façon implicite et *ex post*, sauf dans le sous-modèle de projection

démographique. Dans ce cas particulier, le système de transport est uniquement pris en compte lorsque la densité d'une zone de destination donnée dépasse sa capacité. Même dans ce cas, le système de transport est seulement pris en compte comme une composante de l'indice de similarité. Dans le Nouveau modèle, le système de transport influencerait également l'utilisation du sol par exemple dans le sous-modèle de distribution des emplois et de localisation des ménages. Ainsi, un éventuel Nouveau modèle suivrait les orientations formulées par le MTQ.

Pour résumer, un modèle sans compromis serait par construction comportemental fondé sur des agents individuels synthétisés (ménages, individus, entreprises, etc.) dont les comportements seraient prévus à partir de modèles validés et calibrés sur des comportements observés. Aussi, un modèle sans compromis tiendrait explicitement compte de l'influence du système de transport sur le système d'utilisation du sol (distribution des ménages et des entreprises/emplois). Ces deux éléments offriraient la possibilité d'améliorer les estimations futures des systèmes de transport et d'utilisation du sol.

2.5 Conclusion

Cette deuxième partie visait à étudier les éléments et méthodes – ainsi que leurs avantages, et aspects pouvant être améliorés – du système actuel de modélisation des transports du MTQ, en comparaison avec un système de modélisation sans compromis (tel que défini dans la première partie). La majorité des avantages et inconvénients cités ont été identifiés dans la documentation du MTQ sur les méthodes en usage, les autres ayant été identifiées par les auteurs. Ce rapport évalue aussi le système de modélisation actuel de manière plus générale, et surtout au regard des deux orientations principales relatives à un éventuel Nouveau modèle, soit la prise en compte des comportements de mobilité et l'intégration explicite de l'interaction entre système de transport et utilisation du sol.

Concernant les inconvénients identifiés du système actuel, un modèle sans compromis ne serait pas toujours en mesure d'y répondre mieux que le modèle actuel. Par exemple, l'un des inconvénients du modèle de transfert modal actuel est qu'il est difficile à automatiser en raison de sa complexité et des différents langages de programmation dont il dépend. Un modèle sans compromis ne serait pas nécessairement exempt de tels problèmes. Néanmoins, après examen et comparaison du modèle actuel à un système de modélisation sans compromis, il apparaît que dans plusieurs cas, un modèle sans compromis offrirait des mécanismes permettant d'améliorer le système de modélisation. Ceci est dû au fait qu'un modèle sans compromis viserait à comprendre, modéliser et prévoir les comportements à l'origine de la demande globale de transport, y compris les relations fondamentales entre système de transport et système d'utilisation du sol. Un modèle sans compromis serait fondamentalement comportemental et prendrait explicitement en compte les liens entre transport et utilisation du sol. Ainsi, il répondrait en théorie aux exigences formulées et permettrait d'améliorer les estimations futures et les performances du système de transport régional.

3. TROISIÈME CHAPITRE

3.0 Description et analyse critique des approches suggérées pour le Nouveau modèle urbain

Ce rapport répond au mandat prévu à l'étape 3 du projet Nouveau modèle urbain. En se basant sur les résultats des étapes 1 et 2, il propose des recommandations afin de mieux représenter les liens entre les systèmes d'occupation du sol et de transport et d'intégrer explicitement l'approche comportementale dans les méthodes actuelles de modélisation au sein du Ministère des Transports du Québec (MTQ). Une approche comportementale permet de prévoir le changement de comportement des agents individuels d'un système en fonction de stimuli provenant de l'environnement ou d'une modification des circonstances telles que la construction d'une nouvelle route, l'augmentation des prix du marché foncier ou des modifications dans le zonage. Le chapitre 3 est structuré de la façon suivante. Premièrement, les conclusions les plus importantes et les plus pertinentes des chapitres 1 et 2 en lien avec l'objectif poursuivi au chapitre 3 sont présentées. Les objectifs du chapitre 3 seront également clarifiés. Deuxièmement, le modèle sans compromis présenté au chapitre 1 et utilisé comme comparatif aux pratiques actuelles du MTQ sera présenté brièvement. Ensuite, l'approche prise dans ce rapport sera expliquée et justifiée en lumière à la recension de la littérature, des modèles disponibles, des pratiques du MTQ et des orientations exprimées par les professionnels du MTQ. Les deux sections suivantes présenteront deux approches possibles afin d'arriver au but de mieux représenter les liens entre les systèmes d'occupation du sol et de transport et d'intégrer explicitement une approche comportementale dans la modélisation du transport et de l'occupation du sol dans la grande région de Montréal. Plus précisément, leur architecture, les données et variables requises pour leur bon fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients seront détaillés. Par la suite, une section proposera des scénarios de développement de ces modèles en fonction des expériences passées du MTQ et des informations apportées dans les chapitres 1, 2 et 3.

3.1 Mise en contexte

Le premier chapitre du projet de recherche présentait, dans le Volet 1, une recension de la littérature portant sur la localisation des entreprises et des ménages, sur les mesures d'accessibilité, sur la modélisation de la demande de transport centrée sur les activités, ainsi que des modèles intégrés de transport et d'occupation du sol. Tel que présenté dans le premier chapitre, les facteurs déterminants le choix de localisation de firmes sont nombreux, interagissant de manière complexe et certains sont toujours débattus. Les plus importants sont :

- le coût et la taille de l'emplacement, donc l'état du marché foncier;
- l'accès à certaines infrastructures de transport;
- l'accès aux clients et aux employés;
- la proximité de certaines entreprises afin de créer une synergie.

Tout comme dans le cas des théories de localisation des entreprises, les premières théories de localisation des ménages se fondaient grandement sur les coûts de déplacement pendulaires.

Toutefois, de nombreuses études subséquentes ont montré que le phénomène était beaucoup plus complexe et nécessitait de nombreux facteurs explicatifs. De plus, de nouvelles tendances urbaines telles que la décentralisation, le polycentrisme et l'augmentation de la proportion de ménages à double salaire, ont changé la perspective d'analyse des villes. Les facteurs les plus importants expliquant les choix de localisation sont le prix, le type et la taille des logements et terrains, les caractéristiques des quartiers, ainsi que l'accessibilité aux services. L'impact de ces facteurs varie significativement en fonction des caractéristiques des ménages. La localisation des ménages est fortement influencée par le marché foncier d'une région et cet aspect est désormais traité étroitement dans les modèles les plus complets.

Traditionnellement, les indicateurs de mobilité, soit la fluidité et l'efficacité du déplacement véhiculaire (temps de parcours, congestion, etc.), étaient considérés, dans la planification des transports, comme les plus importantes mesures de la qualité d'un système de transport routier. Plus récemment, les chercheurs ont conclu que les indicateurs d'accessibilité, définie par plusieurs comme la facilité d'atteindre des opportunités, représentent des mesures aussi, voire, plus importantes puisqu'ils tiennent compte de l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport.

Le Volet 2 de la première partie a présenté différents modèles intégrés de transport et d'utilisation du sol et les a mis en relation avec les caractéristiques d'un modèle sans compromis – c'est-à-dire, un modèle ne tenant pas compte de contraintes reliées à son opérationnalisation telle que la disponibilité des données. Cinq types de modèles ont été présentés et huit modèles ont été donnés en exemple : ITLUP pour les modèles d'interaction spatiale, MEPLAN, TRANUS et PECAS pour les modèles intrants-extrants, MUSSA pour les modèles de marché foncier, RELU-TRAN pour les modèles d'équilibre général calculable, et UrbanSim et ILUTE pour les modèles de microsimulation. Suite à la comparaison de ces types de modèles avec le modèle sans compromis et la performance de leur application dans le monde réel, les auteurs ont conclu que les modèles de microsimulation basés sur les agents constituaient le meilleur type de modèle en fonction des orientations émises par le MTQ.

Le chapitre 2 du projet de recherche a présenté les éléments du système de modélisation actuel du MTQ et tenté de le mettre en relation avec le modèle sans compromis et les orientations énoncées par le MTQ. Des documents traitant des pratiques du MTQ ont été entièrement rédigés par les professionnels du MTQ et se retrouvent aux annexes 1 à 5 du rapport. De plus, ces mêmes professionnels ont identifié eux-mêmes les principaux avantages et inconvénients de leurs méthodes de modélisation. Seules les sections du rapport d'étape 2 rédigées par les chercheurs ont été conservées dans le corps du chapitre 2, les documents rédigés par le MTQ ont tous été placés en annexe.

Le système utilisé actuellement a l'avantage d'être opérationnel, d'être développé pour le contexte montréalais et de donner des résultats satisfaisants. Toutefois, selon les informations transmises par le MTQ et l'avis de ses professionnels, certaines améliorations pourraient y être apportées, particulièrement sur deux points qui ont servi à émettre deux orientations. Ces deux orientations que souhaite prendre le MTQ, selon la définition du mandat donné (voir la section Objectifs du MTQ - Précision du mandat de recherche, p. 17), sont, premièrement, une prise en

compte plus explicite des comportements de mobilité sous-jacents à la demande de transport et, deuxièmement, l'intégration plus explicite, et avec une base comportementale de l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport. Actuellement, le MTQ fait évoluer des facteurs d'expansion associés avec les individus (ou ménages) retrouvés dans les enquêtes origine-destination, et donc leurs poids relatifs, en ayant comme hypothèse des comportements fixes, et tient compte de l'interaction entre utilisation du sol et système de transport de manière implicite et *ex post* (voir la section 2.3.1 Le modèle de prévision du MTQ, p. 107). Le MTQ pourrait adapter l'approche actuelle en permettant l'évolution des comportements des principaux acteurs de la demande de transport en fonction de modèles comportementaux estimés avec des méthodes statistiques de choix discrets et en intégrant de manière explicite l'influence mutuelle de l'utilisation du sol et du système de transport. Ceci bonifierait l'approche méthodologique à moyen et long terme, car les résultats des simulations seraient plus sensibles aux changements de l'utilisation du sol ainsi que du réseau de transport grâce à l'approche comportementale.

Le chapitre 3 a pour objectif de proposer des approches possibles au MTQ afin de prendre en compte ces éléments dans leurs pratiques de modélisation. Deux avenues et scénarios possibles sont formulés dans ce chapitre. La première possibilité est d'utiliser un modèle existant permettant de répondre aux orientations émises par le MTQ. Le logiciel proposé en fonction des informations présentées dans les parties 1 et 2 est UrbanSim. L'architecture, les variables et données requises, une évaluation critique ainsi qu'une suggestion quant à l'approche à suivre pour la mise en place graduelle de ce logiciel sont offertes dans une section subséquente. La seconde possibilité est de modifier pièce par pièce le système en place actuellement et de créer sur mesure des modules qui permettrait de prendre en compte explicitement les bases comportementales résultant dans la demande de transport ainsi que les liens fondamentaux entre le système de transport et l'occupation du sol.

3.2 Modèle sans compromis

Il est important de rappeler en quoi consiste le modèle sans compromis afin de justifier les deux approches recommandées dans les sections suivantes. Le sous-modèle transport devrait être en mesure de représenter les performances du système de transport de la région, donc les déplacements, aussi précisément que possible spatialement et temporellement et représenter la demande comme étant une résultante de comportements. Il devrait répondre adéquatement et être suffisamment sensible aux changements dans la demande de transport ainsi que sur l'impact de différentes interventions. Le sous-modèle transport, à l'intérieur de l'ensemble du modèle, devrait également être en mesure d'influencer l'utilisation du sol en modifiant les décisions de localisation des ménages et des entreprises, ainsi que les décisions de développement immobilier.

Un modèle sans compromis serait capable de prendre explicitement en compte les variables explicatives de la localisation des agents économiques (firmes, ménages et développeurs immobiliers). Ces facteurs sont présentés en détail dans le premier chapitre, mais peuvent être groupés dans quatre catégories principales : les caractéristiques de l'emplacement (soit un lot ou une zone) et les réglementations qui s'y appliquent, les attributs de la zone environnante, les caractéristiques liées au transport, et l'accessibilité aux services et agents économiques. De

plus, le modèle devrait être capable d'intégrer adéquatement les tendances observées afin de prévoir réalistement les évolutions du système analysé. Il s'agit par exemple de favoriser l'agglomération d'entreprises de même type ou de ménages partageant certaines caractéristiques.

Le modèle sans compromis et tous ses éléments (demande en transport, localisation de ménages et firmes, etc.) devraient également emprunter une approche comportementale. Le modèle devrait également avoir une base désagrégée centrée sur les principaux agents économiques. La même approche doit être prise pour l'utilisation du sol en intégrant des acteurs spécifiques aux marchés immobiliers. Finalement, le modèle sans compromis pourrait intégrer des phénomènes qui ont été démontrés comme significatifs, mais qui sont peu présents dans les modèles traditionnels :

- intégration d'un modèle comportemental et basé sur les agents de transport de marchandises ;
- intégration d'un modèle économique permettant une interaction avec le système de transport. Ceci permet de capturer, par exemple, l'impact d'un changement du système routier sur l'emploi.

En résumé, le modèle sans compromis serait un modèle désagrégé comportemental autant au niveau transport qu'utilisation du sol et ayant des agents principaux dont les comportements sont ajustés et calibrés à partir d'observations faites lors d'enquête, par exemple l'Enquête Origine-Destination. Dans ce modèle, les décisions de localisation des entreprises et des ménages, donc l'utilisation du sol dans le système (c.-à-d. utilisation effective plutôt que celle prévue dans le zonage, voir la section Objectifs du MTQ - Précision du mandat de recherche (p. 17) et la section 1.2 Volet 2 (p. 76 à 101) pour plus de détails sur l'utilisation du sol, et la distribution de ménages et firmes), seraient explicitement influencées par le système de transport et vice-versa. Bien qu'un tel modèle n'existe pas présentement, certains offrent de ces éléments fondamentaux et, puisque les bases théoriques sont en place, un tel modèle pourrait être développé dans le futur.

3.3 Exemple d'un choix de localisation résidentiel d'un ménage

Tel que mentionné précédemment, les deux caractéristiques principales d'un modèle sans compromis sont qu'il est basé sur une approche comportementale et qu'il tient compte de l'interaction utilisation du sol et système de transport en incorporant des mesures d'accessibilité. Les deux approches suggérées ont ces caractéristiques. Ceci est possible principalement par l'utilisation de modèles de choix discret pouvant être appliquée à des ménages individuels, aux emplois ou firmes et aux développements immobiliers. Un exemple est présenté dans cette section afin d'illustrer comment un modèle de choix discret peut être utilisé dans le contexte de choix de localisation d'un ménage.

Dans l'exemple simplifié, la ville possède trois zones, et le choix de localisation est affecté uniquement par le prix et l'accessibilité aux emplois. La zone 1 représente le centre d'affaires de la ville possédant ainsi une grande quantité d'emplois, mais également un prix résidentiel élevé. Les deux autres zones sont périphériques, donc moins cher, mais avec une mesure d'accessibilité aux emplois plus basse.

Tableau 6- Caractéristique des zones dans la situation initiale

Zone	Coût (Coût moyen des maisons par millier de dollars)	Accessibilité (Millier d'emplois à moins de dix minutes d'automobiles)
1	450	25
2	250	15
3	150	10

Le poids de chacune des variables est estimé afin de créer une fonction d'utilité systématique (voir la section Le cadre théorique de l'utilité aléatoire, p. 23) pour chaque zone. Habituellement, plusieurs autres variables explicatives, telles que les caractéristiques du ménage, et leur coefficient formerait l'équation du choix de localisation résidentielle.

$V_1 = -0.008 * \text{Coût}_1 + 0.2 * \text{Emplois}_1$
$V_2 = -0.008 * \text{Coût}_2 + 0.2 * \text{Emplois}_2$
$V_3 = -0.008 * \text{Coût}_3 + 0.2 * \text{Emplois}_3$

Avec cette équation, il devient possible de savoir la probabilité qu'un ménage n choisisse de s'établir dans la zone 3 :

$$P_{n3} = \frac{e^{-0.008*150+0.2*10}}{e^{-0.008*450+0.2*25} + e^{-0.008*250+0.2*15} + e^{-0.008*150+0.2*10}} = 0.25$$

La probabilité qu'un ménage s'établisse dans les zones 1 et 2 est de 45% et 30% respectivement.

Ce modèle pourrait également être utilisé pour simuler quelle zone un ménage spécifique choisirait pour s'établir. Ceci serait fait en calculant l'utilité systématique (V_i) pour chaque zone en fonction de ces caractéristiques et en ajoutant un terme d'erreur provenant d'une distribution de Gumbel avec une variance $\frac{\pi^2}{6}$. L'alternative ayant l'utilité la plus élevée serait la zone dans laquelle le modèle assignerait le ménage.

Les probabilités qu'un ménage s'installe dans une zone donnée précédemment seraient évidemment différentes si la mesure d'accessibilité était modifiée suite à la construction d'une autoroute. Dans cet exemple, la nouvelle autoroute réduit le temps de déplacement vers le centre d'affaires pour la zone 3 et augmente ainsi la quantité d'emplois à moins de 10 minutes en automobile à 12 000.

Tableau 7- Caractéristique des zones suite à la construction de l'autoroute

Zone	Coût (Coût moyen des maisons par millier de dollars)	Accessibilité (Millier d'emplois à moins de dix minutes d'automobiles)
1	450	25
2	250	15
3	150	12

En utilisant le même modèle que précédemment, la probabilité de s'installer dans les zones 1, 2 et 3 est désormais de 40%, 27% et 33% respectivement. La probabilité de s'installer dans la zone 3 a donc augmenté à 33% tandis qu'elle a réduit dans les deux autres zones.

$$P_{n3} = \frac{e^{-0.008*150+0.2*12}}{e^{-0.008*450+0.2*25} + e^{-0.008*250+0.2*15} + e^{-0.008*150+0.2*12}} = 0.33$$

Cette situation n'est pas «équilibrée» dans le système, car, à moyen et long terme, l'augmentation de la population dans la zone 3 entraînera un changement de ses caractéristiques. En effet, l'augmentation de la demande résidentielle créerait une pression sur les prix vers le haut, et une augmentation du trafic et donc des temps de déplacements ce qui réduirait l'accessibilité. Ce sont ces relations entre le système de transport et l'utilisation du sol provoquant des tendances importantes à long terme qui sont prises en comptes dans les deux solutions proposées.

Dans un modèle opérationnel, il y aurait davantage de variables, non seulement sur les caractéristiques géographiques (p. ex. accessibilité à des emplois de commerce au détail, nombre de résidences à moins de cinq minutes de marche), mais aussi sur les caractéristiques des ménages ou individus. Le tableau suivant illustre les variables et leur coefficient respectif pouvant apparaître dans une équation plus complète. L'exemple provient d'un modèle préliminaire de mise en place d'UrbanSim à Lausanne en Suisse.

Tableau 8—Exemple de variables et leur coefficient dans un modèle de localisation des ménages (Patterson & Bierlaire 2010)

Variable	Coefficient	Erreur type	Valeur-t
Coût:Revenu	-5.94	0.747	-8.0
Emploi en commerce au détail à moins de cinq minutes de marche	0.03	0.003	9.1
Accessibilité à la population	0.40	0.046	8.8
Temps de déplacement au centre d'affaires	-0.02	0.003	-8.1
Temps de déplacement à une station	0.03	0.002	15.2
% Revenu élevé si revenu élevé	0.03	0.001	48.4
% Revenu bas si revenu bas	0.02	0.001	21.0
Densité élevée si jeune	0.43	0.018	24.1
Mixité d'utilisation si jeune	0.45	0.022	21.0
Unité résidentielle avec des enfants	0.00	0.000	-45.6
LLF final	-440831		
LLF Nul	-444383		
Test LR :	7106		
n	130655		
Statistique de convergence	5.4E-04		

Les coefficients du modèle ont été estimés en utilisant les données de 130 655 ménages à Lausanne. Le modèle incluait une variable sur le coût des propriétés, des mesures d'accessibilité, et des caractéristiques reliées à la similarité entre les caractéristiques du ménage à localiser et les caractéristiques de ceux présents dans les zones.

L'exemple présenté ici illustre quel genre de variables peut être utilisé dans un modèle de localisation de ménages. Les deux approches suggérées proposent un modèle utilisant la même méthodologie que celle présentée ici.

3.4 Approches suggérées

Les auteurs de ce rapport, suite à l'analyse de la littérature et du système de modélisation actuelle du MTQ (présentés dans le deuxième chapitre, en annexe et en fonction de l'historique des pratiques du MTQ) proposent deux approches distinctes répondant aux orientations formulées par le MTQ. La première solution proposée est d'intégrer UrbanSim dans les outils de modélisation afin d'améliorer la prévision de la demande de transport en considérant de manière explicite la relation utilisation du sol et transport. La deuxième option suggérée est de bâtir des sous-modèles sur mesure adaptés aux besoins du MTQ (voir Objectifs du MTQ -

Précision du mandat de recherche, p. 17). Ces deux approches ont été choisies, car elles répondent aux orientations émises par le MTQ tout en étant suffisamment distinctes afin de permettre au MTQ de choisir le scénario le mieux adapté à ses plans futurs de développement.

Les deux approches présentées ici permettent de localiser les ménages, les emplois et les développements immobiliers de la zone étudiée. L'utilisateur doit incorporer l'environnement de base et l'évolution démographique et de l'emploi pour les années de simulation. De plus, les deux approches nécessitent la création préalable d'une population synthétique. Une population synthétique tente de représenter le plus adéquatement possible les individus résidants dans une région donnée. De nombreuses méthodes existent afin de créer cette population, mais les détails de ce processus ne peuvent être présentés dans ce rapport. De nouvelles méthodes ont récemment été développées et testées dans le contexte bruxellois, et donnent des résultats très similaires à la réalité (Faroq, Bierlaire, Hurtubia, & Flötteröd, 2013). Bien qu'il existe certains logiciels permettant de créer une population synthétique, ES-3 pourrait servir à la création de la population synthétique et pourrait même servir de base à la construction de la deuxième approche suggérée.

Des sources de données potentielles sont présentées pour chaque variable utilisée dans les deux approches suggérées. Toutefois, il est important de nuancer que le fait de dire que ces données sont disponibles, ne veut pas dire qu'elles sont utilisables. Il ne fait pas partie du cadre de ce rapport d'approfondir davantage la possibilité d'utiliser les données des sources présentées ici ou d'estimer le travail nécessaire afin de les rendre adéquates à leur intégration dans les simulations. Donc, les sources présentées dans les sections suivantes n'y figurent qu'à titre indicatif.

3.4.1 UrbanSim

UrbanSim est un modèle de microsimulation désagrégé permettant de localiser des ménages, des emplois et des développements immobiliers à l'intérieur d'un cadre de simulation. Il ne s'agit pas d'un modèle de transport, mais il sert plutôt à donner des intrants à un tel système tout en utilisant ce dernier afin de tenir compte de l'interrelation entre l'utilisation du sol et le transport. Il a été développé principalement par Paul Waddell, professeur à l'Université Berkeley en Californie, depuis la fin des années 1990. C'est un logiciel à source ouverte ce qui lui permet d'offrir une plus grande flexibilité d'utilisation puisqu'il peut (en théorie) être modifié en fonction des besoins de l'utilisateur. De plus, le modèle peut être utilisé à différentes unités géographiques ce qui permet à l'utilisateur de tester la version utilisant les zones avant de passer à la version plus complète, mais également plus difficile d'utilisation, utilisant les parcelles comme unité géographique de base. Cette section présentera l'architecture d'UrbanSim, les variables et données nécessaires à son utilisation ainsi qu'une analyse critique du modèle. Les informations présentées sur l'architecture et les données requises proviennent du manuel d'utilisateur du logiciel (Center for Urban Simulation and Policy Analysis, 2011).

Architecture

UrbanSim contient une trentaine de sous-modèles permettant de générer les prévisions de localisation future de ménages, firmes/emplois et de développements immobiliers. Trois agents, les ménages, les emplois et les développements immobiliers, ainsi que les unités

géographiques, peuvent être caractérisés dans UrbanSim et y sont représentés explicitement. L'utilisateur doit introduire les données de l'année de référence utilisées par les différents sous-modèles contribuant aux résultats finaux ou aux extrants du modèle. Les extrants principaux d'UrbanSim sont les localisations des ménages et des emplois, et les développements immobiliers. Le modèle peut fonctionner à différentes échelles géographiques. La taille de l'unité de base est déterminée par l'utilisateur et influencera grandement le processus de mise en place du logiciel ainsi que les résultats obtenus. Le logiciel peut s'adapter à fonctionner à l'échelle des zones (p. ex. zones d'analyse de transport (ZAT)) ou à l'échelle de parcelles. Les comportements des agents à l'intérieur du système sont désagrégés puisque les ménages, les entreprises et les promoteurs immobiliers sont les acteurs de base et sont représentés de manière explicite. Dans le cas de l'utilisation zonale d'UrbanSim, l'utilisateur pourrait utiliser une population synthétique (le modèle restant donc désagrégé au niveau comportemental) et agréger les agents individuels dans les différentes zones (agréger au niveau géographique).

Les sous-modèles d'UrbanSim sont résumés à la figure 8 et peuvent être regroupés dans sept modèles. Bien que modifiable en changeant la programmation fondamentale du modèle, le pas de base d'UrbanSim est l'année et les sous-modèles sont exécutés de manière séquentielle chaque année simulée. Voici les modèles selon la séquence annuelle utilisée par UrbanSim.

Le premier modèle fournit différentes mesures d'accessibilité qui sont nécessaires pour le fonctionnement des modèles et sous-modèles qui suivent. Puisqu'UrbanSim n'est pas un modèle de transport, les données nécessaires à la création d'un indice d'accessibilité par rapport aux temps de déplacements pour atteindre certaines destinations (p. ex. aéroport, centre-ville) sont fournies par un modèle de transport externe. Les données relatives à l'emplacement de ces destinations ou opportunités sont déjà présentes dans UrbanSim. Une fois les mesures d'accessibilité calculées par ce modèle, ces nouvelles variables peuvent être utilisées par les autres modèles d'UrbanSim tels que dans l'exemple de localisation d'un ménage présenté dans la section précédente.

Le deuxième modèle est celui de la transition économique et démographique. Ce modèle sert à estimer la variation en nombre des types de ménages et des emplois par rapport aux années de références dont les données doivent être fournies par l'utilisateur. Le niveau de contrôle de l'utilisateur lui permet de fixer certaines composantes des caractéristiques des ménages et emplois. L'utilisateur doit minimalement donner le nombre de ménages et d'emplois à chaque année simulée, mais pourrait aussi fournir des projections très précises (par ex. nombre de ménages à une personne, ou de chef de ménage de 35 ans) en faisant évoluer l'ensemble de la population synthétique régionale à l'extérieur d'UrbanSim, fournir ces données pour chaque année simulée et laisser UrbanSim localiser cette population dans un modèle subséquent. L'utilisateur a également la possibilité de laisser UrbanSim donner une probabilité de retirer un ménage lorsque ces membres atteignent un certain âge.

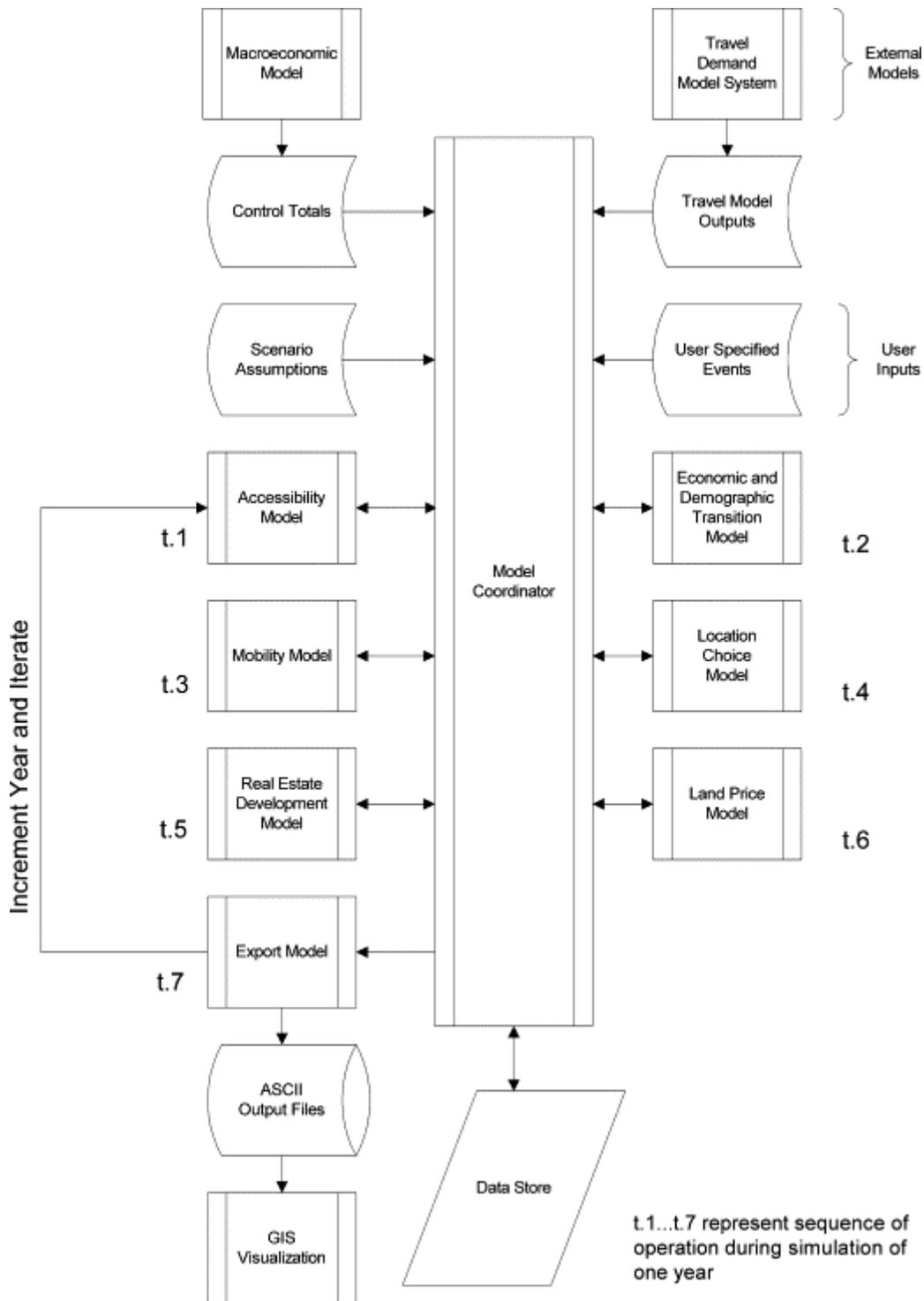


Figure 8 – Présentation des sous-modèles dans UrbanSim

Le troisième modèle intervenant dans la séquence de simulation d'UrbanSim est celui de la mobilité des ménages et des emplois. Le modèle de mobilité sert à déterminer si un ménage ou un emploi changera de localisation. Si l'agent est sélectionné pour changer de localisation, il est placé dans une banque d'agents à localiser et l'espace (immeuble situé dans une parcelle, ou

une zone) qui était utilisé devient vacant. À ce stade, les caractéristiques de la population et des emplois sont connues pour l'année actuelle de simulation, ainsi que la demande (combien de ménages cherchent des résidences, combien d'emplois cherchent un emplacement) et l'offre d'espace (nombre d'immeubles, résidences, superficie industrielle, etc.).

Le modèle suivant ces opérations est celui de la localisation des ménages et des emplois. Chaque ménage ou emploi n'ayant pas d'espace où habiter est attiré à un espace vacant en optimisant l'utilité retirée par l'agent à l'aide de modèles logit multinomiaux (calibrés par l'utilisateur) à partir d'un échantillon d'espace créé aléatoirement. Bien qu'UrbanSim offre la possibilité de localiser certains agents dans des institutions, certains types d'habitations moins traditionnelles (p. ex. pied-à-terre) ou secondaires (p. ex. chalet) ne peuvent être considérées par UrbanSim puisque chaque ménage ne peut occuper qu'un seul espace d'habitation dans le système. Toutefois, ces options peuvent être ajoutées par l'utilisateur en modifiant les codes de programmation du modèle, mais, tel qu'il le sera présenté plus loin, ceci peut être une tâche complexe et longue.

Une fois que chaque ménage et emploi occupe un espace, le modèle de développement immobilier simule les choix des promoteurs qui décident combien et où faire de nouveaux développements et de quels types, ainsi que s'il faut redévelopper certaines infrastructures existantes, ou ne pas intervenir. Des développements immobiliers sont introduits dans une banque de données selon une comparaison de taux de vacances. Si le taux de vacances est moins élevé que le taux paramétré par l'utilisateur en fonction du type d'édifices (voir Annexe 11 Variables utilisées en lien avec les édifices dans UrbanSim (p. 199) pour les types d'édifice, Annexe 14 Variables utilisées pour fixer les taux de vacance dans UrbanSim (p. 203) pour les taux de vacance), des nouveaux développements immobiliers sont placés dans la banque. Les types de développements sont échantillonnés aléatoirement d'une liste de développements historiques.

Un modèle logit multinomial (calibré par l'utilisateur) est appliqué afin de placer chaque développement dans une des unités géographiques appropriées (parcelle, zone, etc.), selon les paramètres du modèle. L'emplacement des développements immobiliers est contraint par l'affectation du sol en place. Par exemple, une parcelle qui se trouve dans une zone agricole ne se trouverait pas parmi les options pour l'emplacement d'un développement. Similairement, des contraintes de densités résidentielles ainsi que les coefficients d'occupation des sols sont pris en considération préalablement à l'inclusion d'une parcelle comme option de localisation de développement. Ce modèle essaie donc de reproduire les décisions des promoteurs.

Le sixième modèle dans la séquence est celui donnant le prix des terrains. Il fait varier le prix de chaque unité géographique en fonction des changements ayant lieu à l'intérieur de l'unité géographique et à proximité, et selon un modèle hédonique (régression linéaire, calibrée par l'utilisateur) de prix de sol. Le dernier modèle de la séquence est celui de l'exportation. Il exporte, selon les critères définis par l'utilisateur, les données obtenues lors de la simulation. Typiquement, les données sur la localisation de ménages et d'emplois (par exemple le nombre de ménages par ZAT) seraient ainsi disponibles pour estimer la demande en transport dans un modèle de transport, ou bien modifier les facteurs d'expansion des ménages.

Les sept modèles présentés agissent en séquence et communiquent entre eux via un intermédiaire appelé le coordinateur. UrbanSim requiert également l'apport d'un modèle de transport externe qui est utilisé comme intrant pour calculer certaines valeurs affectant le processus séquentiel expliqué précédemment. Aussi, l'utilisateur peut intégrer des événements ponctuels (par ex. la construction de quartier résidentiel déjà planifié) afin de simuler leur impact, changer certaines caractéristiques propres au système tel que la taxation afin de prévoir les réactions des agents ou incorporer certaines hypothèses de scénarios tels que le développement accéléré d'un secteur d'emploi particulier.

UrbanSim est un modèle flexible quant à l'unité géographique sélectionnée. Les données nécessaires varient selon le niveau de détail géographique ainsi que le temps de mise en place d'un système fonctionnel et calibré. L'utilisation du logiciel au niveau parcellaire offre plus de flexibilité et de réalisme dans l'approche comportementale des agents. Les exemples de modèles de localisation de ménages présentée à la section 3.4 Approches suggérées (p. 125) permet d'illustrer simplement certains des coefficients pouvant être calibrés par l'utilisateur. Les tableaux des annexes 6 à 15 (p. 194 à 204) permettent de voir toutes les variables qui pourraient être incorporées dans les modèles de localisation et prix du sol lors d'une la calibration. Les variables en italique sont optionnelles et ne sont pas utilisés dans la version zonale d'UrbanSim. Bien que la version zonale soit agrégée géographiquement, le comportement des agents du modèle demeure désagrégé. Pour une liste complète des paramètres et des variables, le lecteur peut se référer aussi au guide d'utilisateur d'UrbanSim le plus récent dont la référence se trouve dans la section 4 Références. p. 149.

UrbanSim ne permet pas à l'interne de simuler la composante transport du système de modélisation. Afin de s'arrimer avec l'approche désagrégée et comportementale d'UrbanSim, le modèle de transport serait idéalement (mais pas nécessairement, car UrbanSim peut interagir avec n'importe quel modèle de transport) basé sur les activités. Le modèle de transport fournit les données nécessaires afin de construire des mesures d'accessibilité et de permettre une interaction entre le système de transport et l'utilisation du sol. Les modèles de transport basés sur les activités nécessitent également une population d'agent synthétique, initialement créée par l'utilisateur (avec par exemple un logiciel existant tel que PopGen), mais qui peut être partagée par les deux modèles.

L'architecture d'UrbanSim permet de localiser la population synthétique créée par un modèle externe (p. ex. PopGen) à partir de modèles mathématiques ayant des fondements théoriques solides et connus comme par exemple celui présenté précédemment dans la section « Exemple d'un choix de localisation résidentiel d'un ménage ». Les agents principaux du modèle, les ménages, les emplois et les promoteurs immobiliers prennent des décisions basées sur des modèles de choix discrets. Toutefois, les modèles présentement intégrés à UrbanSim sont unidimensionnels puisque, par exemple, le choix de localisation des ménages n'est pas influencé par un choix de localisation de travail. Outre les ménages, les emplois et les développements immobiliers, l'autre composante essentielle du modèle est les unités géographiques dont certaines caractéristiques sont données par l'utilisateur (voir

Annexe 12 : Tableaux des variables utilisées pour les développements dans UrbanSim, p. 200) comme par exemple des mesures d'accessibilité.

Intégration d'UrbanSim dans le schéma du système de modélisation du MTQ

Tel que mentionné ci-dessus, UrbanSim n'est pas un modèle de transport indépendant permettant, à l'interne, de produire la demande et de l'affecter à l'offre de transport, il n'est qu'un localisateur de ménages, d'emplois et développements immobilier. Ainsi, il doit s'intégrer dans un système plus large si l'objectif sous-tendant à son utilisation est de simuler à la fois le développement urbain et les transports d'une région. UrbanSim pourrait s'intégrer dans la section Scénario de la demande des outils de modélisation des transports urbains du MTQ actuel (cf. figure 9).

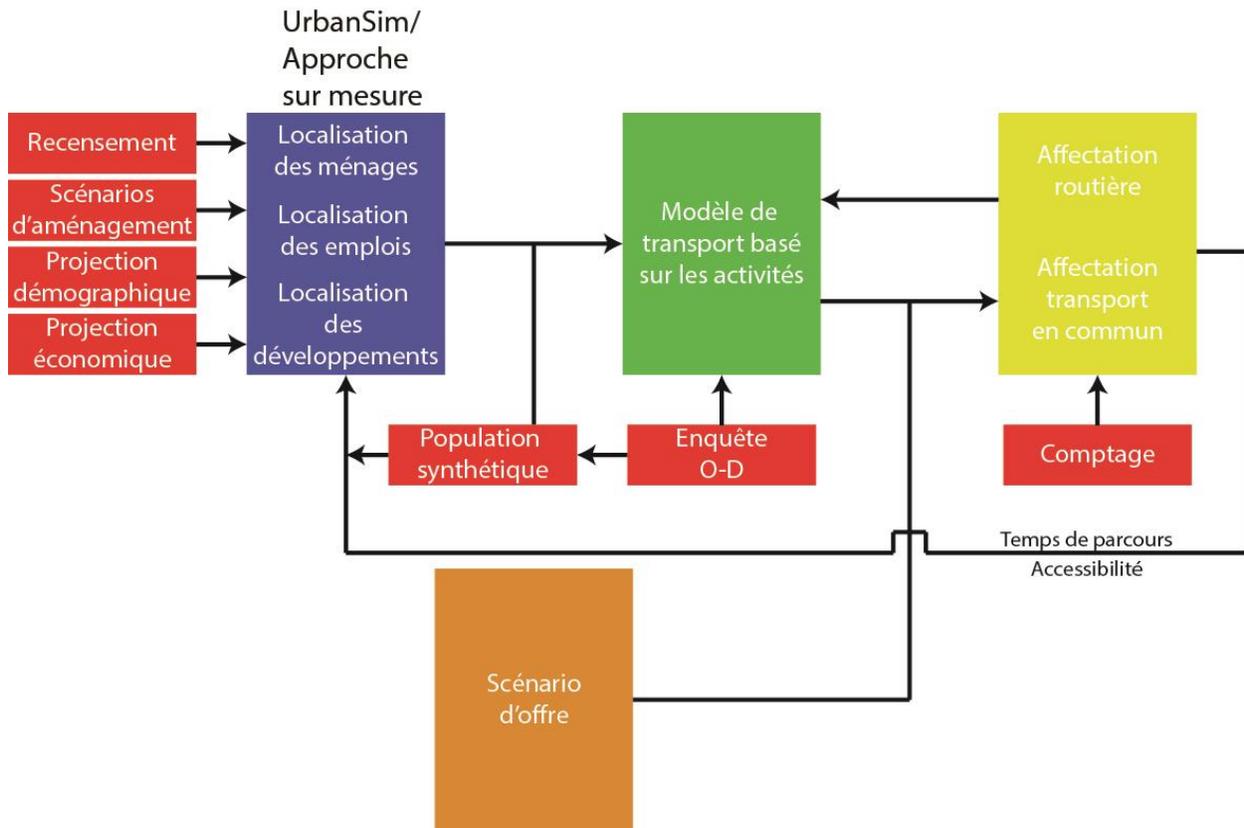


Figure 9– Version simplifiée montrant l'intégration au système actuel des solutions proposées et d'un modèle de transport basé sur les activités

(voir annexe 5 pour l'illustration du système de modélisation actuel, p. 193).

N.B. Les sources en rouge ne sont données qu'à titre d'exemple.

UrbanSim s'insérerait dans le système de modélisation où se trouve actuellement la génération de la demande. UrbanSim projeterait la localisation de ménages et emplois. La population synthétique pourrait être produite par des logiciels programmés à cette fin et basée sur les données de l'enquête O-D (voir section 3.4 Approches suggérées pour plus de détails sur la population synthétique, p. 125). UrbanSim serait idéalement utilisé conjointement avec un modèle de transport basé sur les activités (p. ex. Tasha qui a été étudié à la Polytechnique Montréal récemment). L'intégration des deux systèmes prendrait la forme suivante : UrbanSim

fournirait au modèle de transport basé sur les activités la localisation des ménages et des emplois et le modèle de transport alimenterait UrbanSim des mesures de mobilité (principalement les temps de déplacements) nécessaires à la création des variables d'accessibilité utilisées dans les sous-modèles de localisation et celui de prix des terrains. Donc, la génération de la demande se ferait par la combinaison des deux sous-systèmes. La distribution de la population faite par UrbanSim pourrait par la suite être utilisée pour mettre à jour les facteurs d'expansion utilisés actuellement au MTQ. L'affectation de la demande générée par la population synthétique créée par les deux sous-systèmes pourrait être faite par les mêmes méthodes et logiciels présentement utilisés par le MTQ.

Tel que mentionné précédemment, les unités géographiques d'analyse d'UrbanSim sont définies par l'utilisateur et sont variables. Bien que les auteurs n'aient pas trouvé de recherche donnant un exemple du temps que prendrait la mise en place d'un modèle zonal, il est plausible de croire que le développement d'un tel modèle soit plus rapide puisqu'il requiert moins de données, de calibration de coefficients et de calibration du système en général (voir section Variables et données, p. 143). Ceci permettrait, par exemple, d'utiliser l'unité géographique adoptée dans d'autres aspects du système de modélisation existant tels que les ZAT du MTQ.

Variables et données

Les variables et les données requises au fonctionnement d'UrbanSim sont regroupées dans trois composantes principales et dans la trame de fond de la simulation. L'utilisateur entre les données dans des tableaux utilisés dans un ou plusieurs des sept modèles d'UrbanSim. Les tableaux sont interconnectés par certaines colonnes et identificateurs communs entre les tableaux permettant ainsi la communication entre les modèles et dans les calculs internes au modèle. De nombreuses variables composant ces tableaux sont optionnelles ce qui permet de les ajuster ou les détailler de manière incrémentale.

Les données requises varient substantiellement dépendamment de l'unité géographique d'analyse sélectionnée par l'utilisateur. Les variables optionnelles et à utiliser pour la version zonale sont en italique dans les tableaux présentés aux annexes 6 à 15. Puisque la version utilisant les parcelles requiert le plus grand nombre de données, les descriptions des variables et données requises se concentrent sur cette unité géographique. Plusieurs de ces variables sont définies par l'utilisateur et servent de base à l'évolution du système. Aussi, certaines variables peuvent être modifiées par l'utilisateur afin de mener des simulations. Ainsi, les données requises dépendent de l'objectif de la simulation, mais certaines données issues de ces variables seront la plupart du temps fournies par des enquêtes (recensement, enquête O-D, ISQ, etc.). Les données utilisées par le système doivent provenir de prévisions faites par l'utilisateur au niveau régional, donc tout le travail d'hypothèses d'évolution démographique et d'emplois au niveau régional se fait à l'extérieur d'UrbanSim. Par la suite, UrbanSim localisera les emplois ou ménages à l'intérieur de cette région soit par parcelle ou par zone dépendamment de l'unité géographique d'analyse choisie.

Il est important de noter que les sources de données fournies dans ce document n'y figurent qu'à titre d'exemple. De plus, il peut exister une différence majeure entre la disponibilité d'une donnée et la possibilité de l'utiliser directement dans une simulation. En effet, les données

brutes peuvent avoir subi des transformations majeures auprès de l'organisme les récoltant et un travail d'adaptation de ces données devient alors nécessaire, particulièrement lorsqu'elles sont utilisées pour différentes années. Aussi, un travail important d'harmonisation est souvent nécessaire afin d'utiliser des données provenant de différentes sources.

Variables et données pour les ménages

Quatre tableaux structurent les caractéristiques des ménages provenant de la population synthétique : contrôle annuel des ménages, taux de relocalisation des ménages, ménages et définition des races. Le dernier tableau est optionnel et n'est requis que si l'utilisateur souhaite intégrer cette variable dans le système. Le tableau contrôle annuel des ménages permet de dire combien de ménages ayant certaines caractéristiques se retrouvent dans chaque année de simulation. Par exemple, l'utilisateur peut définir le nombre d'automobiles, d'enfants ou de personnes habitant un ménage, son revenu et, par la suite, indiquer au modèle combien de ménages ayant ces caractéristiques se retrouveront dans le système dans les années subséquentes. Ces informations proviendraient de projections régionales faites à l'externe d'UrbanSim.

Le deuxième tableau caractérisant les ménages du système, taux de relocalisation des ménages, donne la probabilité qu'un ménage se relocalise en fonction d'un couple de variables paramétrables regroupant l'âge et le revenu. L'utilisateur combine pour chaque couple âge-revenu un pourcentage de chance que le ménage se relocalise. Le troisième tableau, ménages, localise spatialement chaque ménage synthétique donnant ainsi à chaque unité géographique un certain nombre de ménages caractérisé par les variables présentes dans le tableau 1. Finalement, le dernier tableau qui est optionnel, définit la race du ménage et la caractérise comme étant une minorité ou non.

Les variables ci-dessus peuvent être obtenues à l'aide de l'enquête origine-destination à l'exception de celles reliées à la relocalisation des ménages. Ces dernières peuvent être obtenues à l'aide des données du recensement en observant le taux de mobilité par cohorte d'âge et de revenu. La liste complète des variables ainsi que leur description se retrouve à l'Annexe 6 : Variables utilisées en lien avec les ménages dans UrbanSim (p. 194).

Variables et données pour les emplois

Les variables reliées aux emplois sont regroupées dans 7 tableaux distincts et sont comparables à ceux nécessaires pour les ménages : contrôle annuel d'emploi, taux de relocalisation, secteurs d'emploi, secteur d'emploi *ad hoc*, définition des secteurs d'emploi *ad hoc*, emplois par unité géographique et les édifices reliés aux emplois. La liste complète des variables utilisées pour définir la situation d'emploi dans le système est présentée à l'Annexe 7 : Variables utilisées en lien avec les emplois dans UrbanSim (p. 195).

Le premier tableau, contrôle annuel d'emploi, caractérise chaque secteur d'emploi et définit combien d'emploi de ce secteur économique se font à partir du domicile et combien sont non domiciliés. Le deuxième tableau définit le taux de relocalisation (paramétrable par l'utilisateur) des emplois pour chaque secteur économique présent dans le système. Les troisième, quatrième et cinquième tableaux sont utilisés par l'utilisateur pour nommer les secteurs d'emploi. Le cinquième tableau sert à identifier un emploi, les types d'édifice

(paramétrable par l'utilisateur) où peut se retrouver cet emploi, l'édifice dans lequel cet emploi se trouve et l'espace qu'occupe cet emploi. Finalement, le dernier tableau identifie les édifices où peuvent se retrouver des emplois qu'ils soient à domicile ou non.

L'Annexe 8 : Sources potentielles des données reliées aux emplois dans UrbanSim (p. 196) présente les données requises en lien avec l'emploi, les variables qui utilisent ces données et les sources où elles peuvent être obtenues dans le contexte montréalais. Le tableau résume les données qui devraient être utilisées afin de créer une image des types, emplacements et caractéristiques des emplois que doit connaître UrbanSim. Par exemple, l'Enquête nationale des ménages donne le nombre d'emplois par secteur d'activités et permet d'extrapoler la mobilité des emplois par secteur. Ensuite, Infogroup Canada, ou bien la Liste des industries et commerces (la LIC), donnent des informations à l'échelle micro sur les emplois. En particulier, ils donnent des informations sur la localisation exacte des emplois de manière désagrégée ainsi que certaines caractéristiques pouvant servir à estimer, en les mettant en relation avec des données servant à connaître les caractéristiques des édifices, la superficie occupée par chaque emploi. Certaines variables de l'

Annexe 7 : Variables utilisées en lien avec les emplois dans UrbanSim (p. 195) requièrent d'autres données qui ne sont pas présentées ici, car elles sont davantage reliées aux caractéristiques des parcelles. Ces données seront décrites dans la section traitant des unités géographiques.

Variables et données de transport pour les ZATs

Afin de communiquer avec le modèle de transport et construire certaines composantes nécessaires au calcul de mesures telles que l'accessibilité, les caractéristiques des ZATs ainsi que le temps de trajet entre les zones doivent être incluses dans le modèle (voir Annexe 9 : Variables utilisées en lien avec les ZATs dans UrbanSim, p. 197). Les données nécessaires pourraient être obtenues à l'aide du modèle de transport actuel du MTQ, ou bien d'un modèle de transport basé sur les activités. D'autres coûts que ceux proposés initialement par UrbanSim peuvent aussi être utilisés, puisque cette variable est optionnelle et le modèle offre la possibilité d'ajouter des attributs au tableau « trajet ». Ainsi, il est possible de mettre des coûts basés sur le mode utilisé afin d'intégrer les transports actifs en plus de l'automobile et du transport en commun.

Variables et données pour les unités géographiques et les édifices

Les tableaux dans cette section ont deux fonctions principales. Premièrement, ils fournissent les caractéristiques de chaque unité géographique, les parcelles dans la discussion qui suit, ou les zones si cette unité est choisie par l'utilisateur. Deuxièmement, ils situent spatialement dans la simulation les éléments présentés précédemment liés aux emplois, aux ménages, édifices et aux ZATs.

Les variables principales reliées aux édifices caractérisent leur taille, le nombre d'unités résidentielles ou de surface de bureau, le nombre d'étages et sa valeur. D'autres données plus détaillées (voir Annexe 11 : Variables utilisées en lien avec les édifices dans UrbanSim, p. 199) peuvent être ajoutées par la suite dépendamment des besoins de l'utilisateur, de la disponibilité des données ainsi que des résultats lors des étapes de calibration. L'utilisateur peut décider du

degré de précision auquel il souhaite appliquer la réglementation relatif au zonage. Il peut donner des critères généraux tel que l'usage général (p. ex. commercial) ou très prescriptif (p. ex. commerce de proximité, industrie lourde).

Certaines données reliées aux parcelles peuvent être obtenues en consultant la réglementation en vigueur. Pour l'utilisation du sol, différentes méthodes peuvent être utilisées. Des compagnies privées telles que DMTI peuvent fournir de l'information quant à l'utilisation effective du sol, mais n'ont pas les données relatives au zonage. La réglementation permet de savoir quelle utilisation est permise sur une parcelle. Obtenir les données de zonage représente beaucoup de travail puisqu'elles doivent être obtenues pour chaque municipalité et, une fois obtenues, elles doivent être harmonisées pour les combiner ensemble. Une enquête en cours à Concordia s'attèle à cette tâche en utilisant les différents plans d'aménagement, d'urbanisme et le Plan métropolitain d'aménagement et de développement pour la région de la CMM. Pour ce qui est des valeurs évaluées des parcelles et des édifices s'y trouvant, l'année de construction, ainsi que de la taille de ces édifices, ces données sont disponibles dans les rôles d'évaluation foncière des différentes municipalités, et pour la Communauté métropolitaine de Montréal, la compilation des rôles des municipalités par le MAMROT. Les variables pouvant être utilisées pour caractériser les parcelles et les édifices s'y trouvant sont présentées à l'

Annexe 10 : Variables utilisées en lien avec les parcelles dans UrbanSim (p. 198).

Variables et données pour les projets de développement

Les variables reliées aux projets de développement (voir Annexe 12 : Tableaux des variables utilisées pour les développements dans UrbanSim, p. 200) permettent de définir les projets en cours ou à venir dans la région simulée. Le premier tableau permet de caractériser les projets – leur taille, leur temps de construction, le nombre d'unités, leur coût, etc. – et de créer des modèles génériques de nouveau développement pouvant être réutilisés à de nombreuses reprises. Les données nécessaires à la création des tableaux de développement sont définies par l'utilisateur et sont obtenues en consultant les réglementations en vigueur ou en fonction du marché des coûts et prix des différentes composantes d'un développement.

Variables et données pour les développements

Ces variables (voir Annexe 13 : Variables utilisées pour fixer les contraintes aux nouveaux développements dans UrbanSim, p. 202) sont utilisées afin de fixer les contraintes des nouveaux développements présentés dans la sous-section précédente. Par exemple, le ratio d'utilisation du sol par les édifices ou les utilisations permises peuvent être définis dans ces tableaux. Les données proviennent principalement du zonage réglementant les parcelles où sont construits les nouveaux projets de développement.

Les types de développements doivent être préalablement définis par l'utilisateur. Par exemple, l'utilisateur doit définir la densité d'un type de développement, le nombre, la taille et le type d'unités développées, et le coût de construction en fonction du type d'unités construites. Finalement, l'utilisateur peut également représenter indirectement le niveau de saturation du marché en utilisant une fonction de vélocité contraignant la proportion du projet construit par année et le nombre maximal et minimal d'unités pouvant être construits pour ce type de développement générique défini par l'utilisateur.

Variables et données pour les contraintes d'espace vacant

Les variables définissant l'espace vacant servent l'espace escompté pour chaque type d'édifices d'une région. L'utilisateur les définit à l'année de référence et peut les fixer à certaines années de la simulation. Trois variables sont requises pour remplir ce tableau : le type d'édifices auquel s'applique le taux de vacance, l'année simulée ou observée, et le ratio d'espace vacant (voir Annexe 14 : Variables utilisées pour fixer les taux de vacance dans UrbanSim, p 203).

Variables et données encadrant les simulations

Ces variables définissent le cadre de la simulation, la sensibilité de certains agents et certaines caractéristiques sociodémographiques de la population. Les données ou valeurs sont, dans certains cas, définies par l'utilisateur, excepté pour les informations relatives au revenu des ménages qui sont habituellement obtenus grâce aux données de recensement. Le tableau scénario de raffinement (voir Annexe 15 : Variables encadrant les simulations d'UrbanSim, p. 204) permet d'intégrer dans la simulation des changements prévus par l'utilisateur. Il peut définir à l'avance un changement dans la quantité de certains agents – emplois ou ménages – et voir l'impact de ces changements sur le reste du système. C'est également ici que l'utilisateur définit les constantes de modélisation tels que la taille des unités géographiques, les unités de

mesure utilisées, la distance de marche acceptable ou jusqu'à quel âge quelqu'un est considéré jeune.

Cette section a présenté les variables et données nécessaires à l'utilisation d'UrbanSim. Bien que la plupart des données soient disponibles d'une façon ou d'une autre dans la région métropolitaine de Montréal, elles demeurent nombreuses et la cueillette peut s'avérer coûteuse en ressources. Toutes ces données doivent être entrées dans le modèle et les données définies par l'utilisateur doivent être testées afin de calibrer le modèle correctement. De plus, les modèles de localisation et du prix de la terre doivent être estimés et calibrés également.

Les variables utilisées pour les unités géographiques de zones sont beaucoup moins nombreuses, puisque, par exemple, les emplois et ménages sont localisés dans des pseudo-édifices englobant les zones plutôt que dans des édifices existant sur chaque parcelle. Toutefois, la qualité des simulations peut être moins élevée, car de nombreuses caractéristiques du modèle deviennent agrégées. De plus, de nombreux avantages liés à l'approche comportementale seraient perdus en agrégeant ces données. La section suivante présente une analyse critique d'UrbanSim abordée selon la perspective du contexte du MTQ.

Analyse critique d'UrbanSim

Tous les modèles ont des forces et des faiblesses. Certains sont très adaptés à des situations particulières et d'autres, donnent des perspectives générales. Les objectifs de développement du MTQ sont pris en compte pour analyser l'utilisation d'UrbanSim. Cette analyse d'UrbanSim est basée sur des études de cas provenant de la littérature académique. Il est important de noter que la majorité des recherches publiées sur UrbanSim ont été écrites par ses développeurs, il est donc difficile d'obtenir une perspective extérieure sur les efforts et l'efficacité du modèle dans des situations de mise en place concrète. Ainsi, les exemples d'utilisation présentés ici ne proviennent pas des recherches faites par le développeur, mais plutôt par des équipes ayant tenté d'utiliser ce modèle pour la première fois dans différents contextes en termes de taille et localisation géographique de la ville. Il est malheureusement très rare que les équipes indiquent clairement le temps requis pour mettre en place UrbanSim et combien de personnes ont travaillé à cette fin. De plus, les objectifs de mise en place d'UrbanSim varient grandement, donc les efforts de certaines équipes peuvent être plus grands sur certains modèles que sur d'autres. Ainsi, le temps nécessaire pour mettre en place UrbanSim peut varier grandement en fonction de l'objectif poursuivi par l'équipe.

Patterson et Bierlaire (2010) ont testé l'implémentation du logiciel à Bruxelles et Lausanne en utilisant la version de grille qui n'est plus supporté dans la nouvelle version (Zachary Patterson & Michel Bierlaire, 2010). Les limitations auxquelles ils ont fait face, les recommandations faites dans leur article par rapport à une utilisation intégrée du logiciel et l'expérience de l'un des auteurs auprès de la communauté d'utilisateurs ont été utilisés afin d'illustrer le plus réalistement possible la mise en place d'UrbanSim. Patterson et coll. ont aussi analysé la possibilité d'utiliser des données agrégées afin d'utiliser UrbanSim et, bien que les résultats des simulations n'étaient pas de bonne qualité, ont découvert qu'agir de la sorte favorise une familiarisation du logiciel et de ses forces et faiblesses (Patterson, Kryvobokov, Marchal, & Bierlaire, 2010).

Nguyen-Luong (Nguyen-Luong, 2008) a mis en place UrbanSim pour la région de Paris en utilisant l'unité géographique de grille (qui n'est plus supporté par les développeurs). La taille des grilles utilisées était de 500 mètres. Son équipe affirme avoir obtenu des résultats intéressants excepté ceux relatifs au marché immobilier. Des difficultés rencontrées relatives au transfert du modèle d'un contexte nord-américain à celui de Paris pourraient survenir à Montréal. En effet, les contraintes de développement plus élevées à Montréal que dans de nombreuses métropoles américaines pourrait nécessiter, comme ce fut le cas pour Paris, des calibrages supplémentaires. Il est important de noter, puisqu'il s'agit d'une des deux orientations énoncées par le MTQ, que l'équipe a eu de la difficulté à gérer le modèle quant à l'interaction utilisation du sol et transport. Ils expliquent brièvement que ceci fut causé en partie par une mise à jour d'UrbanSim pendant leur travail d'implémentation à Paris et qui rendait certaines fonctions mises en place inutiles. Ils estiment qu'un projet tel que le leur, qui n'utilise pas la version parcellaire d'UrbanSim, nécessite le travail d'au moins quatre personnes ayant des disciplines d'origines différentes pendant au moins trois ans.

Di Zio *et coll.* (2010) ont utilisé UrbanSim dans la grande région de Rome en Italie leur permettant d'écrire un article résumant les principales difficultés rencontrées et les leçons qu'ils en ont tiré. L'objectif principal était de faire des simulations quant aux impacts de la déconcentration des activités économiques vers les sous-pôles. Les quatre principaux problèmes concernent tous les données : leur disponibilité, leur accessibilité, leur non-homogénéité et leur incomplétude. Ils présentent les techniques utilisées afin de remédier à ces quatre problèmes. Ils ont dû combiner différentes sources afin d'obtenir les données nécessaires ce qui demande d'importants efforts d'harmonisation et des techniques statistiques complexes pour estimer la valeur des données manquantes. Il est intéressant de noter qu'après cinq années de travail, bien qu'utilisant des grilles de 250 mètres plutôt que la version utilisant des parcelles, l'équipe commençait à peine en 2010 à calibrer le système et qu'il pouvait commencer à faire des tests.

Kryvobokov *et coll.* (2012) ont utilisé UrbanSim afin de simuler les variations de prix du marché de l'immobilier à Lyon en utilisant le *Real Estate Price Model*. Ils ont donc pu tester l'efficacité de l'interaction utilisation du sol et système de transport puisque des mesures d'accessibilité étaient utilisées afin d'estimer les valeurs sur le marché immobilier. Le modèle de transport externe utilisé dans leurs travaux est MOSART. Les tests faits ont démontré que l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport suivait les directions attendues. En effet, une augmentation dans les mesures d'accessibilité causaient une augmentation des prix du marché immobilier. Toutefois, la précision des estimations laissent à désirer dans les zones périphériques ou de nombreux développements peuvent survenir, mais étaient satisfaisantes pour les zones centrales.

Kakaraparthi et Kockelman (2011) ont utilisé la version ayant comme unité géographique la grille dans la ville d'Austin, TX, pour alimenter un modèle de transport de la région afin d'estimer les émissions de gaz à effet de serre dans différents scénarios (Kakaraparthi & Kockelman, 2011). Leur recherche permet de bien comprendre certaines capacités d'UrbanSim, mais révèle également quel type de complications peuvent survenir lors de son utilisation et les faiblesses (présentées dans les deux sous-sections suivantes) qui devront être améliorées dans le futur.

Joshi et coll. (2006), ont simulé l'impact de la mise en place d'un système de train léger dans la région de Phoenix, mais se concentre davantage sur les résultats de leur simulation que sur le processus d'implémentation d'UrbanSim.

Zhao et Chung (2006) ont appliqué UrbanSim dans la région de Volusia County, FL (F. Zhao, Chung, S., 2006). Ils décrivent en détail le processus de mise en place d'UrbanSim, les difficultés qu'ils ont rencontré et les résultats qu'ils ont obtenus.

Avantages

L'une des particularités d'UrbanSim est qu'il est un logiciel de source ouverte. Ce qui veut dire qu'il est gratuit, est en constant développement, et qu'il peut être modifié par l'utilisateur, s'il possède des compétences et connaissances en programmation et en simulation, afin de l'adapter à différentes réalités. Ceci veut dire que les variables présentées dans la section précédente peuvent être adaptées afin de correspondre aux réalités locales, que les coefficients du modèle peuvent être (et normalement le sont) également ajustés sur mesure en fonction de la situation et que la séquence de base peut être changée. Toutefois, étant donné la complexité du logiciel, une interaction avec l'équipe de développement est souvent nécessaire afin d'arriver à modifier la programmation de base du système et requerrait tout de même beaucoup d'effort et d'essai et erreur. Le fait qu'il soit à source ouverte veut également dire qu'il est disponible instantanément et peut être téléchargé directement du site Internet. Aussi, les données de différents modèles déjà en opération peuvent être téléchargées et servir d'exemple afin de baser un nouveau modèle.

L'une des forces d'UrbanSim est qu'il permet à un utilisateur de communiquer ses résultats. Il est possible grâce au modèle d'exportation de produire des fichiers lisibles dans de nombreux programmes. Il peut exporter des données pouvant être lu dans les SIG afin de les traiter et les représenter. UrbanSim peut également exporter de nombreux tableaux ou graphiques portant sur la grande majorité des variables présentées dans la section précédente. Finalement, le modèle d'exportation permet également de représenter automatiquement et dynamiquement l'évolution des simulations selon certaines variables choisies par l'utilisateur. Ceci peut être très utile afin d'observer les tendances de variables clés. Toutefois, ces outils de communication intégrés au modèle ne sont pas à point et sont souvent sujet à des problèmes difficilement rectifiables, excepté par une personne ayant une expertise élevée en informatique.

L'un des avantages de la création d'UrbanSim zonal est qu'il permet à des institutions intéressées à son utilisation de tester son efficacité et sa capacité d'intégration au système déjà en place avant de faire le saut vers la version plus complète du modèle utilisant les parcelles comme unités de référence.

Finalement, UrbanSim répond aux deux orientations énoncées par le MTQ dans le cadre du nouveau modèle urbain et permettrait d'améliorer certains autres aspects de la modélisation actuelle tels que les méthodes d'évolution des facteurs d'expansion puisqu'il pourrait capturer l'évolution des comportements des agents avant qu'il ne se produise. En effet, le modèle est basé sur les comportements d'agents individuels et il prend explicitement en compte l'interaction du système de transport et l'utilisation du sol. Les comportements des agents sont décidés par des modèles supportés par des fondements théoriques et mathématiques

formellement exprimés et appuyés par la littérature. Bien qu'UrbanSim ne comporte pas de modèle de transport à l'interne, il a été programmé afin de « communiquer » avec un modèle externe et d'être sensible à ce système dans la simulation de l'utilisation du sol. Un modèle de transport basé sur les activités tel que celui étudié récemment par une équipe de la Polytechnique pour le MTQ pourrait produire de bons résultats d'intégration des extrants d'UrbanSim. De la même façon, un tel modèle de transport donnerait les intrants nécessaires à UrbanSim afin de faire fonctionner certains de ses modèles. De plus, les deux modèles ayant une approche désagrégée, le niveau d'analyse demeurerait le plus fin possible à cette étape, même si l'utilisateur souhaite agréger certains résultats par la suite. Un modèle traditionnel tel que MOTREM, pourrait être utilisé pour communiquer avec UrbanSim, toutefois, un modèle basé sur les activités seraient plus cohérent avec l'approche d'UrbanSim.

Inconvénients

Le principal inconvénient d'UrbanSim est la quantité de données requises, leur acquisition, préparation et harmonisation. Aussi, puisque ces données sont nombreuses et que les variables interagissant le sont également, la calibration du système peut être relativement fastidieuse et nécessiter de nombreuses ressources et compétences particulières dans le domaine de la simulation telles que la modélisation statistique de choix discret, la régression linéaire, et de la programmation. La quantité importante de variables pourrait rendre l'utilisation du logiciel ardue.

Bien que la quantité de données requise soit élevée pour la version complète basée sur les parcelles, il est possible d'atténuer cet inconvénient de deux façons. Premièrement, tel que mentionné précédemment, il est possible d'utiliser le modèle à l'échelle des zones et par la suite de passer à l'échelle des parcelles sans perdre complètement la calibration effectuée des variables présentées dans les tableaux 1 à 4. Deuxièmement, tel que présenté dans les tableaux de variables, plusieurs sont optionnelles et permettent donc un raffinement incrémental du modèle. La quantité de données requise élevée est un inconvénient puisque ceci fait nécessairement augmenter la quantité de personne-année requise à sa mise en place. La complexité des facteurs influençant les décisions des agents présentés dans la revue de littérature de l'étape 1 justifie en partie la quantité de variables utilisées par UrbanSim et les données requises afin de l'alimenter.

Tel que mentionné précédemment, le logiciel contient certains *bogues* qui peuvent devenir de sérieux casse-têtes et augmentent considérablement le niveau d'expertises requis en informatique. De plus, le logiciel est en constant développement ce qui peut corriger certains problèmes, mais en intégrer de nouveaux pour les utilisateurs de l'ancienne version. Cette évolution peut également créer d'autres problématiques. Par exemple, une version précédente permettait d'utiliser une unité géographique variable de grille. Les développeurs ont par la suite décidé d'arrêter de travailler avec cette unité ce qui fait en sorte que cette unité et version n'est plus supportée par l'équipe d'UrbanSim. Un autre changement majeur est survenu dans le passé lorsque la programmation du logiciel est passée du langage Java à Python. Bien que les développeurs aient maintenant un groupe de support consultation payant appelé *Syntheticity*, la collaboration peut demeurer fastidieuse.

Tel que décrit au début de la section « Analyse critique d'UrbanSim », UrbanSim a été utilisé dans différents contextes à travers le monde, mais principalement dans des contextes académiques. Plusieurs de ces expériences ont permis l'écriture d'articles aidant de futurs utilisateurs dans l'implémentation du logiciel et ces utilisateurs pourraient être perçus comme une source d'aide et d'information pour les nouveaux utilisateurs.(Joshi, 2006; Kakaraparthi & Kockelman, 2011; Zachary Patterson & Michel Bierlaire, 2010; F. Zhao, Chung, S., 2006). Les utilisateurs passés et présents sont une source importante d'information puisque l'équipe de développeur est plutôt restreinte et le support habituellement offert par une entreprise privée n'est pas disponible pour UrbanSim. Bien qu'il existe un forum d'utilisateurs et Synthicity, ceux-ci, ainsi que les différents guides et tutoriels disponibles, ne remplace pas le support attendu d'un fournisseur officiel ou d'un institut de recherche local ayant participé au développement du modèle de simulation.

UrbanSim ne permet pas de modéliser le transport de marchandises. Bien que cette fonctionnalité ne soit pas disponible sur les logiciels existants, il s'agit tout de même d'un inconvénient d'UrbanSim, car le transport de marchandises représente un apport important aux déplacements en milieu urbain. Aussi, UrbanSim ne prend pas en considération l'évolution du système économique et son impact potentiel sur les transports. Ces deux aspects ont été énoncés dans la définition d'un modèle sans compromis puisqu'ils étaient identifiés comme des facteurs important dans les explications de l'état des systèmes de transport.

Un autre désavantage d'UrbanSim, particulièrement lorsqu'on considère le système utilisé présentement par le MTQ et son historique de développement, est que pour fonctionner, un ensemble important du système principal doit être mis en place avant de produire des résultats. Ceci veut dire qu'une importante quantité de données doivent être accumulées et qu'un important processus préparatoire doit être fait avant de tester son fonctionnement. De plus, puisqu'une partie des informations requises par UrbanSim provient de modèles extérieurs, la calibration entre les deux est nécessaire avant de le tester.

UrbanSim est un modèle de prévision de localisation de ménages, d'emplois et de développements immobiliers désagrégé répondant aux attentes du nouveau modèle urbain tel que défini par le MTQ (voir la section 3.2 Modèle sans compromis, p. 121). C'est un logiciel à source ouverte qui est en constant développement et, pouvant être modifié par l'utilisateur. Le modèle peut s'insérer dans le processus actuel de modélisation du MTQ et peut être utilisé en complémentarité avec des modèles autant agrégés que désagrégés. Dans l'éventualité où le MTQ se doterait d'un modèle dit activité, UrbanSim pourrait donc encore s'insérer dans le processus de modélisation.

Ce modèle exige une quantité importante de données, ce qui alourdit considérablement son implantation (obtention des données, validation des données, calibration des coefficients, et cetera). Le logiciel est toujours en développement et il comporte certains *bogues*. Son utilisation reste difficile et peut demander une expertise en informatique. De plus, le produit évoluant continuellement, certains attributs peuvent ne plus être disponibles avec le temps. Le soutien technique pour UrbanSim peut s'avérer problématique.

3.4.2 Approche sur mesure

L'autre option à considérer est la reconstruction incrémentale sur mesure du système actuellement utilisée au MTQ. L'approche sur mesure incrémentale permettrait au MTQ de choisir quels modèles doivent être modifiés en premier en fonction de ses priorités, et de le faire de manière à correspondre aux objectifs à long terme du MTQ. Cette approche par définition devrait être bâtie sur mesure pour le MTQ et le contexte montréalais et permettrait d'utiliser ou même de modifier les modèles en place maintenant afin de modifier certaines méthodologies (p. ex. utilisation de modèles de choix discrets afin de localiser les ménages). Cette section est basée sur des exemples de modèles existants et ayant été développés sur mesure pour différentes villes dans le monde. Des exemples sont donnés dans la section *Modèles opérationnels étudiés*, et d'autres peuvent être trouvés dans une recension faite en 2008 (Michael Iacono, David Levinson, & Ahmed El-Geneidy, 2008).

Architecture

L'approche sur mesure s'intégrerait à l'architecture en place actuellement au MTQ. Certains modules seraient remplacés par de nouveaux répondants aux orientations émises dans le cadre du nouveau modèle urbain. Bien que ces nouveaux modèles individuels perdraient légèrement en valeur ajoutée puisqu'ils interagiraient avec des modèles non comportementaux, cette perte d'utilité irait en diminuant au fur et à mesure que de nouveaux modèles remplaceraient certains modèles utilisés actuellement. Cette façon de procéder correspond à l'approche historique du MTQ afin de développer son système de modélisation en place actuellement. Par exemple, le modèle de localisation des ménages (présent dans ES-3) pourrait être remplacé par un nouveau basé sur une approche désagrégée de choix discret, mais construit à partir des projections faites par le MTQ au niveau régional.

Les bases et fonctions des modèles développés devraient autant que possible s'approcher des conclusions des chapitres 1 et 2 en s'inspirant du modèle sans compromis. Le phasage de modifications du modèle existant devrait être basé sur les modèles identifiés dans la deuxième partie où les améliorations possibles sont les plus substantielles. Les améliorations devraient être faites en suivant le parcours de communication des modèles, de l'amont à l'aval, afin de conserver une approche désagrégée, lorsque possibles. Le phasage exact devrait être choisi en fonction des priorités du MTQ et pourrait s'inspirer des résultats présentés dans les rapports 1 et 2, mais particulièrement le premier qui s'intéresse aux éléments les plus importants et pour lesquels il existe une plus grande expérience (voir par exemple le Tableau 2- Phénomènes et facteurs clés pour la localisation des emplois/firmes de la section Évaluation des modèles présentés, p.95).

L'échelle à privilégier par les nouveaux modèles devrait être désagrégée et basée sur les ménages et les emplois, et le modèle de transport devrait être idéalement basé sur les activités. Ainsi, le nouveau système se rapprocherait du modèle sans compromis en intégrant une approche comportementale, et l'interaction entre l'utilisation du sol et le système de transport.

Les modèles qui profiteraient d'une modification et qui cadrent dans les objectifs de ce rapport sont les modèles suivants : prévision démographique et de localisation des ménages, prévision

de localisation d'emplois, ensemencement des déplacements et projection des déplacements. Le modèle sur mesure présenté ci-dessous se concentre, tel que défini dans le mandat, sur la section de localisation des ménages, des emplois et des nouveaux développements. Ainsi, l'espace utilisé par les nouveaux modèles initiaux serait le même que celui pris par UrbanSim présenté à la figure 9. Tout comme pour les résultats de localisation des emplois et des ménages d'UrbanSim, ces extraits de l'approche sur mesure pourraient être utilisés afin d'ajuster les facteurs d'expansion utilisés afin de créer la demande de transport.

Le premier objectif à atteindre de l'approche sur mesure serait de fournir des scénarios de demande de transport aux modèles d'affectation sur le réseau routier. Les nouveaux modèles utiliseraient également la matrice coût O-D utilisée permettant ainsi de construire des mesures d'accessibilité afin de l'intégrer dans les sous-modèles de localisation des ménages et des emplois et, s'il y a lieu, un modèle simulant le marché foncier. Un apport supplémentaire que pourrait donner les nouveaux modèles utilisés pour générer le scénario de demande est d'intégrer à cette étape le choix modal des individus fait à l'aide de la matrice de coût O-D (tableau présentant le temps de déplacement par mode pour passer d'une ZAT à une autre) et les préférences de la population synthétique. De plus, cet objectif permettrait d'ajuster les facteurs d'expansion utilisés actuellement.

L'approche sur mesure est évidemment la plus flexible dans son architecture, car le MTQ pourrait décider de la marche à suivre, dans le choix des modèles à développer, dans quel ordre les développer et la structure de chacun de ces modèles. De plus, le MTQ peut utiliser l'architecture répondant aux attentes émises dans le cadre du nouveau modèle urbain et en fonction des orientations futures. Puisque le modèle utilisé présentement a été bâti sur mesure par le MTQ, il serait possible d'intégrer graduellement de nouveaux modèles comparativement à une situation où le MTQ utiliserait un logiciel complet tel UrbanSim. Cette approche permettrait plus facilement d'intégrer dans un modèle basé sur les activités la modélisation du transport de marchandises et éventuellement, l'interaction système économique et système de transport puisqu'il pourrait être conçu dès le début dans la perspective de cette intégration.

Variables et données

Les variables utilisées par l'approche sur mesure dépendent des modèles à modifier. Cette section présentera les variables et données qui seraient nécessaires afin de produire des projections de localisation de ménages et d'emplois qui, en combinaison avec un modèle basé sur les activités pourraient produire une demande de transport. Ainsi, il s'agit principalement de prévoir de manière désagrégée et comportementale la localisation des ménages et des emplois, et leur évolution au cours d'une simulation sur plusieurs années.

Contrairement à UrbanSim où les données nécessaires sont en grande partie déjà énumérées dans le logiciel, l'utilisateur devrait choisir quelles variables inclure. Les variables requises au bon fonctionnement d'un système répondant aux attentes principales du modèle sans compromis sont résumées à l'Annexe 16 : Variables de base de l'approche sur mesure (p. 205). Il s'agit de définir les caractéristiques principales des ménages, des emplois et des composantes physiques du modèle telles que les parcelles et les édifices. Par exemple, pour un modèle désagrégé de localisation des ménages, les variables principales définissant les

ménages sont requises ainsi que certaines données relatives aux parcelles. Les données relatives aux nombres d'individus, d'enfants, de travailleurs, le revenu, le taux de motorisation et la probabilité de relocalisation sont des variables importantes et pouvant être obtenues grâce à l'enquête O-D, le recensement et l'Enquête nationale sur les ménages. Pour relocaliser ces ménages, des données sur les parcelles et les immeubles sont nécessaires. Par exemple, la taille de la parcelle, sa valeur, son zonage et les contraintes d'aménagements sont nécessaires afin d'assurer des résultats de qualité. Tout comme UrbanSim, mais avec une plus grande flexibilité, des tests peuvent être faits avec différentes échelles de modélisation. Ultimement, les données requises pourraient être semblables à celles requises par UrbanSim, toutefois, leur acquisition pourrait être faite de manière incrémentale et avec une plus grande flexibilité dépendamment des besoins du MTQ, des résultats des calibrations et de la disponibilité des données.

L'annexe 16 présente les variables de base que devraient utiliser les modèles conçus si l'approche sur mesure était prise. Le niveau de précision recherché influencera la quantité de données utilisée pour chacune de ces variables. Par exemple, si la mesure d'accessibilité est de type gravitaire, uniquement la localisation des opportunités et le temps de déplacement pour s'y rendre est nécessaire, alors que d'autres types d'accessibilité nécessiterait davantage de données.

Les variables nécessaires aux projets de développement sont en fait les mêmes que celles reliées aux parcelles. Afin de choisir l'emplacement et le type des nouveaux développements, elles sont mises en relation avec les variables des caractéristiques des emplois et des ménages, et du scénario d'offre de transport. En effet, la probabilité de développement dépendra de la rentabilité des projets et de la demande en espace locatif.

Finalement, les résultats des modèles de localisation des ménages et des emplois seraient utilisés comme intrants pour le modèle d'ensemencement des déplacements en participant à la prévision de la demande de transport.

Analyse critique de l'approche sur mesure

Avantages

L'avantage principal de l'approche sur mesure est que le modèle serait conçu pour répondre exactement aux besoins du MTQ, contrairement à UrbanSim qui a été développée dans un tout autre contexte urbain, démographique et économique, et organisationnel puisqu'il a été conçu aux États-Unis et dans un cadre académique. L'approche sur mesure devrait respecter l'approche théorique présentée et tenir compte des qualités recherchées selon les termes du devis. Le modèle devrait donc être basé sur une approche désagrégée comportementale et incorporer l'interaction explicite entre l'utilisation du sol et le système de transport. Un système fait sur mesure pourrait intégrer une approche désagrégée comportementale de manières multidimensionnelles. Par exemple, dans UrbanSim, le choix de localisation résidentielle est fait indépendamment de la localisation d'emploi(s) d'un ménage alors qu'un ménage pourrait faire ces deux choix en même temps.

Une approche sur mesure peut s'adapter plus facilement à différentes réalités qu'un logiciel tel qu'UrbanSim puisqu'il est plus flexible. Même si le modèle était développé initialement pour la région de Montréal, il serait plus facile de le calibrer et modifier pour s'adapter à d'autres réalités du Québec puisque le contenu du modèle serait mieux connu qu'UrbanSim qui peut, bien qu'ayant ses sources ouvertes, être parfois comparé à une boîte noire.

Aussi, un système sur mesure permet d'utiliser plus rapidement les nouveaux sous-modèles puisqu'ils peuvent être intégrés graduellement au système déjà en place plutôt que de devoir attendre la calibration et le contrôle de l'ensemble du système comme c'est le cas pour un logiciel intégré.

Finalement, l'approche sur mesure permet de s'assurer que les mêmes formats et bases soient utilisés dans les différents sous-modèles. En effet, autant l'approche théorique que le style de programmation pourraient être constants d'un modèle à l'autre. Ceci rend également l'approche sur mesure très flexible, car chaque partie peut être modifiée sans avoir à changer l'ensemble du système tant et aussi longtemps que les différents modules peuvent communiquer entre eux.

Inconvénients

L'écriture complète d'un nouveau modèle requiert des connaissances assez pointues aussi bien en programmation qu'en simulation. Tel que présenté dans la partie 1, de nombreux essais de développement ont été faits dans le passé et ne réussissent jamais à capturer tous les éléments dictés par la théorie. Toutefois, les modèles construits sur mesure dans certaines régions (p. ex. ILUTE) peuvent donner des résultats satisfaisants pour les utilisateurs. De plus, puisque les nouveaux modèles seraient intégrés de façon incrémentale, des complications peuvent survenir lors des interactions entre les nouveaux et les anciens modules.

Un autre inconvénient de l'approche sur mesure provient du fait que des informations essentielles au fonctionnement d'un module proviendraient d'un autre module. Par exemple, le module de localisation des ménages doit utiliser une contrainte limitant le nombre d'habitants possibles sur chaque parcelle, alors que cette contrainte serait habituellement déjà en place dans les modèles existants. Par exemple, UrbanSim a des mécanismes déjà en place afin de s'assurer que les nouveaux développements soient uniquement permis où ils sont autorisés. Ainsi, l'utilisation d'un module développé selon l'approche proposée nécessiterait fort probablement la modification de modules déjà en place afin de permettre la transmission entre les deux modules des informations nécessaires.

3.4.3 Synthèse des avantages et des inconvénients des deux approches

L'avantage principal d'UrbanSim est qu'il s'agit d'un modèle qui est déjà existant et qui s'inscrit dans une poursuite des deux orientations mises de l'avant dans l'écriture de ce rapport. En effet, il permet de considérer l'interaction utilisation du sol et système de transport et il adopte une approche comportementale des agents. L'approche sur mesure devrait être construite, mais pourrait être basée et construite à partir des modèles présentement utilisés par le MTQ, tels qu'ES-3. De plus, le développement de l'approche sur mesure est en continuité avec la façon dont a été développé le système en place présentement au MTQ.

UrbanSim possède certaines flexibilités relatives aux données devant être utilisées. De plus, la version zonale peut servir de test afin de vérifier si le modèle donne les résultats escomptés avant d'aller de l'avant avec la version utilisant les parcelles. Toutefois, l'approche sur mesure offre davantage de flexibilité, et ce, sur plusieurs aspects (voir Tableau 9 – Avantages et inconvénients des approches suggérées, p. 147).

Les deux approches nécessitent des ressources spécialisées afin d'être mises en places. Il a été démontré qu'UrbanSim nécessite également beaucoup de ressources étant donné la quantité de données requises élevées et le travail d'acquisition, de préparation, d'harmonisation et de calibration qui y est rattaché.

Le tableau suivant résume l'ensemble des avantages et inconvénients des deux approches. Pour plus de détails et une explication détaillée, vous pouvez vous référer à la section respective aux deux approches.

Tableau 9 – Avantages et inconvénients des approches suggérées

	UrbanSim	Approche sur mesure
Avantages	Source ouverte	Répond exactement aux besoins du MTQ
	Gratuit et disponible maintenant	Plus de flexibilité vis-à-vis forme des sous-modèles
	Code modifiable (connaissance informatique poussée requise)	Flexibilité dans le phasage de développement
	Expériences précédentes fournissent des exemples	Flexibilité dans les caractéristiques de développement
	Listserve d'utilisateurs	Besoins de données plus flexibles
	Version zonale permet de tester son implémentation	Amélioration subséquente des modèles possibles
	Raffinement incrémental possible	Adaptable plus facilement à d'autres villes québécoises
		Utilisation du nouveau système, modèle par modèle, sans devoir attendre que tout le système soit modifié
		Concentration et expertise en modélisation de transport et microsimulation élevées à Montréal
		Langage de programmation uniforme et connu de l'utilisateur
Inconvénients	Quantité et type de données requises	Connaissance en programmation requise
	Calibration fastidieuse	Possible complication entre les nouveaux modèles et les anciens
	Ressources requises élevées et spécialisées	Modifications potentielles à prévoir sur les anciens modèles pour communiquer avec les nouveaux
	L'ensemble du système doit être mis en place pour qu'il fonctionne	Pour assurer le bon fonctionnement d'un nouveau modèle, la construction et l'utilisation d'autres modèles pourraient être nécessaires
	En cours de développement	
	Ne modélise pas le transport de marchandises	
	Ne modélise pas l'évolution du système économique	
	<i>Bogues</i> présents dans le logiciel	
	Modèles présentement intégrés à UrbanSim sont unidimensionnels	

3.5 Proposition de scénarios de développement des modèles

L'intégration des deux propositions, UrbanSim et l'approche sur mesure, au système actuel du MTQ se ferait de manière différente. En effet, UrbanSim s'intégrerait en un bloc, tandis que l'approche sur mesure pourrait être intégrée de façon incrémentale. Un scénario d'intégration est proposé pour chacune des deux solutions recommandées.

3.5.1 UrbanSim

UrbanSim offre une flexibilité de mise en place sous deux aspects. Premièrement, l'utilisateur peut choisir à quelle échelle géographique sera subdivisée la région. Deuxièmement, l'utilisateur peut ignorer certaines variables optionnelles dans un premier temps et même certains tableaux de variables présentés précédemment.

Puisque la mise en place d'UrbanSim utilisant la parcelle comme niveau de détail géographique utilise de nombreuses données et nécessite beaucoup de ressources, les auteurs suggèrent d'évaluer préalablement l'efficacité de la simulation de la région métropolitaine de Montréal et en testant préalablement le modèle avec la version utilisant les zones.

Durant la période de test, il serait également recommandé de n'utiliser que les variables liées à des données pouvant être le plus facilement obtenues. Toutefois, les variables nécessaires à la mise en place d'une approche comportementale et prenant en compte l'interaction utilisation du sol et système de transport devraient être utilisées puisqu'elles seront éventuellement nécessaires afin de poursuivre les orientations du nouveau modèle urbain.

Une fois le test accompli avec la version zonale et le nombre de données utilisées réduit, le MTQ pourrait choisir en fonction des résultats obtenus s'il souhaite aller de l'avant avec la version plus complète et utilisant une approche spatialement désagrégée (par parcelle). Si le MTQ souhaite également utiliser un modèle basé sur les activités pour générer la demande de transport, il serait préférable de mettre en place UrbanSim préalablement à ce nouveau modèle de transport. En effet, un modèle de transport basé sur les activités produit des résultats supérieurs s'il est mis en relation avec un modèle de prévision de la demande ayant une approche désagrégée. Ces deux modèles nécessitent la création d'une population synthétique pouvant être partagée par les deux modèles. De plus, le modèle de transport utilise davantage d'extraits du modèle de prévision de la demande que l'inverse.

3.5.2 Approche sur mesure

Le scénario de mise en place de l'approche sur mesure a été discuté en partie dans la section présentant son architecture. Telle que mentionné précédemment dans cette section, la suite logique à suivre serait de commencer la transition avec le modèle pouvant être amélioré le plus par les nouvelles orientations et de poursuivre les modifications en suivant les liens existants dans la structure de modélisation actuelle.

Le premier modèle qui devrait être développé est celui de la prévision démographique pour deux principales raisons. Premièrement, c'est le modèle où des améliorations possibles substantielles ont été identifiées dans la deuxième partie en ce qui a trait à l'intention de rendre le modèle basé explicitement sur les comportements et où l'interaction entre les modèles de

transport et d'utilisation du sol est explicite. Deuxièmement, c'est de ce modèle que découlent de nombreux intrants aux autres modèles dans la structure actuelle du système (cf. Figure 9– **Version simplifiée montrant l'intégration au système actuel des solutions proposées et d'un modèle de transport basé sur les activités**). Par la suite, le deuxième modèle qui devrait logiquement être développé est celui de localisation des emplois. Ainsi, les informations de base requises au bon fonctionnement du modèle de transport basé sur les activités permettant l'ensemencement des déplacements seraient disponibles. Par la suite, un modèle permettant la construction de nouveaux développements intégrant un nouvel agent, les promoteurs, pourrait être développé afin d'intégrer cet aspect dans le système. Finalement, une fois que les modèles de base ont été développés et que la quantité de recherche faite sur le sujet est suffisante pour les modéliser, des modèles de transport de marchandises et d'évolution économique pourraient être développés.

3.6 Conclusion

Deux approches à considérer sont présentées dans ce chapitre : UrbanSim et l'approche sur mesure. L'avantage principal d'UrbanSim est qu'il est fonctionnel et, bien qu'il représente de nombreux défis d'utilisation, représente la meilleure option parmi les logiciels existants sur la base des critères considérés et des objectifs visés. Toutefois, le fait qu'il soit toujours en développement, qu'il contienne de nombreux *bogues*, et qu'il nécessite une quantité importante de données - au moins suffisantes pour permettre le fonctionnement des tous les différents sous-systèmes (c.-à-d. localisation de ménages, localisation d'emplois) - avant de donner des résultats, représentent des considérations importantes avant de se lancer dans l'implémentation de ce logiciel.

L'approche sur mesure permet à l'utilisateur de choisir les données à être utilisées lors des modélisations. De plus, adopter une telle option représente pour le MTQ la poursuite de l'approche prise jusqu'à maintenant dans le développement du système utilisé depuis les années 90. Ainsi, le MTQ n'aurait pas à s'adapter à la fois à de nouvelles perspectives de modélisation et à une nouvelle approche de développement des modèles.

Les deux approches ont des avantages et inconvénients. Toutefois, suite à l'analyse des deux options et en se basant sur les résultats des rapports d'étape 1 et 2, les auteurs croient qu'une approche sur mesure est plus cohérente avec l'approche historique prise par le MTQ et offre plus de flexibilité à la fois sur les besoins et la disponibilité des données que sur l'ordre d'implémentation du nouveau système.

4. RÉFÉRENCES

- Abraham, J., & Hunt, J. (1997). Specification and estimation of nested logit model of home, workplaces, and commuter mode choices by multiple-worker households. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1606), 17-24.
- Abraham, J. E., & Hunt, J. D. (1997). *Calibrating the MEPLAN model of Sacramento*. Paper presented at the TRB Annual Conference 1998. <http://people.ucalgary.ca/~jabraham/00104.pdf>
- Alberti, M., & Waddell, P. A. (2000). An integrated urban development and ecological simulation model. *Integrated Assessment*, 1, 215-227.
- Alonso, W. (1960). A theory of the urban land market. *Papers in regional science*, 6(1), 149-157. doi: 10.1111/j.1435-5597.1960.tb01710.x
- Alonso, W. (1969). A reformulation of classical location theory and its relation to rent theory. *Papers in regional science*, 19(1), 23-44.
- Alperovich, G., & Katz, E. (1988). The location decision and employment suburbanization. *Urban Studies*, 25, 243-247.
- An, M. (2009). *Integration of the Regression-Based Land Use Model and the Combined Trip Distribution-Assignment Transportation Model*. (Ph.D.), University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
- Anas, A. (1981). The estimation of multinomial logit models of joint location and travel mode choice from aggregated data. *Regional science*, 21(2), 223-242. doi: 10.1111/j.1467-9787.1981.tb00696.x
- Anas, A. (1982). *Residential location markets and urban transportation: Economic theory, econometrics, and policy analysis with discrete choice models*: Academic Press. New York.
- Anas, A. (1983). Discrete choice theory, information theory and the multinomial logit and gravity models. *Transportation Research*, 17B(1), 13-23.
- Anas, A. (1984). Discrete choice theory and the general equilibrium of employment, housing, and travel networks in a Lowry-type model of the urban economy *Environment and Planning A*, 16(11), 1489-1502.
- Anas, A., Arnott, R., & Small, K. (1998). Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature*, 36, 1426-1464.
- Arentze, T. A., & Timmermans, H. J. P. (2004). A learning-based transportation-oriented simulation system. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 38B(7), 613-633.
- Axhausen, K. W. (1990). A simultaneous simulation of activity chains and traffic flow. In P. M. Jones (Ed.), *Developments in dynamic and activity-based approaches to travel analysis* (pp. 206-225). Brookfield, VT: Avebury.
- Barrett, C. (1995). *An Operational Description of TRANSIMS*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory.
- Batty, M. (1979). Progress, success and failure in urban modelling. *Environment & Planning A*, 11(8), 863-878.
- Bhat, C., & Guo, J. (2004). A mixed spatially correlated logit model: formulation and application to residential choice modeling. *Transport Research Part B*, 38, 147-168.
- Blackley, P. (1985). The demand for industrial sites in a metropolitan area: Theory, empirical evidence, and policy implications. *Journal of Urban Economics*, 17, 247-261.
- Boarnet, M. (1994). The monocentric model and employment location. *Journal of Urban Economics*, 36, 79-97.
- Bollinger, C., & Ihlanfeldt, K. (2003). The intraurban spatial distribution of employment: Which government interventions make a difference? *Journal of Urban Economics*, 53, 396-412.

- Bowman, J. L. (2006). A Review of the Literature on the Application and Development of Land Use Models: Atlanta Regional Commission.
- Bowman, J. L., & Ben-Akiva, M. E. (2001). Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research, Part A*, 35A(1), 1-28.
- Brown, L., & Longbrake, D. (1970). Migration flows in intraurban space: Place utility considerations. *Annals of the Association of American Geographers*, 60(2), 368-384.
- Brown, L., & Moore, E. (1970). The intra-urban migration process: A perspective. *Geografiska Annaler. Series B, Human Geography*, 52(1), 1-13.
- Burgle, M., Lochl, M., & Waldner, U. (2005). *Integrated transport and land use simulation for Zurich*. Paper presented at the 5th Swiss Transport Research Conference, Monte Verita, Switzerland.
- Carlton, D. (1983). The location and employment choices of new firms: An econometric model with discrete and continuous endogenous variables. *The Review of Economics and Statistics*, 65(3), 440-449.
- Center for Urban Simulation and Policy Analysis. (2011). *Opus: The open platform for UrbanSim Version 4.3 reference manual and users guide*.
- Cervero, R. (1984). Light rail transit and urban development. *Journal of the American Planning Association*, 50(2), 133-147.
- Chang, J. (2006). Models of the relationship between transport and land-use: A review. *Transport Reviews*, 26(3), 325-350.
- Chapin, F. S. (1974). *Human activity patterns in the city*. New York, NY: Wiley.
- Charney, A. (1983). Intraurban manufacturing location decisions and local tax differentials. *Journal of Urban Economics*, 14, 184-205.
- Clarke, G. P. (1996). *Microsimulation for Urban and Regional Policy Analysis European Research in Regional Science 6*. Pion: London.
- Clay, M. J. (2010). Developing an integrated land-use/transportation model for small to medium-sized cities: case study of Montgomery, Alabama. *Transportation Planning and Technology*, 33(8), 679-693.
- Cooke, T. (1983). Testing a model of intraurban firm relocation. *Journal of Urban Economics*, 13, 257-282.
- de la Barra, T. (1984). TRANUS-J: putting large scale models into small computers. *Environment & Planning B*, 11, 87-101.
- de la Barra, T. (1989). *Integrated transport and land use modelling: decision chains and hierarchies*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- De la Barra, T., Echenique, M., Quintana, M., & Guendelman, J. (1975). An urban regional model for the central region of Chile. In R. S. Baxter & M. H. Echenique (Eds.), *Urban Development Models* (pp. 137-174). Lancaster: J. Owens Construction Press.
- de la Barra, T., & Rickaby, P. A. (1982). Modelling regional energy-use: a land-use, transport, and energy-evaluation model. *Environment & Planning B*, 9(4), 429-443.
- Di Zio, S., Montanari, A., & Staniscia, B. (2010). Simulation of urban development in the City of Rome: Framework, methodology, and problem solving. *Journal of Transport and Land Use*, 3(2).
- Duthie, J., Kockelman, K., Valsaraj, V., & Zhou, B. (2007). *Applications of Integrated Models of Land Use and Transport: a Comparison of ITLUP and UrbanSim Land Use Models*. Paper presented at the 54th Annual North American Meetings of the Regional Science Association International, Savannah, Georgia.
- Earnhart, D. (2002). Combining revealed and stated data to examine housing decisions using discrete choice analysis. *Journal of Urban Economics*, 51(1), 143-169. doi: 10.1006/juec.2001.2241

- Echenique, M., Moilanen, P., Lautso, K., & Lahelma, H. (1995). Testing integrated transport and land-use models in the Helsinki metropolitan area *Traffic Engineering and Control*, 36(1), 20-23.
- Echenique, M. H. (2004). Econometric models of land use and transportation. In D. A. Hensher, K. J. Button, K. E. Haynes & P. R. Stopher (Eds.), *Handbook of transport geography and spatial systems* (Vol. 5, pp. 185-202). Amsterdam: Elsevier.
- Echenique, M. H., Crowther, D., & Lindsay, W. (1969). A spatial model of urban stock and activity. *Regional Studies*, 3, 281-312.
- Echenique, M. H., Flowerdew, A. D., Hunt, J. D., Mayo, T. R., Skidmore, I. J., & Simmonds, D. C. (1990). The Meplan models of Bilbao, Leeds, and Dortmund. *Transport Reviews*, 10, 309-322.
- Ellickson, B. (1981). An alternative test of the hedonic theory of housing markets. *Journal of Urban Economics*, 9(1), 56-79.
- Erickson, R., & Wasylenko, M. (1980). Firm relocation and site selection in suburban municipalities. *Journal of Urban Economics*, 8, 69-85.
- Farooq, B., Bierlaire, M., Hurtubia, R., & Flötteröd, G. (2013). Simulation based population synthesis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 58, 243-263.
- Fehr and Peers. (2007). An Assessment of Integrated Land Use/Transportation Models: Southern California Association of Governments.
- Filion, P., Bunting, T., & Warriner, K. (1999). The entrenchment of urban dispersion: Residential preferences and location patterns in the dispersed city. *Urban Studies*, 36(8), 1317-1347.
- Flowerdew, A. D. J. (1977). An evaluation package for a strategic land use/transportation plan. In P. Bonsall, Q. Dalvi & P. Halls (Eds.), *Urban Transportation Planning* (pp. 241-258). Turnbridge Wells: Abacus Press.
- Garin, R. A. (1966). A matrix formulation of the Lowry model for intra-metropolitan activity. *Journal of the American Institute of Planners*, 32, 361-364.
- Geraldes, P. E., M.H. and Williams, I.N. (1978). *A spatial economic model for Bilbao*. Paper presented at the PTRC.
- Goodman, A. (1990). Demographics of individual housing demand. *Regional Science and Urban Economics*, 20, 83-102.
- Gottlieb, P. (1995). Residential amenities, firm location and economic development. *Urban Studies*, 32(9), 1413-1436.
- Greenwood, M. (1980). Metropolitan growth and the intrametropolitan location of employment, housing, and labor force. *The Review of Economics and Statistics*, 62(4), 491-500.
- Greenwood, M., & Stock, R. (1990). Patterns of change in the intrametropolitan location of population, jobs, and housing: 1950 to 1980. *Journal of Urban Economics*, 28, 243-276.
- Grotewold, A. (1959). Von Thunen in retrospect. *Economic Geography*, 35(4), 346-355.
- Hagerstrand, T. (1970). What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association*, 24, 7-21.
- Hardy, M. H. (2011). *Simplified Integrated Transportation and Land Use Modeling to Support Metropolitan Planning Decisions: An Application and Assessment*. (Ph.D.), George Mason University.
- Hayashi, Y., & Tomita, Y. (1989). A micro-analytic residential mobility model for assessing the effects of transport improvement. *Transport Policy, Management and Technology - Towards 2001, Selected Proceedings of the Fifth World Conference on Transport Research, Yokohama* (pp. 91-105). Ventura, CA: Western Periodicals.
- Hernandez, T., & Bennison, D. (2000). The art and science of retail location decisions. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 28(8), 357-367.
- Hirton, J. E., & Echenique, M. (1979). An operational land use and transport model for the Tehran region. *Iran Transport Research Circular*, 199, 6-7.

- Holl, A. (2006). A review of the firm-level role of transport infrastructure with implication for transport project evaluation. *Journal of Planning Literature*, 21(1), 3-14.
- Horowitz, A. J. (2004). Lowry-type land use models. In D. A. Hensher, K. J. Button, K. E. Haynes & P. R. Stopher (Eds.), *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems* (Vol. 5, pp. 167-183). Amsterdam: Elsevier.
- Horowitz, A. J. (2004). Lowry-type land use models. In D. A. Hensher, K. J. Button, K. E. Haynes & P. R. Stopher (Eds.), *Handbook of transport geography and spatial systems* (pp. 167-183). Amsterdam: Pergamon Press.
- Hunt, J. (2001). Stated preference analysis of sensitivities to elements of transportation and urban form. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1780), 76-86.
- Hunt, J. D. (1994). Calibrating the Naples land-use and transport model. *Environment & Planning B*, 21(5), 569-590.
- Hunt, J. D., & Abraham, J. E. (2003). *Design and Application of the PECAS Land Use Modelling System*. Paper presented at the 8th Computers in Urban Planning and Urban Management Conference, Sendai, Japan.
- Hunt, J. D., & Abraham, J. E. (2005). Design and implementation of PECAS: a generalised system for allocating economic production, exchange and consumption quantities. In M. Lee-Gosselin & S. T. Doherty (Eds.), *Integrated land-use and transportation models: behavioural foundations* (pp. 253-273). Amsterdam: Elsevier.
- Hunt, J. D., & Abraham, J. E. (2009). PECAS - for Spatial Economic Modelling. Theoretical Formulation. System Documentation Technical Memorandum 1. Working Draft. Calgary, Alberta: HBA Specto Incorporated.
- Hunt, J. D., Miller, E. J., & Kriger, D. S. (2005). Current operational urban land-use-transport modelling frameworks: a review. *Transport Reviews*, 25(3), 329-376.
- Hunt, J. D., & Simmonds, D. C. (1993). Theory and application of and integrated land-use and transport modelling framework. *Environment & Planning B*, 20(2), 221-244.
- Iacono, M., Levinson, D., & El-Geneidy, A. (2008). Models of transportation and land use change: a guide to the territory. *Journal of Planning Literature*, 22(4), 323-340. doi: 10.1177/0885412207314010
- Iacono, M., Levinson, D., & El-Geneidy, A. (2008). Models of transportation and land use change: a guide to the territory. *Journal of Planning Literature*, 22(4), 323-340.
- Isard, W., & Whitney, V. (1949). Metropolitan site selection. *Social Forces*, 27(3), 363-269.
- Johnston, R. A., & McCoy, M. C. (2006). Assessment of Integrated Transportation Land Use Models -- Final Report: Information Center for the Environment, Department of Environmental Science & Policy, University of California, Davis.
- Joshi, H., Guhathakurta, S., Konjevod G., Crittenden, J., Li, K. (2006). Simulating the effect of light rail on urban growth in Phoenix: an application of the urbanism modeling environment. *Journal of Urban Technology*, 13(91), 91-111.
- Kain, J. (1962). The journey-to-work as a determinant of residential location. *Papers in regional science*, 9(1), 137-160.
- Kakaraparathi, S., & Kockelman, K. (2011). Application of UrbanSim to the Austin, Texas, Region: Integrated-Model Forecasts for the Year 2030. *Journal of Urban Planning and Development*, 137(3), 238-247. doi: doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000065
- Kelly, E. D. (1994). The transportation land-use link. *Journal of Planning Literature*, 9(2), 128-145.
- Kim, J., Pagliara, F., & Preston, J. (2005). The intention to move and residential location choice behaviour. *Urban Studies*, 42(9), 1621-1636.
- Knapp, T., White, N., & Clark, D. (2001). A nested logit approach to household mobility. *Journal of Regional Science*, 41(1), 1-22.

- Kryvobokov, M., Mercier, A., Bonnafous, A., & Bouf, D. (2012). Simulating housing prices in Lyon with UrbanSim: predictive capacity and sensitivity analysis. *Aestimum*, 61.
- Kulkari, A. A., & McNally, M. G. (2000). An Activity-Based Microsimulation Model for Generating Synthetic Activity-Travel Patterns: Initial Results: Center for Activity Systems Analysis, Institute of Transportation Studies, UC Irvine.
- LaFountain, C. (2005). Where do firms locate? Testing competing models of agglomeration. *Journal of Urban Economics*, 58, 338-366.
- Landis, J. D. (1992). BASS II: A New Generation of Metropolitan Simulation Models. Working Paper 573. Berkeley, CA: Institute of Urban and Regional Development, University of California at Berkeley.
- Landis, J. D. (1994). The California Urban Futures Model: a new generation of metropolitan simulation models. *Environment & Planning B*, 21, 399-422.
- Lee, D. B. (1973). Requiem for large scale urban models. *Journal of the American Institute of Planners*, 39(2), 163-178.
- Lee, K. (1982). A model of intraurban employment locatio: An application to Bogota, Colombia. *Journal of Urban Economics*, 12, 263-279.
- Lerman, S. R. (1976). Location, housing, automobile ownership and mode to work: a joint choice model. *Transportation Research Record*, 610, 6-11.
- Levinson, D., & Krizek, K. (2008). *Planning for place and plexus: metropolitan land use and transport*. Routledge.
- Lowry, I. S. (1964). *A model of metropolis*. Santa Monica, CA: Rand Corp.
- Luce, T. (1994). Local taxes, public services, and the intrametropolitan location of firms and households. *Public Finance Quarterly*, 22(2), 139-167.
- Mackett, R. L. (1990). Comparative analysis of modelling land-use transport interaction at the micro and macro levels. *Environment & Planning A*, 22(4), 459-475.
- Maoh, H., Kanaroglou, P., & Buliung, R. (2005). Modeling the location of firms with an integrated transport and land-use model for Hamilton, Ontario *Centre for Spatial Analysis Working Paper Series* (pp. 30). Centre for Spatial Analysis: McMaster University.
- Marca, J. A., Rhindt, C. A., & McNally, M. G. (2000). *A simulation framework and environment for activity-based transportation forecasting*. Paper presented at the 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Martinez, F., & Donoso, P. (2004). *MUSSA: a behavioural land use equilibrium model with location externalities, planning regulations and pricing policies*.
- Martinez, F. J. (1992). The bid-choice land use model: an integrated economic framework. *Environment & Planning A*, 24, 871-885.
- Martinez, F. J. (1996). MUSSA: A land-use model for Santiago city. *Transportation Research Record*, 1552, 126-134.
- McFadden, D. (1973). Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behaviour. In P. Zaremska (Ed.), *Frontiers in Econometrics* (pp. 105-142). New York: Academic Press.
- McNally, M. G. (1998). Activity-based forecasting models integrating GIS. *Geographical Systems*, 5(2), 163-184.
- McNally, M. G. (2000). The Activity-Based Approach. In D. A. Hensher & K. J. Button (Eds.), *Handbook of Transport Modelling* (Vol. 1, pp. 53-69). Amsterdam: Pergamon Press.
- Mejia-Dorantes, L., Paez, A., & Vassallo, J. (2011). Transportation infrastructure impacts on firm location: The effect of a new metro line in the suburbs of Madrid. *Journal of Transportation Geography*, In Press.
- Meyer, M., & Miller, M. (2000). *Urban Transportation Planning* (2nd ed.): McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Miller, E. J. (2003). Microsimulation. In K. G. Goulias (Ed.), *Transportation systems planning: methods and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- Miller, E. J., Farooq, B., Chingcuanco, F., & Wang, D. (2010). *Microsimulating Urban Spatial Dynamics: Historical Validation Tests Using the ILUTE Model System*. Paper presented at the Presented at the Workshop on Urban Dynamics, Marbella, Chile.
- Miller, E. J., & Salvini, P. (1998). *The Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE) Modelling System: A Framework*. Paper presented at the 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Miller, E. J., & Salvini, P. A. (2001). The Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE) Microsimulation Modelling system: Description and current status. In D. A. Henscher (Ed.), *The Leading Edge in Travel Behaviour Research: Selected Papers from the 9th International Association for Travel Behaviour Research Conference, Gold Coast, Queensland, Australia*.
- Mills, E. (1970). Urban density functions. *Urban Studies*, 7(1), 5-20.
- Miyamoto, K. (1993). *Development and application of a land-use model based on random utility/rentbidding analysis (RURBAN)*. Paper presented at the 13th Meeting of the Pacific Regional Science Conference Organisation, Whistler, British Columbia, Canada.
- Miyamoto, K., Nakamura, H., & Shimizu, E. (1986). *A Land Use Model Based on Disaggregate Behavioral Analyses*. Paper presented at the Fourth World Conference on Transport Research.
- Miyamoto, K., & Udomsri, R. (1996). An analysis system for integrated policy measures regarding land use, transport and the environment in a metropolis. In Y. Hayashi & J. Roy (Eds.), *Transport, Land Use and the Environment* (pp. 259-280). Dordrecht: Kluwer.
- Modelistica. (2007). TRANUS: Integrated Land Use and Transport Modeling System.
- Mok, D. (2007). Do two-earner households base their choice of residential location on both incomes? *Urban Studies*, 44(4), 723-750.
- Muth, R. (1961). The spatial structure of the housing market. *Papers in regional science*, 7, 207-220.
- Muth, R. (1985). Models of land-use, housing, and rent: An evaluation. *Journal of Regional Science*, 25(4), 593-606.
- Nguyen-Luong, D. (2008). An integrated land use-transport model for the Paris region (SIMAURIF): Ten lessons learned after four years of development: Technical report, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France, Paris.
- Pagliara, F., & Wilson, A. (2010). The state-of-the-art in building residential location models. In F. Pagliara, J. Preston & D. Simmonds (Eds.), *Residential location choice: models and applications*. (pp. 1-20). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Patterson, Z., & Bierlaire, M. (2010). Development of prototype UrbanSim models. *Environment and planning B, Planning & design*, 37(2), 344.
- Patterson, Z., & Bierlaire, M. (2010). Development of prototype UrbanSim models. *Environment and Planning B: Planning and Development*, 37(2), 22.
- Patterson, Z., Kryvobokov, M., Marchal, F., & Bierlaire, M. (2010). Disaggregate models with aggregate data: Two UrbanSim applications. *The Journal of Transport and Land Use*, 3(2), 5-37.
- Pendyala, R. M., Kitamura, R., Chen, C., & Pas, E. I. (1997). An activity-based microsimulation analysis of transportation control measures. *Transport Policy*, 4(3), 183-192.
- Prashker, J., Shiftan, Y., & Hershkovitch-Sarusi, P. (2008). Residential choice location, gender and the commute trip to work in Tel Aviv. *Journal of Transport Geography*, 16, 332-341.
- Putman, S. H. (1974). Preliminary results form an integrated transportation and land use models package. *Transportation*, 3(3), 193-224.
- Putman, S. H. (1983). *Integrated urban models: policy analysis of transportation and land use*. London: Pion.
- Putman, S. H. (1991). DRAM/EMPAL ITLUP Integrated Transportation Land-Use Activity Allocation Models: General Description: S.H. Putman Associates.

- Putman, S. H. (2001). The METROPILUS planning support system: urban models and GIS. In R. K. Brail & R. E. Klosterman (Eds.), *Planning support systems: integrating geographic information systems, models and visualization tools* (pp. 99-128). Redlands, CA: ESRI Press.
- Quigley, J. M. (1976). Housing demand in the short-run: an analysis of polytomous choice. In NBER (Ed.), *Explorations in Economic Research* (Vol. 3, pp. 76-102): The National Bureau of Economic Research.
- Recker, W. W., McNally, M. G., & Root, G. S. (1986a). A model of complex travel behavior (I): theoretical development. *Transportation Research, Part A*, 20A(4), 307-318.
- Recker, W. W., McNally, M. G., & Root, G. S. (1986b). A model of complex travel behavior (II): an operational model. *Transportation Research, Part A*, 20A(4), 319-330.
- Rhindt, C. A., Marca, J. A., & McNally, M. G. (2003). *Toward dynamic, longitudinal, agent-based microsimulation models of human activity in urban settings*. Paper presented at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Rohr, C., & Williams, I. N. (1994). Modelling the regional economic impacts of the Channel Tunnel. *Environment & Planning B*, 21, 555-568.
- Roorda, M. J., Doherty, S. T., & Miller, E. J. (2005). Operationalising household activity scheduling models: addressing assumptions and the use of new sources of behavioural data. In M. Lee-Gosselin & S. T. Doherty (Eds.), *Integrated land-use and transportation models: behavioural foundations* (pp. 61-85). Amsterdam: Elsevier.
- Roorda, M. J., & Miller, E. J. (2006). Assessing transportation policy using an activity-based microsimulation model of travel demand. *ITE Journal*, 76(11), 16-21.
- Ryan, S. (1999). Property values and transportation facilities: finding the transportation-land use connection. *Journal of Planning Literature*, 13(4), 412-427.
- Salvini, P., & Miller, E. J. (2005). ILUTE: an operational prototype of a comprehensive microsimulation model of urban systems. *Networks and Spatial Economics*, 5(2), 217-234.
- Schmenner, R. (1978). *The Manufacturing Location Decision: Evidence from Cincinnati and New England* (R. t. EDA, Trans.): U.S. Department of Commerce.
- Sener, I., Pendyala, R., & Bhat, C. (2011). Accomodating spatial correlation across choice alternatives in discrete choice models: An application to modeling residential location choice behaviour. *Journal of Transport Geography*, 19, 294-303.
- Southworth, F. (1995). *A Technical Review of Urban Land Use–Transportation Models as Tools for Evaluating Vehicle Travel Reduction Strategies*. Report 6881. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- Steinnes, D. (1982). Do 'people follow jobs' or do 'jobs follow people'? A causality issue in urban economics. *Urban Studies*, 19, 187-192.
- Steinnes, D., & Fisher, W. (1974). An econometric model of intraurban location. *Journal of Regional Science*, 14(1), 65-80.
- Timmermans, H. J. P. (2003). *The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up?* Paper presented at the 10th International Conference on travel Behaviour Research, Lucerne, Switzerland.
- Train, K. E. (2003). *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Waddell, P. (1993). Exogenous workplace choice in residential location models: is the assumption valid? *Geographical Analysis*, 25(1), 65-82. doi: 10.1111/j.1538-4632.1993.tb00280.x
- Waddell, P. (1998). *An urban simulation model for integrated policy analysis and planning: Residential location and housing market components of UrbanSim*. Paper presented at the World Conference on Transport Research, Antwerp, Belgium.

- Waddell, P., & Ulfarsson, G. F. (2004). Introduction To Urban Simulation: Design And Development Of Operational Models. In D. A. Hensher, K. J. Button, P. R. Stopher & K. E. Haynes (Eds.), *Handbook in Transport: Transport Geography and Spatial Systems* (Vol. 5, pp. 203-236): Pergamon Press.
- Waddell, P. A. (2000). A behavioral simulation model for metropolitan policy analysis and planning: residential location and housing market components of UrbanSim. *Environment & Planning B*, 27(2), 247-263.
- Waddell, P. A. (2002a). Design of an integrated land use and activity-based travel model system for the Puget Sound region. *Transportation Research Record*, 1805, 108-118.
- Waddell, P. A. (2002b). UrbanSim, modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*, 68, 297-314.
- Waddell, P. A., & Borning, A. (2004). A case study in digital government: developing and applying UrbanSim, a system for simulating urban land use, transportation, and environmental impacts. *Social Science Computer Review*, 22(1), 37-51.
- Waddell, P. A., Borning, A., Noth, M., Freier, N., Becke, M., & Ulfarsson, G. (2003). Microsimulation of urban development and location choices: design and implementation of UrbanSim. *Networks and Spatial Economics*, 3(1), 43-67.
- Wang, Y., & Wu, L. (2010). *Integrated land-use and transportation models*. Paper presented at the 18th International Conference on Geoinformatics, Beijing.
- Wegener, M. (1994). Operational urban models: state of the art. *Journal of the American Planning Association*, 60(1), 17-30.
- Wegener, M. (2004). Overview of land use transport models. In D. A. Hensher & K. J. Button (Eds.), *Handbook of transport geography and spatial systems* (pp. 127-146). Amsterdam: Elsevier.
- Wegener, M., & Spiekermann, K. (1996). The potential of microsimulation for urban models. In G. Clarke (Ed.), *Microsimulation for Urban and Regional Policy Analysis. European Research in Regional Science* 6. (pp. 146-163). Pion, London.
- White, M. (1977). A model of residential location choice and commuting by men and women workers. *Journal of Regional Science*, 17(1), 41-52.
- Williams, I. N. a. E., M.H. (1978). *A regional model for commodity and passenger flows*. Paper presented at the PTRC Summer Annual Meeting.
- Wilson, A. (1981). *Geography and the environment: systems analytical methods*. Chichester, UK: Wiley.
- Wilson, A. (2010). Entropy in urban and regional modelling: retrospect and prospect. *Geographical Analysis*, 42(4), 364-394.
- Wilson, A. G. (1967). A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, 1, 253-269.
- Wilson, A. G. (1970). *Entropy in urban and regional modelling*. London: Pion.
- Yates, J., & Mackay, D. (2006). Discrete choice modelling of urban housing markets: A critical review and an application. *Urban Studies*, 43(3), 559-581.
- Yiu, C. (2011). A spatial portfolio theory of household location choice. *Journal of Transport Geography*, 19, 584-590.
- Zhao, F., & Chung, S. (2006). A Study of Alternative Land Use Forecasting Models: Final Report: FDOT Systems Planning Office.
- Zhao, F., Chung, S. (2006). A study of alternative land use forecasting models: final report. Tallahassee, FL: Florida Department of Transportation.

ANNEXES

Annexe 1 : Le modèle de prévision⁷

La méthode prévisionnelle de la demande de transport utilisée au Ministère a été élaborée dans le contexte d'un projet de recherche réalisé entre 1993 et 1997 avec le [groupe MADITUC](#) de l'École Polytechnique de Montréal. Cette procédure, selon une approche désagrégée, est incarnée dans l'application MADEDE (**M**odèle d'**A**nalyse **DÉ**sagrégée de la **D**emande) faisant partie de la suite MADITUC.

La méthode est basée sur une approche désagrégée (observations individuelles de déplacement) plutôt que sous une forme agrégée (matrice O-D). Le principe de base (Équation 1.1) se traduit comme suit : le facteur d'expansion de chaque déplacement est ajusté en fonction de l'évolution présumée des caractéristiques associées à la personne et au déplacement qu'elle effectue. Ces caractéristiques sont examinées par strates de sexe, groupes d'âge et secteur de domicile, sous chacune des **cinq dimensions suivantes** :

- l'effectif de population pour le secteur de domicile;
- le statut d'activité de la personne;
- la motorisation de la personne;
- l'engouement pour le transport en commun;
- la prévision d'emploi.

L'équation montre comment sont appliqués, les uns après les autres, les trois facteurs d'ajustement qui modifient le facteur d'expansion de base de l'enquête O-D.

Équation 1.1

Principe de base du modèle prévisionnel

H = année de projection (horizon)

t = territoire de résidence

$$F_{tsg}^H = F_{tsg}^R \times \frac{P_{tsg}^H}{P_{tsg}^R} \times \frac{S_{tsg}^H}{S_{tsg}^R} \times \frac{M_{tsg}^H}{M_{tsg}^R}$$

R = année de référence

s = sexe

P = population

g = groupe d'âge

S = taux d'activité selon le statut

M = taux de motorisation

Ainsi F_{tsg}^R correspond au facteur d'expansion de déplacement effectué par une personne comportant les caractéristiques **tsg** à l'année de référence. Le facteur d'expansion F_{tsg}^H du déplacement à l'année *Horizon* correspondra à celui de l'année de référence multiplié par l'évolution anticipée de la population possédant les caractéristiques **tsg**, du taux d'activité pour un statut donné et du taux de motorisation.

⁷ Ce texte a été produit par des professionnels du SMST.

Les caractéristiques individuelles de mobilité des personnes sont donc maintenues fixes au niveau de la plus récente enquête O-D. Ce sont les hypothèses quant à l'évolution du nombre de personnes (effectifs) selon les catégories qui feront varier globalement le nombre de déplacements produits selon les différents modes, motifs, origines et destinations.

Les hypothèses

La démarche prévisionnelle consiste en premier lieu, à élaborer un scénario tendanciel qui permet de projeter l'évolution des tendances observées dans le passé. Le scénario tendanciel fait fi des contraintes liées à la capacité de l'offre de transport et aux variations cycliques de l'économie. C'est l'expression de la demande non contrainte.

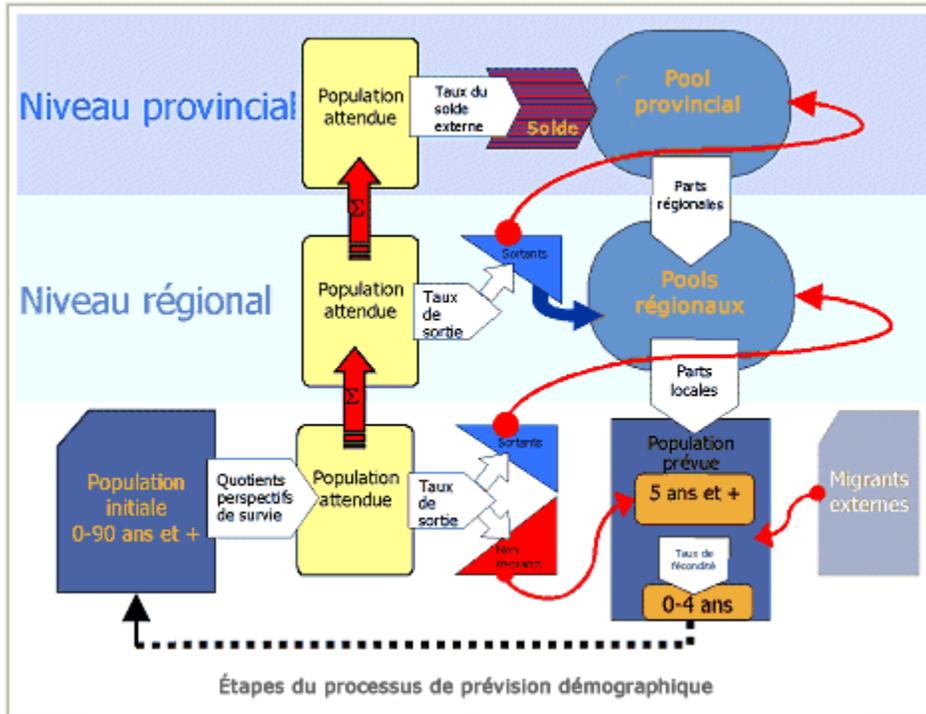
Quatre factorisations sont appliquées aux données de l'enquête O-D pour amener cette dernière à représenter ce que pourraient être les besoins de mobilité des personnes dans la région de Montréal à l'horizon x. Chaque factorisation (appliquée aux individus échantillonnés dans l'enquête) est associée à une hypothèse d'évolution sur une variable affectant la mobilité. Ainsi, les éléments incontournables pour exprimer la mobilité se sont avérés être, au fil des ans et des enquêtes : l'évolution démographique, le statut d'activité de la personne, la motorisation et plus récemment, l'engouement pour le transport en commun. Un dernier et cinquième élément est appliqué directement aux déplacements, il s'agit de la redistribution des déplacements à motif Travail, qui s'appuie quant à lui sur une hypothèse d'emploi.

Hypothèse démographique⁸

L'évolution démographique est réalisée à l'aide du modèle ES-3, mis au point au Ministère au milieu des années 90. ES-3 est un modèle de projection démographique à micro-échelle dont la caractéristique principale est d'appliquer directement la méthode des composantes à chacune des municipalités ou des zones infra municipales considérées dans les projections.

Partant des populations dénombrées dans chaque municipalité ou zone, les populations de chaque intervalle de projection sont générées par un calcul détaillé (selon la cohorte âge-sexe) de la mortalité, de l'émigration (pertes migratoires), de l'immigration (apports de population) et de la fécondité.

⁸ Basé sur ce qui a été envoyée le premier février 2012 par Brigitte St-Pierre et rédigé par Pierre Desgagnés et Hubert Hardy à Zachary Patterson sous le titre « Texte réflexion ES-3 ».



La prise en compte des contraintes d'aménagement

Sachant que la formation des ménages constitue en quelque sorte l'interface entre l'évolution démographique et la croissance urbaine, il est intéressant de transposer les projections de population en projections de ménages. Or, partant de projections démographiques suffisamment détaillées on peut obtenir, assez facilement, de bonnes estimations de l'évolution probable du nombre de ménages en utilisant la méthode dite des «taux de chefs» qui consiste à appliquer aux effectifs prévus à différents horizons des taux dérivés des proportions de «principaux soutiens de ménage» à différents groupes d'âge observées dans les derniers recensement.

Lorsqu'on traduit les projections de population en projection de ménages, on peut se retrouver avec des « besoins en logements » supérieurs aux capacités d'accueil de certaines localités. Eu égard à la distribution infrarégionale des migrants, il s'agit donc de traduire les pools de migrants en un nombre déterminé de ménages virtuels, qui sont en quelque sorte à la recherche d'un logement.

Dans ES-3, une proportion de ménages cherchera donc à se localiser à un nouvel emplacement. Ces ménages sont comptabilisés dans les pools de migrants. Ils sont redistribués dans les différentes localités en fonction des taux d'entrants de ces localités, tirés des mouvements passés. Si toutefois, il était impossible d'envoyer des ménages migrants dans une localité (parce que celle-ci aurait atteint sa capacité), les ménages en surplus et les populations qui les composent, seront envoyés vers une localité présentant des caractéristiques semblables à celles de la localité de destination initialement prévue. La façon d'identifier la similitude des zones entre elles est basée sur un indice composé de plusieurs caractéristiques, tel que montré dans le tableau suivant.

Composition de l'indice de similarité

Type ⁹	Nom	Description (nombre de catégories)
Provenance et structure d'âge des migrants		
A	mig_prov	Répartition des migrants et des mobiles non-migrants selon leur SDR, leur DR ou leur province ou RMR de résidence, ou leur statut de mobilité pour les migrants externes
A	mig_age	Migrants de 5 ans et plus selon le groupe d'âge quinquennal (18) et le sexe (2)
Revenu moyen et distribution des ménages par revenus		
B	rev_moyen	Revenu moyen des ménages \$
A	rev_distri	Ménages selon la tranche de revenus (11) (Moins de 10 000 \$ à 100 000 \$ et plus).
Types, coûts et modes d'occupation des logements		
A	log_type	Logements occupés selon le type de construction (8)
A	log_tenure	Ménages selon le mode d'occupation des logements (2)
B	log_cout	Loyer brut moyen ou principales dépenses de propriété moyennes \$ (2)
A	dep_30pc	Pourcentage des ménages (locataires ou propriétaires) consacrant 30% ou plus de leurs revenus aux coûts d'habitation (2)
Langue maternelle, minorité visible et population autochtone		
A	langue	Population selon la langue maternelle (4)
A	minor_vis	Population selon l'appartenance à une minorité visible ou le statut d'autochtone (3)
Desserte du transport en commun		
C	tc	Niveau de desserte du transport en commun
Lieux de travail		
A	ldt	Répartition des actifs occupés selon la SDR ou le quartier du lieu de travail (1316)
Temps de trajet entre les localités		
D	temps	Temps de trajet entre chaque paire de localités calculé selon les distances itinéraires sur le réseau supérieur pour des conditions optimales

La précision des projections démographiques sera grandement améliorée au cours des prochaines années, car le nombre de zones utilisé augmentera en faisant passer la population par zone d'en moyenne 22 680 à 4 152. De plus, ce découpage plus fin permettra de réduire la sous-évaluation de l'utilisation du transport en commun pouvant subvenir lorsque l'on traite les déplacements à partir d'un centroïde plutôt qu'une localisation ponctuelle.

Hypothèse sur le type d'activités des personnes

Le **statut** est un indicateur qui définit l'occupation principale d'une personne. L'indicateur de statut est construit à partir des informations relatives aux déplacements effectués par l'individu au cours de la journée d'enquête et de l'occupation principale déclarée.

Le statut d'une personne est déterminé en comparant la durée des différentes activités (définies par les motifs de déplacement et leur heure de début) qu'elle a effectuées au cours de la journée. Le statut est attribué de la façon suivante :

- « travailleur », si la personne a effectué dans la journée au moins un déplacement pour motif travail et aucun déplacement pour motif étude, ou si la durée d'activité associée au travail est plus longue que celle associée aux études ;

⁹ A = distribution; B = moyenne; C = indice; D = temps.

- « étudiant », si la personne a effectué dans la journée au moins un déplacement pour motif étude et aucun déplacement pour motif travail, ou si la durée d'activité associée aux études est plus longue que celle associée au travail;
- « autre mobile », si la personne a effectué au moins un déplacement, mais aucun pour motif travail ou étude;
- « non-mobile », si la personne n'a effectué aucun déplacement.

Le statut ou le type d'occupation (*Travailleur, Étudiant, Autre mobile et Non mobile*) influence le nombre et la nature des déplacements effectués par une personne. Par exemple, les besoins en mobilité d'une femme de 40 ans qui travaille seront très différents de ceux d'un homme retraité de 70 ans ou encore d'un jeune universitaire de 22 ans. Par le biais de l'évolution observée des indicateurs de statut déduits des données d'enquêtes O-D, il est possible de poser une hypothèse quant à leur évolution jusqu'à l'horizon 2031.

Cette hypothèse aura été très utile, au fil des 25 dernières années pour rendre compte de l'accession des femmes au marché du travail et bien que les taux de statut Travailleurs des femmes approchent de plus en plus ceux des hommes, il reste encore un écart suffisant pour poursuivre cette hypothèse de rattrapage et de partage du marché du travail.

Hypothèse sur la motorisation des personnes

L'indicateur de « **possession automobile** » consiste à identifier les personnes disposant d'un véhicule motorisé et d'un permis de conduire. Dans les récentes enquêtes O-D de Montréal (1998, 2003 et 2008), seul le nombre d'automobiles à la disposition du ménage est disponible; il faut remonter aussi loin que 1987 pour avoir la possession automobile individuelle déclarée dans l'enquête.

La possession automobile des personnes a donc été dérivée des informations relatives à l'utilisation « observée » de l'automobile comme conducteur. Ainsi, une concurrence s'exerce entre les individus d'un même ménage selon la durée d'utilisation de l'automobile comme conducteur (facteur prioritaire) et certaines caractéristiques telles l'âge et le sexe (lorsqu'aucun déplacement auto-conducteur n'est effectué par les membres d'un même ménage). Par exemple, pour un ménage de trois personnes possédant 2 voitures : si l'homme s'est rendu au travail en voiture (de 8h00 à 17h00), que la femme a utilisé une voiture de 19h00 à 21h00 pour ses loisirs et que le jeune adulte s'est rendu à ses cours à l'université en voiture lui aussi (de 10h00 à 16h00) il y aura attribution des véhicules au sein des individus du ménage selon la durée d'utilisation. Dans ce cas, l'homme et le jeune adulte seraient considérés comme étant motorisés alors que la femme ne le serait pas, compte tenu de la durée d'utilisation des véhicules, soit 9 heures pour l'homme, 6 heures pour le jeune adulte et 2 heures pour la femme.

La motorisation est un phénomène qui va traditionnellement de pair avec une certaine aisance financière. L'accession des femmes au marché du travail n'a donc pas été sans conséquences sur la motorisation sans cesse croissante des ménages (et des individus) au cours des dernières années. Le fait de disposer d'un deuxième salaire au sein du ménage s'est traduit, dans bien des cas, par l'achat d'une seconde voiture, d'autant plus que les besoins de mobilité des ménages sont accrus aussi par la complexification des rythmes urbains.

Hypothèse d'« effet-année » sur les modes

L'hypothèse d'« effet-année » sur les modes est nouvellement introduite en 2008 en raison du changement structurel de répartition modale qui semble se dessiner depuis l'enquête origine-destination de 2003. À travers quinze modèles de régression logistique, il s'agit de déterminer si, à caractéristiques identiques (concernant la personne, le ménage, le déplacement et la chaîne de déplacements), les individus font un choix modal différent en 2003 et en 2008.

	Variables indépendantes
Personne	Âge, sexe.
Ménage	Présence d'enfants, disponibilité d'une auto, vivre seul.
Déplacement	Distance réseau en congestion ¹⁰ , moment de la journée, régions d'origine et de destination.
Chaîne de déplacements	Chaîne complexe, motif principal de la chaîne.
Année d'enquête	Année.

Aux fins de ce modèle, uniquement les parts modales des déplacements effectués en automobile seulement, en transport en commun seulement ou en transport actif seulement (marche ou vélo) sont appelées à changer. Le modèle a été testé pour les déplacements bimodaux mais n'était pas statistiquement significatif. Il y a donc un modèle de régression logistique pour la combinaison de chacun des trois modes et de chacun des cinq motifs agrégés de déplacement suivants : travail, étude, loisirs et visites, magasinage, et autre.

Chaque fois, la probabilité d'utiliser un mode donné pour un déplacement à motif donné est prédite, une opération qui est effectuée pour l'ensemble de l'enquête O-D 2008. Ensuite, les probabilités sont prédites à nouveau pour l'enquête O-D 2008 en ayant toutefois changé la valeur de la variable binaire « année » pour qu'elle soit égale à 0, c'est-à-dire comme si ce déplacement avait été effectué en 2003.

$$EA_{\text{annuel}} = \frac{P_{i,j,2008} - P_{i,j,2003}}{P_{i,j,2003}} / 5 \text{ ans}$$

L'« effet-année » annualisé est donc égal au cinquième (cinq ans se sont écoulés entre 2003 et 2008) de la différence entre la probabilité que le déplacement *i* soit effectué avec le mode *j* en 2008 et la probabilité que ce même déplacement *i* ait été effectué avec le mode *j* s'il avait été fait en 2003, cette différence divisée par cette dernière probabilité. Cette façon de calculer fait en sorte qu'un déplacement *i* qui avait peu de chances de se faire par le mode *j* en 2003 et qui est par exemple 2 % plus probable en 2008 se fera attribuer un « effet-année » plus grand qu'un déplacement *i* qui avait de fortes chances de se faire par le mode *j* en 2003 et qui est aussi 2 % plus probable en 2008. Si $P_{i,j,2008} < P_{i,j,2003}$, EA_{annuel} sera négatif. Une fois que les

¹⁰ Le temps de déplacement n'a pas pu être inclus. En effet, le MOTREM08 (pour les déplacements automobiles en 2008) n'était pas achevé au moment de faire le modèle d'« effet-année » et il était impossible d'obtenir des temps en transport en commun comparables pour 2003 et 2008.

« effets-année » annualisés sont calculés, il faut calculer les « effets-année » spécifiques à chaque horizon de prévision de la demande en transport.

$$\begin{aligned} \text{En 2009, } EA_{09} &= 1 + EA_{\text{annuel}} \\ \text{En 2010, } EA_{10} &= EA_{09} + \left(\frac{22}{23}\right) \times EA_{\text{annuel}} \\ &\dots \\ \text{En 2031, } EA_{31} &= EA_{30} + \left(\frac{1}{23}\right) \times EA_{\text{annuel}} \end{aligned}$$

Il s'agit donc d'ajouter 1 à l'« effet-année » annualisé pour obtenir l'« effet-année » de 2009. Pour 2010, on reprend l'« effet-année » de 2009 et on y ajoute 22/23 de l'« effet-année » annualisé. On continue de cette façon jusqu'en 2031 en ajoutant chaque année 1/23 de moins de l'« effet-année » annualisé à l'« effet-année » de l'année précédente. Ainsi, à mesure que l'on s'éloigne de l'année de référence, l'« effet-année » perd en intensité. C'est une façon de rester conservateur par rapport aux horizons plus éloignés d'aujourd'hui. Les « effets-année » spécifiques à chaque horizon de prévision multiplient ensuite le facteur d'expansion de la personne. Ainsi, les « effets-année » inférieurs à 1 feront diminuer le poids d'un déplacement dans l'enquête projetée pour 2031, tandis que les « effets-année » supérieurs à 1 feront augmenter le poids d'un déplacement dans l'enquête projetée pour 2031. Pour les déplacements dont le mode n'est pas automobile seulement, transport en commun seulement ou transport actif seulement, l'« effet-année » est égal à 1 pour chaque horizon de prévision, de sorte que le poids du déplacement est constant à travers le temps.

L'impact global de l'utilisation d'un « effet-année » est une diminution de la part modale de l'automobile seule qui correspond à une augmentation de la part modale du transport en commun seul. La part modale du transport actif pouvait varier, mais l'« effet-année » étant de façon générale pratiquement nul pour ce mode, la part modale ne varie que marginalement.

L'« effet-année » représente ce qui a changé entre 2003 et 2008 mais qui n'est pas inclus dans les variables indépendantes. Dans le modèle, la variable croisée entre l'année et le nombre d'automobiles par permis de conduire dans un ménage (valeur entre 0 et 1, puisque plus d'une automobile par permis de conduire n'augmente pas la mobilité) est négative. Cela signifie que d'avoir une automobile à sa disposition a moins d'impact sur le choix modal en 2008 qu'en 2003. Certes, avoir une automobile disponible favorise toujours le mode automobile seulement, mais dans une moindre mesure en 2008 qu'en 2003. Les autres explications possibles ne correspondent pas à des variables du modèle. Il pourrait s'agir d'une augmentation de la congestion, d'une amélioration de l'offre de transport en commun ou d'une perception plus positive du transport en commun de la part des individus.

Hypothèse de distribution des déplacements dont le motif est le travail

La dernière hypothèse considérée dans le modèle de prévision de la demande en transport est celle de la redistribution des emplois dans la région. Contrairement aux quatre autres hypothèses, il ne s'agit pas d'une simple factorisation du facteur d'expansion. Le facteur d'expansion de chaque déplacement à motif travail est altéré en fonction de l'équilibrage du vecteur de destination des déplacements travail, via un algorithme de type FURNESS. Le nombre de déplacements effectués pour motif travail n'est pas décidé à cette étape-ci, mais bien à partir de toutes les étapes précédentes. Effectivement, le volume de déplacements

émane de l'évolution de la démographie et des statuts d'activité essentiellement. Lors de l'étape de redistribution des déplacements travail, le volume reste le même qu'à l'étape précédente, seule la répartition des destinations change.

Pour procéder à une redistribution des destinations des déplacements motivés par le travail dans le modèle, on cherche à obtenir un vecteur de destinations pour chaque horizon de projection, selon le découpage territorial souhaité. Jusqu'à l'ancien exercice de prévision, ce vecteur était obtenu par l'observation de l'évolution des destinations à motif travail dans les enquêtes O-D. On établissait ainsi une tendance de l'attraction des secteurs pour les déplacements à motif travail, tendance qu'on projetait tout en atténuant l'effet, plus on s'éloignait de l'année de référence. Le constat était simple, les secteurs de la périphérie gagnaient en attraction au détriment des secteurs centraux.

Bien que le nombre de déplacements pour motif travail se destinant à un secteur soit en très forte corrélation avec le nombre d'emplois du secteur, la simple poursuite des tendances observées au fil des enquêtes à ce chapitre n'offre pas une explication aussi solide qu'un modèle de prévision d'emplois comme tel. C'est pour cette raison que dans le plus récent exercice de prévision de la demande, il a été décidé d'appuyer l'hypothèse de redistribution sur une prévision de l'emploi dans la région.

La prévision d'emploi sur laquelle s'appuie l'hypothèse de redistribution des déplacements

La méthode s'appuie sur des données d'emploi de Statistique Canada de 1996, 2001 et 2006, rendues comparables quant à la classification industrielle (effectivement, le système de classification a changé durant cette période, passant du système CTI à SCIAN). Les changements de système de classification créent des brisures dans les séries chronologiques. Afin de préserver la continuité de ces séries, il fut nécessaire de convertir les estimations historiques obtenues sous l'ancien système en estimations SIC selon la classification SCIAN.

Sachant que les emplois de services de proximité n'ont pas le même schème de localisation que les emplois de fabrication ou de tertiaire supérieur, la prévision d'emploi proposé par le MTQ comporte deux méthodes, l'une pour les emplois dans les services de proximité et l'une pour les autres types d'emploi.

Méthode analyse structurale (shift-share) pour les emplois de type industriels

Depuis sa création par Dunn (1959), l'analyse shift-share a donné lieu à de nombreuses applications pour décomposer la croissance de l'emploi. D'application simple, elle considère la croissance d'un agrégat régional donné et la décompose en un effet national et structurel (facteurs exogènes) et en un effet de dynamisme régional (facteurs régionaux). Cette seconde composante, résiduelle, regroupe l'ensemble des facteurs autres que la structure d'activités. Il peut s'agir de facteurs endogènes à la région, tels qu'un manque de dynamisme entrepreneurial ou encore un manque d'attractivité de la région pour les investissements étrangers.

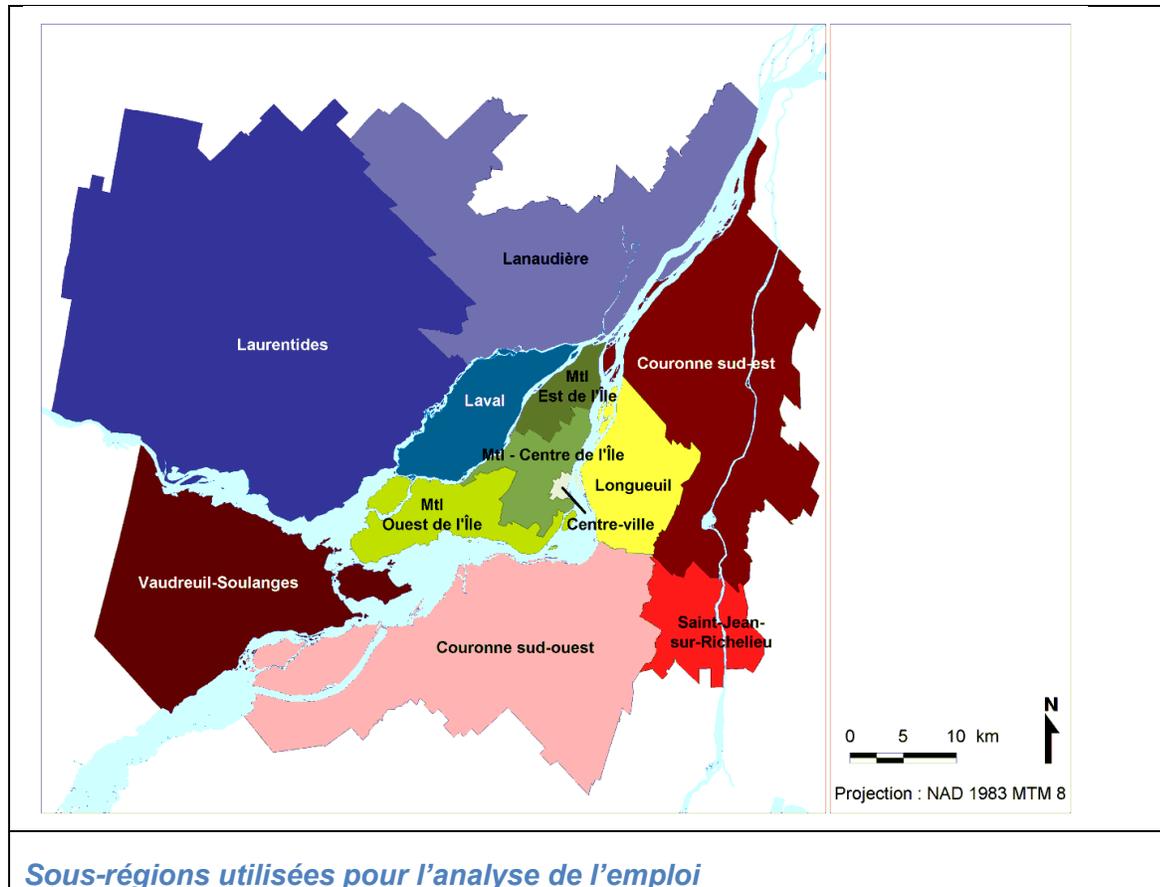
La méthodologie shift-share est une technique essentiellement descriptive, qui repose sur une égalité comptable. La composition industrielle impute une partie de la variation totale de l'emploi (pour la période 1996-2006) à la qualité qu'ont les industries de la sous-région en question d'être à forte croissance (ou le contraire). L'effet des conditions régionales est mesuré en

comparant le pourcentage de croissance (ou décroissance) de l'emploi dans une sous-région donnée pour une industrie donnée (8 regroupements industriels sont utilisés), durant la période 1996-2006, au taux de croissance de cette même industrie dans l'ensemble du territoire

Méthode pour les emplois de services de proximité

À la différence des autres secteurs industriels, celui des services de proximité est exclu de l'analyse structurale-régionale. En effet, la croissance d'emplois dans cette industrie dépend moins de la capacité d'une sous-région à générer des conditions favorables à l'emploi en général que de la croissance démographique de cette sous-région. Au-delà des centres commerciaux locaux, les services de proximité ont peu d'économies d'agglomération à réaliser. Pour ces raisons, on calcule le ratio d'emplois dans les services de proximité par rapport à la population de chacune des douze sous-régions utilisées pour l'analyse de l'emploi. Calculer des ratios différents par sous-région permet de tenir compte des caractéristiques propres à chacune comme le degré d'urbanisation ou le type de commerces. Ce ratio est ensuite reporté à la population attendue en 2031 pour connaître le nombre d'emplois de proximité en 2031. Dans toutes les sous-régions, il y a entre 10 et 16 emplois de proximité pour 100 résidents, à l'exception du centre-ville où c'est 84 emplois pour 100 résidents. Le ratio plus élevé du centre-ville peut s'expliquer par le fait que les services de proximité qui s'y retrouvent répondent aussi aux besoins des travailleurs, des étudiants ou des touristes.

Pour terminer, les emplois issus des deux méthodes sont combinées pour obtenir l'emploi total prévu par secteur pour les différents horizons de projection. De ces résultats, est tiré un vecteur représentant les parts relatives d'attraction de chaque secteur par rapport à l'ensemble de la région, et ce pour chaque horizon de projection de 5 ans. C'est ce vecteur qui est pris en compte dans le modèle de prévision de la demande.



Avantages du modèle de prévision de la demande en transport

- La méthode prend en compte des phénomènes incontournables et fortement significatifs, des tendances lourdes qui sont observées depuis plusieurs quinquennats et qui expliquent le portrait de la mobilité tel qu'on la connaît. Effectivement, le vieillissement de la population, l'étalement urbain, l'accession des femmes au marché du travail, la motorisation croissante, l'évolution des pôles d'emploi sur le territoire et plus récemment, l'engouement pour le transport en commun, sont autant de phénomènes qui sont examinés, évalués et projetés (avec les atténuations qui s'imposent) dans le scénario tendanciel.
- Le fait de développer, dans un premier temps, un scénario tendanciel, permet d'apprécier l'ampleur des changements futurs pouvant être attribués aux tendances lourdes, c'est le scénario du laisser-aller, l'absence de subjectivité.
- L'approche est globale : elle couvre toute la région, tous les déplacements (modes et motifs) et les interrelations décrites dans l'enquête O-D sont conservées.
- L'approche est cohérente : les déplacements sont générés par des personnes (pas de génération spontanée) et l'attrait croissant d'un générateur se fait nécessairement au détriment d'un autre.
- La méthode permet une grande compréhension et transparence des impacts de chacune des hypothèses sur le portrait futur de la mobilité, effectivement, on peut toujours revenir mesurer l'impact produit par une hypothèse sur les volumes de déplacements, leur répartition sur le territoire, les effectifs de population qui y contribuent, etc. On est ici très loin du principe de la boîte noire puisque chaque segment du modèle de prévision de la demande peut être décortiqué.

Limites du modèle de prévision de la demande en transport

- Le scénario tendanciel devrait idéalement être accompagné d'un scénario contrasté, la méthode permet de faire le scénario souhaité, la limite évoquée ici se situe à un niveau différent, qui dépend bien plus des approches de planification retenues que des outils utilisés. Effectivement, lorsqu'au bout du processus, les résultats issus de la modélisation sont utilisés par des départements de planification, conception et réalisation de projets, ces derniers s'attendent à fonctionner avec un seul ensemble de données prévisionnelles et non pas avec une fourchette de scénarios. À cet égard, un second scénario plus «réaliste» ou «réalisable» ou «souhaitable» pourrait être élaboré mais un pied serait alors mis dans la subjectivité pour arrêter certains choix concernant la projection des hypothèses.
- Le fait de travailler directement avec l'enquête O-D, donc, avec des données affublées d'un facteur d'expansion, cause problème lors d'analyses totalement désagrégées. Le facteur d'expansion moyen étant déjà de 25 dans l'enquête O-D de 2008 et pouvant aller même au-delà de 100 dans certains cas, il peut se retrouver à des niveaux encore plus élevés à la fin du processus de prévision, surtout pour des groupes d'âge dont la croissance est forte. Ça nous amène à devoir organiser les données différemment lors d'analyse de projet de transports en commun, entre autres, afin d'éviter qu'un seul individu gonfle à lui seul l'achalandage spécifique sur une éventuelle desserte TC.
- Le fait de travailler avec l'enquête O-D introduit une limite de couverture du territoire, en effet, si des populations ou emplois sont prévus éventuellement dans des secteurs peu ou pas développés au moment de la tenue de l'enquête, nous ne disposerons pas d'échantillon de ménages, population, emplois pour ce secteur. Habituellement, pour remédier à ce problème, il s'agit de développer des procédures d'ensemencement pour ces cas spécifiques. Idéalement, il serait souhaitable d'étendre la procédure d'ensemencement à l'ensemble de la région et pas seulement pour des projets spécifiques.

Développements souhaités à court/moyen termes

- Le modèle de prévision de la demande en transport fonctionne à comportements constants, c'est-à-dire qu'on reprend les comportements de mobilité/transport exprimés par l'enquête O-D et ce sont les effectifs qui évoluent, non pas les comportements. Des analyses plus poussées de type Age-Période-Cohorte permettraient de bonifier les hypothèses qui alimentent le modèle et permettre de projeter aussi des évolutions comportementales.

Annexe 2 : Pratiques actuelles, avantages et limites de la modélisation routière au Service de la modélisation des systèmes de transport (SMST)¹¹

La pratique actuelle de modélisation routière régionale porte sur le développement et l'usage du MOTREM08 (MOdèle de Transport de la RÉgion de Montréal, pour l'année de base 2008).

Le MOTREM08 utilise comme simulateur la plateforme logicielle *emme* (« Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium »), produit par la firme INRO¹² de Montréal. Il s'agit d'une plateforme-logicielle qui permet l'affectation d'une demande statique (par exemple la demande totale d'une période de 3 heures) sur les liens d'un réseau qui relie les origines aux destinations (O-D). Les véhicules sont affectés de façon séquentielle par classe de véhicules (par exemple autos, camions, etc.) sur une base horaire sur des chemins qui relient chaque origine à chaque destination, de telle sorte que pour chaque paire O-D, les temps sur les chemins utilisés sont les mêmes, d'où l'équilibre. La plateforme-logicielle est développée sous deux composantes interdépendantes, la modélisation de la représentation du réseau routier, ainsi que la modélisation de la demande véhiculaire de transport.

Le MOTREM08 permet l'analyse de l'impact d'un changement de l'offre de transport (par exemple l'ajout d'un échangeur) sur l'ensemble du réseau régional, également l'analyse de l'impact d'une variation de la demande de transport (par exemple l'implantation d'un nouveau complexe immobilier de haute densité), ou habituellement les deux à la fois dans des conditions de congestion normale.

Modèle de représentation du réseau routier, l'offre de transport (MOTREM08)

Les liens du réseau routier sont hiérarchisés en 24 types de route, par exemples autoroutes, collectrices, rue locale, etc. À chacun des types de route est attribuée la courbe volume/délai qui correspond à l'infrastructure, parmi 24 courbes prédéfinies. Il y a aussi 3 types de connecteurs reliant les centroïdes au réseau routier codifié, chacun ayant une fonction volume/délai attribuée. Ces courbes établissent une relation entre un débit de circulation exprimé en autos-équivalent et un temps de parcours conséquent. À chaque débit affecté sur un lien correspond un temps de parcours. Les résultats standards d'une simulation sont alors, pour une heure donnée, un débit par classe de véhicule, et un temps de parcours sur chacun des liens.

La période couverte par le MOTREM08 est de 24 heures, représentative d'un jour ouvrable moyen d'automne, ce qui nécessite 24 simulations routière horaires. Conséquemment 3 représentations de réseaux routiers sont modélisées puisque l'offre de transport est variable

¹¹ Cette partie a été envoyée par Pierre Fournier à Zachary Patterson le 17 février 2012 sous le titre « Pratiques actuelles, avantages et limites de la modélisation routière au Service de la modélisation des systèmes de transport (SMST) ». Le nom du fichier était « Pratiques_actuelles_avantages_et_limites de la modélisation routière au SMST.doc ».

¹² www.inro.ca

dans le temps¹³, une pour la période de pointe du matin, une pour la période de pointe du soir, et une dernière pour le reste de la journée (nuit et hors-pointe de jour et de soir).

Le territoire couvert est celui de l'enquête origine-destination réalisée pendant l'automne 2008¹⁴. Le réseau est codifié à l'aide d'une géobase routière et déborde le territoire de l'enquête origine-destination. Les informations importantes concernant les liens sont la longueur, les modes de transport permis, le nombre de voies ainsi que la courbe volume-délai associée, et la prise en compte du réseau de camionnage.

La codification du réseau routier correspondant à l'année de l'enquête ainsi que la demande véhiculaire y découlant est appelé le scénario de base. Par ailleurs, un scénario de référence correspond à une représentation du réseau à un horizon futur donné ainsi qu'à la demande prévisionnelle s'y rattachant. La représentation du réseau routier à un horizon donné est différente du réseau de base puisqu'il inclut d'une part les modifications à apporter à la représentation du réseau (exemple nouvelle géométrie de voies), et d'autre part, un ou plusieurs projets routiers planifiés et programmés.

Modélisation de la demande véhiculaire (MOTREM08)

La demande matricielle modélisée se divise en quatre classes, chacune nécessitant des traitements spécifiques:

1. Déplacements horaires des véhicules légers pour motif privé
Déplacements des autos-conducteurs des résidents du territoire d'enquête;
Déplacements des autos des non-résidents pour lesquels l'une (interne-externe, ou externe-interne) ou les deux extrémités sont à l'extérieur du territoire (en transit, externe-externe);
2. Déplacements horaires des véhicules légers pour motif commercial
3. Déplacements horaires des camions porteurs
4. Déplacements horaires des camions remorques

Pour une première fois par rapport aux versions antérieures du MOTREM, la demande véhiculaire est modélisée sur une base horaire plutôt que sur une période de 3 heures (périodes de pointe, AM ou PM). Les déplacements horaires permettront maintenant la simulation véhiculaire pour toutes les combinaisons possibles de périodes d'une journée.

La demande véhiculaire est modélisée en considérant les classes suivantes de véhicule: les véhicules légers privés¹⁵, les véhicules légers commerciaux, les camions porteurs¹⁶ aussi appelé camion régulier, et les camions remorques, aussi appelé camions lourds. À l'intérieur du territoire les déplacements de camions sont modélisés sur la base des activités 24 heures, alors qu'à l'externe, les déplacements de camions sont modélisés en fonction des entrants/sortants en périphérie du territoire.

¹³ Par exemple un nombre de voies différents selon les heures d'opération des voies réservées aux autobus, ou de la gestion des espaces de stationnement en rive sur les artères.

¹⁴ Cet aspect est couvert en détail par une autre section de ce document.

¹⁵ Les déplacements auto-conducteur de l'enquête O-D et les déplacements des non-résidents sur le territoire d'enquête (auto-conducteur exogènes).

¹⁶ Les déplacements à l'intérieur du territoire et les déplacements exogènes sur le territoire.

Les traitements sont effectués de manière différenciée selon que les véhicules soient légers (privés et commerciaux), des camions porteurs ou remorques. La nature des comptages conditionne l'approche utilisée. En effet, les comptages classifiés ne permettent pas de différencier les véhicules légers qui sont privés de ceux qui sont commerciaux. Il a donc été convenu d'établir que les véhicules dits commerciaux peuvent être estimés comme étant la différence entre l'ensemble des comptages de véhicules légers et la quantité de véhicules légers privés provenant de l'enquête O-D.

Par ailleurs les comptages non-classifiés plus nombreux permettent de vérifier le nombre total de véhicules passant à un endroit donné, alors que les comptages effectués sur 24 heures permettent d'obtenir une distribution horaire des véhicules.

Scénario de base

La modélisation de la demande véhiculaire est alimentée par les matrices horaires de déplacements « auto-conducteur » (véhicule léger privé) de l'enquête O-D 2008, par les matrices horaires des véhicules commerciaux provenant du modèle activités véhiculaires 24 heures pour 2008 (véhicules légers commerciaux, porteurs et remorques), ainsi que les comptages de circulation.

À l'intérieur du territoire un ajustement de matrices originales horaires est effectué sur les comptages en fonction de 3 classes de véhicules (légers, camions porteurs et camions remorques). Cependant pour les déplacements exogènes (auto-conducteur non-résidents du territoire d'enquête), une distribution estimative horaire du nombre de véhicules est effectuée, de ou vers la périphérie du territoire (sur la base des comptages disponibles en 2 classes de véhicules : légers privés et légers commerciaux).

Les zones d'échantillonnage de l'enquête O-D sont subdivisées en Zones d'Analyse Transport (ZAT) afin de considérer de manière plus précise l'accessibilité aux réseaux routier et autoroutier ainsi que l'utilisation du sol. Il s'agit donc d'un système de zones adapté au transport. À chaque zone est associé un centroïde.

Le système des centroïdes est constitué de 4 types, pour un total de 1767 :

- les zones à l'interne du territoire, provenant de l'enquête O-D, il y en a 1631;
- les jonctions, qui représentent les lieux qui permettent de passer par exemple du transport en commun au mode automobile privé (par exemple une gare), ou l'inverse, il y en a 59;
- les centroïdes externes, qui sont associés aux déplacements de l'enquête dont l'origine et/ou la destination sont à l'extérieur du territoire d'enquête, mais dont le lieu de résidence est localisé sur ce même territoire, il y en a 36;
- les centroïdes exogènes sont associés aux déplacements entrant/sortant du territoire par des non-résidents, il y en a 41.

Les matrices auto-conducteur de l'enquête O-D 2008 (qui est rappelons-le un échantillon expansionné) sont d'abord simulées à l'équilibre afin de comparer les volumes simulés aux

comptages de véhicules légers internes au territoire. Un ajustement est ensuite effectué sur les véhicules légers commerciaux afin que la somme des véhicules légers privés (issus de l'enquête) additionnés aux véhicules légers commerciaux (issus d'une modélisation adaptée¹⁷) corresponde à l'ensemble des véhicules légers comptés aux différents endroits sur le territoire. Une distribution est effectuée pour les véhicules légers exogènes (différentiels entre les débits auto-conducteur exogènes et les comptages de véhicules légers périphériques au territoire).

Concernant les matrices horaires des camions porteurs et remorques interne au territoire d'enquête, elles sont construites sur la base des comptages internes au territoire et d'un modèle d'activités sur 24 heures alimenté par les emplois par secteurs d'activités industrielles de Statistiques Canada 2006 et par les données de population. 20 secteurs d'activité industrielle sont agrégés selon le SCIAN 1997¹⁸. L'origine des déplacements est établie à partir de la base d'immatriculation des véhicules commerciaux selon les données de la SAAQ, et des données de la CTQ. À partir des origines, les destinations sont attribuées en tenant compte d'une distribution des distances de déplacements tirées d'enquêtes antérieures sur le camionnage. Le concept de tournée des véhicules commerciaux est utilisé pour distribuer les déplacements en trois parties, en prenant en compte les heures : le premier déplacement se fait de la base vers un générateur, puis les déplacements intermédiaires (générateur à générateur), et finalement, du dernier générateur vers la base.

Un algorithme heuristique de balancement unitaire (obtention ainsi de valeurs entières du nombre de véhicule, et non de valeurs décimales du nombre de véhicules à la fin des calculs) de matrices permet une répartition des déplacements selon la distance routière à partir d'anciennes enquêtes sur les camions et à partir des matrices de déplacements autos pour motif travail de l'enquête de telle sorte que les paires O-D affectées ont un nombre entier de véhicules.

Une linéarisation des volumes simulés originaux (soit avant un calage sur les comptages) des véhicules légers commerciaux est ensuite effectuée à partir des matrices originales afin d'obtenir une proportion constante de ces volumes par rapport aux comptages de véhicules légers (d'où la linéarisation).

Les véhicules commerciaux porteurs et remorques exogènes au territoire d'enquête sont modélisés différemment des véhicules autos. . La distribution sur le territoire de l'enquête O-D des camions exogènes en périphérie est effectuée sur la base des comptages horaires de véhicules lourds (comptages en périphérie) à l'aide du modèle d'activités 24h. Ce modèle distribue les camions sur le territoire sous contrainte de maintenir la somme sur les origines, la somme sur les destinations, ainsi que le respect d'une distribution des distances parcourues. Les origines sont issues des bases d'opération des camions tandis que les destinations (mise à part le retour à la base d'opération) sont issues des taux d'activités des secteurs (basés sur les

¹⁷ Un modèle d'activités véhiculaires commerciales sur 24 heures alimenté par les emplois par secteurs d'activités industrielles de Statistiques Canada 2006. 20 secteurs d'activité industrielle sont agrégés selon le SCIAN 1997 (Système de Classification des Industries de l'Amérique du Nord). L'origine des déplacements est établie à partir de la localisation des véhicules commerciaux selon les données de la SAAQ. À partir des origines, les destinations sont attribuées en tenant compte d'une distribution i des distances de déplacements issue de résultats d'anciennes enquêtes O-D sur les déplacements de camions.

¹⁸ <http://www.statcan.gc.ca/subjects-sujets/standard-norme/naics-scian/2007/list-liste-fra.htm>

emplois et la population). La répartition des camions porteurs et camions remorques exogènes est ensuite effectuée en fonction de taux de camions porteurs (par heure et par type de route) multiplié par la distribution des véhicules lourds (car seulement les comptages avec 2 classes (véhicules légers et véhicules lourds) sont disponibles en périphérie).

Le résultat final obtenu est la mise en place d'un modèle de demande véhiculaire, qui, pour une journée ouvrable typique d'automne sur une période de 24 heures, prend la forme de matrices O-D horaires pour chacune des classes de véhicule à l'année de base 2008. Ces résultats, pour lesquels des facteurs d'ajustement ou de factorisation (de manière horaire : demande prévisionnelle autos/demande 2008 autos) sont inclus, deviennent des intrants pour l'étape ultérieure qui consiste à établir une prévision des déplacements horaires par classe de véhicules aux horizons futurs de planification (2016, 2021, 2026, etc.).

Scénario de référence

La demande véhiculaire commerciale prévisionnelle

Les intrants pour la demande prévisionnelle commerciale à un horizon donné sont les suivants :

- la demande de véhicules légers commerciaux de 2008, et celle correspondante issue du modèle d'activités 24 heures pour l'horizon désiré;
- la demande de véhicules porteurs exogène provenant de l'année 2008, et celle correspondante issue du modèle d'activités 24 heures pour l'horizon désiré;
- la demande de véhicules remorques exogène provenant de l'année 2008, et celle correspondante issue du modèle d'activités 24 heures pour l'horizon désiré.

Le modèle d'estimation des activités véhiculaires commerciales 24 heures est établi à partir de deux ensembles de données, la localisation des véhicules commerciaux, ainsi que les activités des véhicules commerciaux par l'entremise du nombre d'emplois par secteur d'activité et de la population localisés. Une table des taux d'activités de véhicules commerciaux a été construite sur la base des catégories de véhicules par emploi et par secteur d'activité sur une base horaire. La localisation des véhicules provient de la flotte des transporteurs géolocalisés de la base de données de la Commission du Transport du Québec. Concernant les données d'emplois par lieu de travail et par secteur d'activité industrielle, elles proviennent de Statistiques Canada. 20 secteurs d'activités industrielles sont fondés sur la catégorisation SCIAN (Système de classification des industries de l'Amérique du Nord).

Comme pour les emplois, la population est une composante qui contribue à générer des déplacements de véhicules commerciaux, et est prise en compte dans le modèle. Le résultat est un nombre de déplacements générés par heure par secteur d'activité pour les trois types de véhicules (léger commerciaux, camions porteurs et camions remorques). Les zones transport (ZAT) qui couvrent le territoire sont catégorisées selon la typologie suivante : zone régulière, zone du centre-ville dense, et zone de transit. Au centre-ville, les emplois ne génèrent pas nécessairement beaucoup de déplacements de camion, alors qu'une zone qui couvre le Port de Montréal par exemple, n'a pas nécessairement beaucoup d'emploi par rapport au centre-ville,

mais génère beaucoup de déplacements de camion. Les taux d'activités sont donc ajustés afin de prendre en compte ces phénomènes.

Pour chaque zone transport, on calcule la flotte localisée pour chacun des trois types de véhicules commerciaux, le nombre d'emploi de chacun des 20 secteurs d'activité, ainsi que la population. Il s'agit ensuite d'appliquer les taux d'activités des véhicules commerciaux à ces emplois pour obtenir l'achalandage des véhicules commerciaux par heure comme origine ou destination de leurs déplacements dans la zone.

Pour chaque catégorie de véhicules, un vecteur sur la localisation de la flotte ainsi qu'un vecteur sur la génération des activités des véhicules permettent d'effectuer une distribution afin d'obtenir des matrices de déplacements par type de véhicules commerciaux.

Chaque distribution est la résultante d'un balancement matriciel sur trois dimensions : les totaux en origine, les totaux en destination, ainsi que le respect d'une répartition des déplacements selon la distance routière parcourue. Le résultat est une matrice par heure et par type de véhicules commerciaux pour un horizon donné.

Le traitement pour les classes camions porteurs et camions remorques

Pour les classes camions porteurs et camions remorques de nature exogène, un facteur d'évolution est appliqué entre l'année 2008 et l'année de horizon désiré. L'application du facteur permet de calculer la demande projetée à l'horizon désiré.

Relativement à ces mêmes classes, mais pour les déplacements internes, une autre factorisation est appliquée afin d'obtenir la demande à l'horizon désiré.

La demande exogène est ensuite additionnée¹⁹ à la demande interne afin d'obtenir par classe des matrices horaires à l'horizon désiré.

Le traitement pour la classe véhicules légers commerciaux

Une factorisation de la demande est effectuée à l'aide du modèle d'activités 24 heures à l'horizon désiré. Ce modèle a été expliqué précédemment.

La demande véhiculaire privée prévisionnelle

Celle-ci est établie en appliquant à la demande de l'année 2008 un facteur d'évolution provenant directement de notre modèle de prévision de déplacement à l'horizon désiré. La méthodologie de prévisions démographiques qui alimente le modèle relatif aux prévisions de déplacements des personnes dans la grande région de Montréal est expliqué dans le chapitre « Le modèle de prévision ».

Le résultat est une matrice horaire de déplacement des véhicules légers privés pour chacune des heures d'une journée.

¹⁹ Une opération de linéarisation est également effectuée afin d'obtenir cette demande future.

La calibration du modèle

L'attribut d'un type de route nommé fonction volume-délai est la première composante à être calibrée. Cette calibration est alimentée pour les liens sur lesquels à la fois des relevés de temps de parcours et de comptages sont disponibles. Les différents temps de parcours associés aux débits ou volumes correspondant permettent de calibrer chaque fonction volume-délai qui correspond à un type de route pour les paramètres suivants : le délai à l'écoulement libre ainsi que le délai à capacité, les deux exprimés en minutes/km.

Compte tenu que les relevés de temps de parcours sont effectués durant les périodes de pointe seulement, les compilations (temps ou vitesse versus volume) sont effectuées pour les heures suivantes : 6h, 7h, 8h, 9h, 15h, 16h, 17 et 18h pour 8 circuits de relevés.

L'objectif ici est de minimiser les écarts entre les délais simulés et les délais mesurés sur les circuits, pour des volumes simulés et des volumes observés sur le terrain.

Un autre résultat de simulation est comparé à des relevés observés, il s'agit des débits. Le modèle est calibré afin de minimiser les écarts entre les volumes simulés et les comptages observés, par heure et par classe de véhicule, à l'intérieur du territoire ainsi qu'en périphérie (entrées et sorties).

Concernant la procédure d'affectation des véhicules dans un scénario emme, les principales étapes suivantes s'appliquent :

- Simuler les véhicules légers (simulation à l'équilibre) (autos privés et véhicules légers commerciaux) sans aucun camion afin de composer les impédances pour la simulation des camions (***impédance = FacteurRéseauCamionnage * Temps de déplacement Auto***);
- Simuler les camions légers (porteurs) et lourds (remorques) (simulations tout-ou-rien pour les chemins les plus courts selon les impédances);
- Les débits de camions de l'étape précédente sont fixés sur les liens et pris en considération dans les fonctions volume/délai en volume équivalent auto pour la prochaine étape;
- Simuler à nouveau les véhicules légers (simulation à l'équilibre) en utilisant les débits de camions fixés sur les liens provenant de l'étape précédente.

La convergence vers l'équilibre des temps entre les chemins étant plus rapide selon le niveau de congestion, le nombre d'itérations varie selon la période de la journée afin de ne pas itérer inutilement. En conséquence les quantités utilisées sont les suivantes : de 0 à 5h : 10 itérations, de 5h à 6h, de 9h à 15h, et de 19h à 20h : 30 itérations, et pendant les périodes de pointes 6h à 9h et 15 à 19h : 100 itérations. Les temps de parcours simulés sont également comparés aux relevés effectués sur le réseau, et la calibration est effectuée afin de reproduire en simulation les temps de parcours mesurés sur le terrain de manière le plus fidèle possible.

Avantages de notre modélisation routière régionale

La modélisation routière régionale est conçue comme étant un système qui intègre la modélisation de l'offre de transport, celle de la demande, ainsi que l'intégration des prévisions de déplacements et la gestion des projets à venir à différents horizons.

Principales limites de notre modélisation routière régionale

Dans un premier temps il est important de mentionner que notre modélisation actuelle n'est pas conçue pour représenter de manière adéquate des conditions de circulation en hyper-congestion que vivent maintenant les usagers de la route. Une affectation des véhicules sur le réseau fournit le nombre de véhicules (de conducteurs) qui désire passer sur un tronçon routier donné, même si la capacité est dépassée pour un ou plusieurs tronçons qui composent ce même chemin. En réalité le nombre de véhicules passant à un endroit ne peut dépasser la capacité (nombre maximum de véhicules pouvant physiquement passer à un endroit donné pendant une période d'une heure). L'affectation des véhicules sur le réseau serait donc différente si l'on considère la limitation due aux capacités. Le MOTREM08 avec ses matrices horaires présente toutefois un bon compromis entre une affectation statique de la demande sur une période de 3 heures (MOTREM03) et une modélisation dynamique des conditions de circulation en utilisant des matrices de demande par période de 15 minutes.

Le SMST souhaite migrer cependant vers une approche dynamique de la modélisation des conditions de circulation (niveau mesoscopique), permettant d'obtenir des résultats représentatifs de manière plus réaliste des conditions de congestion et d'hyper-congestion.

Compte tenu que les temps de parcours sur les liens du réseau dépendent du nombre de véhicules qui y passe, un rapport volume/capacité supérieur à 1 amène donc un écart plus grand avec les valeurs mesurées sur le terrain. Le débit résultant représente le nombre de véhicules dont les conducteurs désirent passer à cet endroit, sans considérer ceux qui physiquement pourraient passer. Cependant en condition normale de circulation, donc sans congestion, la limitation ne s'applique pas.

La modélisation de la demande autre qu'« automobile privée » provenant des enquêtes O-D est l'une des limites que le SMST rencontre. En effet la demande pour les véhicules commerciaux, soit légers, camions porteurs ou camions remorques souffre d'un manque de données disponibles. Les comptages permettent d'estimer une distribution entre les véhicules porteurs et les camions remorques, mais ne permet pas de différencier les véhicules légers privés (par exemple les autos, camionnettes et mini fourgonnettes) des véhicules légers commerciaux (de compagnie, et souvent lettrés). Les paires O-D des déplacements de camions sont très mal connues. Le domaine du transport des marchandises est très compétitif et la cueillette d'information en souffre. Nos matrices de camions porteurs et remorques ne représentent peut-être pas bien ces déplacements (de nature non-récurrente) mais elles ont des propriétés intéressantes qui les rendent cohérentes avec les emplois et les activités économiques localisées sur le territoire.

Une autre limite de notre modélisation routière est qu'elle n'intègre pas de composante transport en commun. Bien que les deux composantes soient relativement indépendantes en ce qui concerne la demande véhiculaire, elles sont liées dans l'équilibre intermodal, donc au

niveau des déplacements des personnes. Pour cet aspect au niveau du transport en commun, le SMST utilise la plateforme logicielle appelée MADITUC²⁰. Les résultats de chaque plateforme (par exemple des temps de parcours) peuvent toutefois être combinés mais sont compilés indépendamment.

Développement en cours au SMST

Deux des limites de l'approche macroscopique (MOTREM08 sous *emme*) pourraient être éliminées en adoptant une approche mesoscopique de simulation régionale.

La première est la prise en compte de la congestion de manière dynamique dans le temps, par rapport à une approche statique. La demande découpée en tranche d'une heure comme dans le MOTREM08, pourra éventuellement être découpée sur une période plus courte (par exemple de périodes de 15 minutes) afin de modéliser de manière plus réaliste l'injection des véhicules sur le réseau. Compte tenu que les données des enquêtes origine-destination ne sont pas si précises, cela laisse croire qu'une nouvelle méthode de cueillette de l'information mieux adaptée pourrait être nécessaire.

Concernant la deuxième limite, les résultats d'affectation (choix de chemins et temps de parcours) par paire O-D seront plus réalistes puisque, par rapport au MOTREM, la capacité routière sous AIMSUN ne peut être dépassée²¹.

Le réseau MOTREM08 a été importé sur la plateforme logicielle AIMSUN²² développée et distribuée par TSS²³ de Catalogne. Cette plateforme logicielle permet une modélisation à 3 niveaux, soit macroscopique (échelle régionale), mesoscopique (échelle régionale et sous-régionale), ainsi que microscopique (échelle locale : échangeur, corridor, etc.). La dernière version disponible permet des simulations hybrides, c'est-à-dire de simuler à la fois le réseau d'une région en mode mesoscopique, et simultanément une partie de réseau de cette même région en mode microscopique, pour plus de précision.

Une équipe du SMST valide actuellement la codification du réseau du MOTREM08 importée dans l'environnement AIMSUN, qui commande plus de précision au niveau de la géométrie, et prend en considération les feux de circulation, les panneaux d'arrêt, et le marquage au sol (séparateur de voie) de manière explicite, par rapport à la codification dans le MOTREM.

²⁰ **Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires de Transport Urbain Collectif**, pour plus d'informations : <http://www.madituc.polymtl.ca/>

²¹ Sous le MOTREM, le rapport volume sur la capacité (V/C) peut largement dépasser une valeur de « 1 ». En effet le résultat d'une affectation indique les chemins ou itinéraires « désirés » par les usagers en tenant compte d'un équilibre des temps de parcours par paire O-D et par type de véhicule, et non nécessairement les lieux ou chemins par lesquels les véhicules passeraient en réalité, compte tenu que le volume dépasse la capacité, donc qu'il y a congestion.

²² Pour plus d'information le site suivant peut être consulté : Aimsum.com

²³ **T**ransportation **S**imulation **S**ystems

Annexe 3 : Pratiques actuelles, avantages et limites de la modélisation transport en commun au SMST²⁴

La pratique actuelle au SMST en ce qui a trait à la modélisation du transport en commun à Montréal est centrée d'abord sur le logiciel MADITUC et son interface MADIGAS, développés à l'École Polytechnique de Montréal.

MADITUC est utilisé pour l'affectation du transport en commun par toutes les autorités organisatrices de transport (AOT) à Montréal, notamment l'AMT, la STM, le RTL et la STL. Cet outil a la particularité d'être lié à la structure et au développement des enquêtes O-D à Montréal depuis 1987.

MADITUC est fondé sur le principe de l'analyse totalement désagrégée, c'est-à-dire que chaque observation tirée de l'enquête O-D est traitée de façon individuelle afin de conserver un maximum de l'information réelle sans la modifier. Cela permet notamment de s'affranchir d'un système de zones pour réaliser les simulations.

La modélisation du transport en commun au SMST est notamment utilisée pour décrire la situation observée lors d'une enquête O-D et pour répondre aux besoins de planification régionale. Ainsi, en ce qui concerne la reproduction de l'enquête origine-destination, on peut modéliser l'itinéraire déclaré de chaque usager de façon à produire un volume global de déplacements tout en conservant toutes les informations des personnes et des ménages. Il est aussi possible de simuler les choix d'itinéraire. La calibration de la simulation consiste à s'efforcer que les volumes globaux simulés reproduisent le mieux possible les volumes globaux produits par les itinéraires déclarés par les répondants dans l'enquête. Ensuite, dans le cas d'un projet de transport en commun de nature régionale, il est possible d'en estimer l'achalandage en simulant pour la demande TC des nouveaux itinéraires sur un réseau TC modifié qui inclut les projets pertinents.

Au niveau institutionnel, le rôle du SMST tend à être plus limité dans cet espace étant donné la présence de l'AMT et des différentes sociétés de transport, qui ont un mandat de planification de ces projets, et qui ont développés les capacités appropriées de modélisation du TC. Souvent, le rôle du SMST consiste à assurer un suivi méthodologique et à apporter un «input» sur les données et la modélisation routières à une table de discussion avec les sociétés de transport en lien avec un projet donné. Toutefois, en poursuivant dans la veine de la modélisation du transport en commun, le SMST peut permettre au MTQ de disposer de ses propres estimés pour valider ceux des promoteurs des projets de transport en commun et s'assurer de leur réalisme.

²⁴ Ce texte a été produit par des professionnels du SMST.

MADITUC

Fonctionnement de MADITUC

Extrait

du

site :

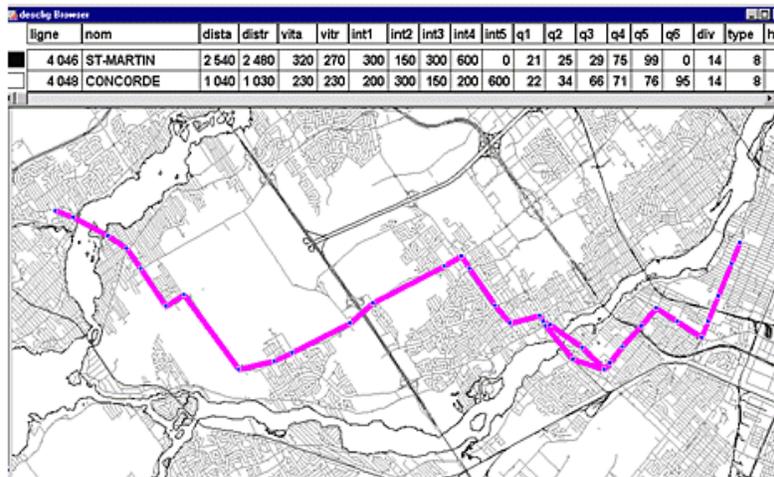
http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/recherche_innovation/modelisation_systemes_transport/modele_affectation_transport_commun

Comment modélise-t-on le réseau et la demande en matière de TC?

Afin de modéliser le réseau de transport en commun (TC), on codifie pour chaque ligne de chacun des modes de transport en commun de la région :

- le tracé, sous forme de liens (tronçons de ligne) et de nœuds (arrêts, points de passage) géolocalisés;
- les caractéristiques opérationnelles, c'est-à-dire les distances, les vitesses, les fréquences et les périodes d'exploitation du réseau durant la journée.

Représentation d'une ligne d'autobus codée sous MADITUC



Le modèle peut prendre en considération les changements de la vitesse le long d'un parcours (ex. : ligne avec tronçon express) et les différences de fréquences aux arrêts selon les périodes de la journée.

On affecte sur ce réseau codifié la demande en TC tirée des enquêtes O-D – l'origine, la destination, la période de la journée, le motif, etc. – ou la demande en TC dérivée des prévisions. Cette demande comprend tous les déplacements faits en entier ou en partie en transport en commun, soit la portion TC des déplacements bimodaux (auto et TC). À noter que, au SMST, la portion auto de ces déplacements, par exemple pour aller du domicile à un stationnement incitatif, sera traitée parallèlement dans les simulations routières.

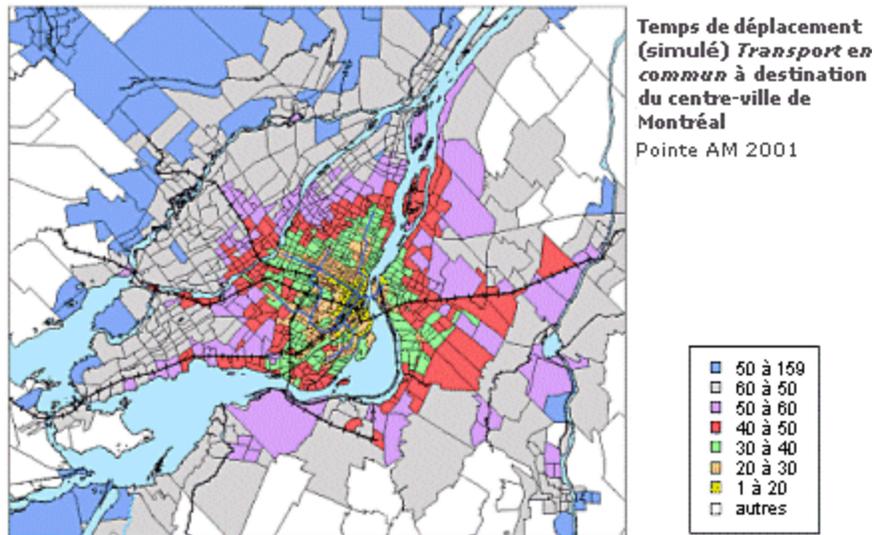
Analyse des itinéraires décrits dans un fichier d'enquête O-D (situation de référence)

Lors des enquêtes O-D, on insiste pour que les usagers du transport en commun décrivent précisément leur itinéraire, soit la séquence des lignes empruntées. En affectant cette demande

sur le réseau codifié, on s'assure ainsi d'obtenir des données détaillées permettant de tracer un portrait fidèle de la situation de référence « révélée » par l'enquête O-D.

Le modèle permet d'estimer les attributs de temps du déplacement – accès, attente, correspondance, en véhicule – et produit les statistiques opérationnelles et de consommation associées aux déplacements déclarés par les répondants. Ces compilations peuvent être faites par période de la journée ou pour la journée entière. Elles servent notamment à l'analyse de la consommation des services selon les différents modes et à l'évaluation des échanges intermodaux (ex. : trains de banlieue/autobus) et interinstitutionnels, etc.

Carte isochrone d'accès par transport en commun au centre-ville de Montréal



Simulation des déplacements associés à la mise en place de nouveaux services (situation projetée)

La simulation consiste à déterminer les itinéraires qui devraient être empruntés sur un réseau donné pour effectuer les déplacements. L'algorithme d'affectation recherche le chemin qui minimisera le temps généralisé du déplacement – sommation pondérée des composants temps d'accès, temps d'attente, temps passé en véhicule et autres pénalités liées à l'emprunt de plusieurs modes:

$$T_{\text{gén}} = \alpha T_{\text{acc}} + \beta T_{\text{att}} + T_{\text{véh}} + \text{Pénalités intermodales}$$

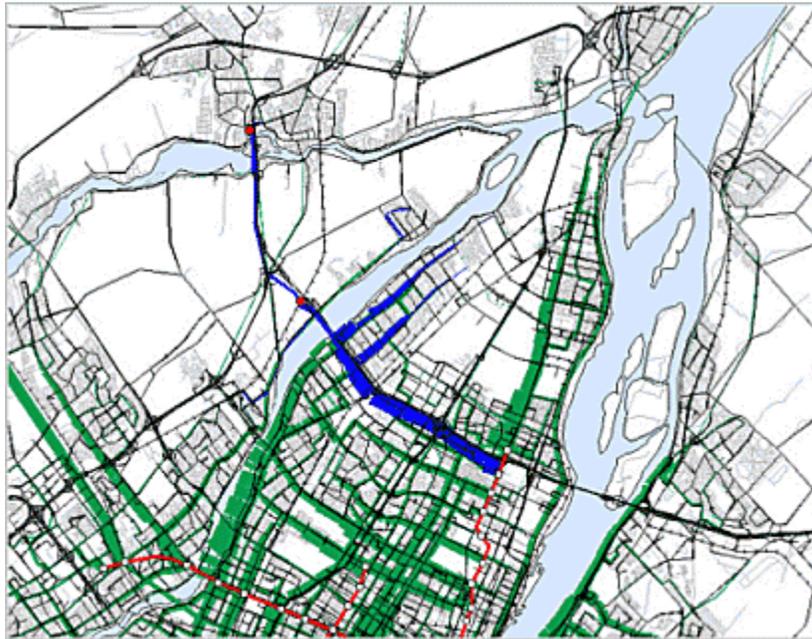
Le modèle associe des jeux de poids différents à chacun des modes pour refléter des attraits différenciés. Quant aux pénalités intermodales, elles servent notamment à tenir compte des structures tarifaires applicables lors de l'utilisation combinée de plusieurs modes.

Avant de traiter toute situation future, il faut toujours commencer par le calage du modèle. Pour ce faire, on procède à une simulation de la demande de référence, correspondant aux observations recueillies lors d'une enquête O-D, sur le réseau de TC contemporain à cette enquête. Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle afin que la situation simulée reproduise le mieux possible le comportement déclaré par les répondants de l'enquête O-D.

Une fois cette étape terminée, on peut codifier toute modification envisagée dans le réseau de TC et faire une simulation avec le modèle calibré. Habituellement, on affecte sur ce réseau la demande (période de pointe du matin) de l'horizon de mise en place du futur service.

Nombre d'usagers du réseau de transport par autobus

En bleu: nombre d'usagers utilisant la voie réservée projetée dans le corridor de l'autoroute 25



Avantages de MADITUC

Les caractéristiques requises pour une modélisation adéquate du TC dans un éventuel modèle urbain ne sont pas encore arrêtées : on peut toutefois supposer qu'on souhaitera la possibilité de traitements explicites de multiples facettes pour répondre à une variété de questions, la robustesse des principes, une possibilité d'intégration avec de multiples environnements, une aisance d'utilisation, etc.

Les avantages exprimés ci-dessous sont en fait des particularités de Madituc qui, selon notre compréhension actuelle, le rendent approprié à divers niveaux (méthodologique, opérationnel, etc.) dans un contexte de développement de l'environnement futur de modélisation du SMST.

- Tous les partenaires TC montréalais utilisent MADITUC. Cela crée un langage commun, favorisant ainsi les opportunités d'échanges méthodologiques et de données.
- La structure totalement désagrégée des données les rend déjà adaptées pour des applications de ce type (ex : modélisation-objet, microsimulation, ...).
- On est indépendant de tout type de découpage territorial en utilisant les coordonnées réelles.
- MADITUC évite les pertes d'information dues à l'agrégation zonale, toute l'information réelle de l'O-D est conservée, donc un déplacement est toujours associé à un ensemble de caractéristiques le concernant ou concernant spécifiquement la personne qui le fait et le ménage auquel elle appartient.

- Si l'usage direct de données O-D peut être discutable dans les cas de faible échantillon, la structure de MADITUC demeure adaptée pour des échantillons ou des représentations synthétiques de couverture exhaustive.
- Les fichiers de résultats et de travail de MADITUC sont des fichiers ouverts (dbf) pouvant être lus et modifiés, ce qui permet des analyses détaillées et des correctifs ciblés au besoin. En contrepartie, il faut savoir ce qu'on fait. Ces manipulations ne sont pas courantes et doivent être faites avec circonspection pour respecter la structure des fichiers.
- Les fichiers d'output graphiques sont de types .shp (ESRI) facilement lus par MapInfo.
- Pour la simulation des itinéraires, la structure pourrait permettre d'avoir des fonctions d'impédances variables selon les catégories d'usagers (ex : l'attrait différencié des accès à pied selon l'âge, l'attrait du train selon les territoires, etc.).

Limites de MADITUC

Les limites exprimées ci-dessous sont en fait des particularités de Madituc qui méritent d'être soulignées dans un contexte de réflexion sur le développement de l'environnement futur de modélisation du SMST.

- Madituc n'étant pas un produit commercial, il n'y a pas de service à la clientèle offrant divers produits standardisés comme des cours, des utilitaires, un service d'urgence. Tout cela est fait de manière ad hoc et informelle avec l'équipe de Polytechnique selon ses capacités.
- Il s'agit d'un environnement spécialisé. MADIGAS, l'interface pour les simulations de MADITUC, n'est pas spécialement user-friendly. On peut s'y retrouver après s'en être fait expliquer les principes et la logique. L'environnement n'est pas « fool-proof ». De même, en cas de plantage du logiciel, on ne connaît pas toujours les causes exactes et il faut être capable d'investiguer, parfois à tâtons.
- Dans sa version actuelle MADIGAS utilise Visual Foxpro. C'est un environnement dont la pérennité est limitée. Des modifications à l'environnement sont à prévoir par POLY mais on n'en connaît pas les détails.
- Les fichiers dbf produits par FOXPRO ne sont pas compatibles directement avec d'autres logiciels comme MapInfo, Excel ou SAS. En général ça se contourne aisément mais ça demeure un élément embarrassant. Dans les cas de fichiers de lignes TC, l'utilisation d'un champ mémo rend encore plus difficile le traitement hors Foxpro.

On ne sait pas vraiment jusqu'à quel niveau de détail on devra aller pour modéliser le TC dans le contexte d'un nouveau modèle urbain. Bien que le MTQ ne s'occupe pas de l'opération des réseaux de transport collectif, on peut poser l'hypothèse antinomique (sic) qu'on voudra tout de même être le plus détaillé possible dans la modélisation. Dans ce contexte mentionnons alors en plus les éléments suivants :

- Pas de considération explicite de la tarification. Mais c'est implicite dans la calibration des paramètres, notamment dans TINMOD.
- Pas de considération formelle de la capacité des véhicules au moment de simuler le choix de l'itinéraire. On peut seulement vérifier les volumes globaux obtenus a posteriori.
- On ne tient pas compte des heures exactes de passages des véhicules pour le choix de l'itinéraire. On simule les déplacements d'une période en un bloc avec une offre de service moyenne.

Tous les environnements ont leurs particularités. Pour fins de documentation nous en mentionnons quelque uns ici.

- La codification du réseau n'est pas triviale. Elle nécessite une certaine expertise. Le réseau modélisé est une « adaptation » de la réalité (agrégation des caractéristiques par période de la journée, service moyen, vitesse moyenne, nécessité de nœud de correspondance, etc.) Il faut notamment jouer avec la codification pour tenir compte de l'effet combiné de plusieurs lignes parallèles, si désiré.
- MADITUC n'utilise pas formellement de réseau routier comme base de codification : cela a l'avantage de permettre une plus grande souplesse (tous les détails du tracé n'ont pas à être codés et compatibles avec le réseau routier) par contre cela augmente le risque d'avoir des codifications incompatibles (différents nœuds utilisés le long d'un même axe).

Annexe 4 : Modèle de transfert modal²⁵

Initialement entamé pour aider à évaluer l'impact de mesures de mitigation lors de la fermeture temporaire du pont Victoria, le modèle de transfert modal (MTM) a continuellement évolué et a été utilisé pour plusieurs projets de planification du transport en commun. Avec le temps il a aussi été utilisé pour des projets routiers. Le modèle de transfert modal est utilisé pour estimer la probabilité, pour les usagers, de passer d'un mode de transport privé à un mode de transport public ou l'inverse.

Extrait _____ du _____ site :
http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/recherche_innovation/modelisation_systemes_transport/modele_transfert_modal

À quoi sert ce modèle?

Le modèle de transfert modal permet d'anticiper les changements de mode des usagers en fonction des variations relatives de l'offre en transport. Il utilise les résultats obtenus des modèles d'affectation routière et transport en commun pour comparer les temps de déplacement entre une situation de référence et une situation projetée. Ainsi, si le transport en commun marque des gains de temps ou, inversement, si les temps des déplacements en automobile se détériorent, la part modale du transport en commun est appelée à croître. Le modèle de transfert modal estime les variations attendues.

Pour le SMST l'objectif est de pouvoir créer les données de demande de déplacement résultantes sous les formats qui permettront de les simuler sur les réseaux routier et TC dans les logiciels appropriés.

Exemples d'utilisation

- Comment l'évolution de la congestion routière est-elle susceptible d'inciter les automobilistes à changer de mode de transport?
- Combien d'automobilistes se rendant au centre-ville pourraient se voir offrir une solution de remplacement avantageuse de déplacement en transport en commun par rapport à leur situation actuelle en utilisant un nouveau parc de stationnement incitatif?
- Est-ce que la création d'un parcours d'autobus express aura assez d'attrait pour inciter des usagers de l'auto à changer leur comportement en matière de déplacements?
- Si on modifie le parcours de tel autobus, quelle proportion d'usagers verrait leur attrait pour ce mode augmenter?

Tout comme pour la modélisation du TC, le rôle du SMST tend à se modifier pour l'estimation du transfert modal dans les cas de projets de transport en commun, puisque les partenaires sont de plus en plus autonomes à cet égard. Toutefois un intérêt demeure pour estimer l'impact de projet routiers et garder au MTQ la capacité de disposer de ses propres estimés pour valider ceux des promoteurs des projets de transport en commun et s'assurer de leur réalisme.

²⁵ Ce texte a été produit par des professionnels du SMST.

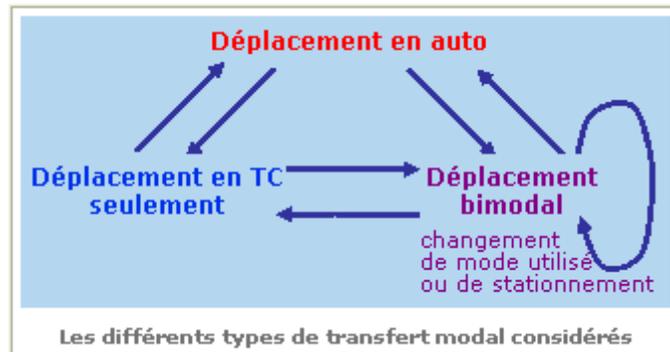
Comment procède-t-on?

Le modèle est basé sur l'utilisation et la modification directe de chaque observation d'enquêtes O-D régionales. Le modèle exploite les résultats des progiciels d'affectation routière EMME/2 et de transport en commun MADITUC, mettant en relation leurs résultats. Il est dit de « transfert modal incrémental à seuils ».

Modèle de transfert modal incrémental à seuils

- **Transfert modal** : on a une situation de base connue, révélée par la plus récente enquête origine-destination ou par la projection tendancielle de la demande en transport; on connaît donc le choix modal associé à la situation de base et on estime les transferts vers un autre mode;
- **incrémental** : en fonction des variations relatives entre les conditions de transport routier et de transport en commun existantes dans la situation de base et celles projetées pour la situation étudiée;
- **à seuils** : ces variations doivent toutefois atteindre un seuil minimal pour susciter un changement de comportement.

Ainsi, par un traitement désagrégé, i.e pour chaque observation, le modèle de transfert modal modifie le choix modal des déplacements observés lors des enquêtes origine-destination régionales en tenant compte des nouvelles conditions de déplacement que peut apporter un changement à l'offre en transport. Il traite explicitement les déplacements bimodaux en considérant la localisation des stationnements incitatifs, et leur capacité qui évolue au cours d'une période de simulation.



Le modèle considère 3 familles de modes : Mode Privé (auto-conducteur, auto-passager, moto, taxi), le Transport Collectif (bus, métro, train de banlieue), les déplacements Bimodaux (combinaison Auto – TC). Le choix du type de mode TC n'est pas traité par le modèle de transfert modal mais par le modèle de simulation TC. De même, pour le mode privé, c'est le choix déclaré dans l'O-D qui est utilisé et on ne peut faire de transfert que vers le mode auto-conducteur.

Lorsqu'on applique le modèle de transfert modal à un déplacement, il y a essentiellement quatre résultats possibles :

- l'utilisateur conserve son mode de transport actuel (pas de transfert modal);
- l'utilisateur passe de son mode actuel à un mode alternatif (ex. : du mode privé au mode public);

- l'utilisateur combine son mode actuel à un autre mode (ex. : passe du mode auto à une combinaison auto et train de banlieue);
- un usager bimodal peut aussi opter pour un changement de son « point de jonction » entre les deux modes (ex. : changement de gare de train).

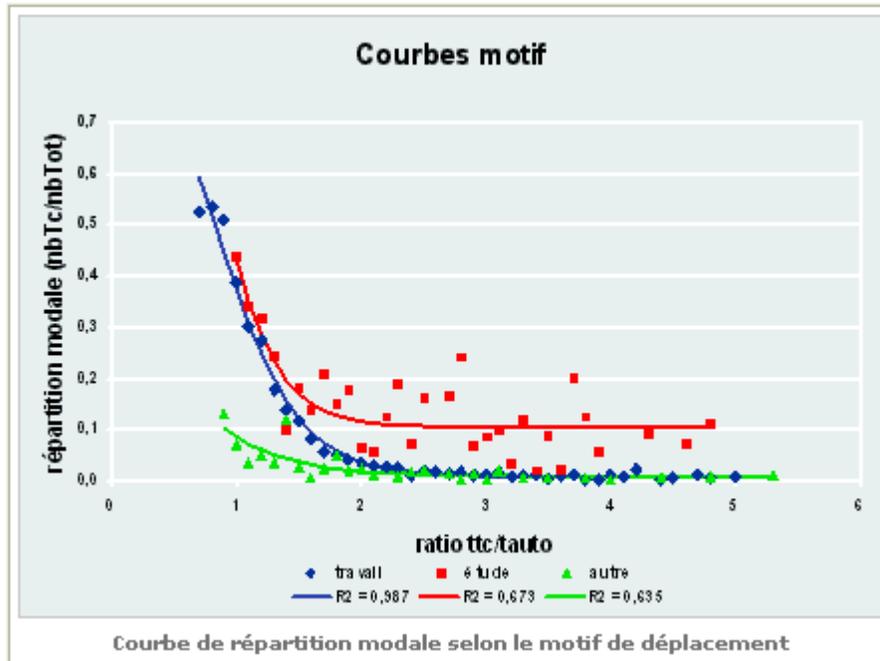
Si, pour une observation de déplacement donné plusieurs modes peuvent être utilisés, on examinera la possibilité d'un transfert modal en comparant l'évolution des temps globaux pour chacune des options de modes. On considérera un transfert modal possible uniquement si cette évolution dépasse un certain seuil minimal d'amélioration du temps de déplacement.

L'utilisation du seuil a deux fonctions :

- Considérer que les usagers ne sont pas sensibles à des modifications en dessous d'une certaine valeur. Cela est fait pour éviter que n'importe quelle modification n'entraîne automatiquement des transferts modaux parfois avec une ampleur infime, et donc, la création de plusieurs nouvelles observations avec des facteurs d'expansion non significatifs.
- Considérer que les temps calculés par les modèles ne sont pas précis en deçà d'une certaine valeur. Certaines différences peuvent être des bruits de modélisation plutôt que des différences réelles.

S'il y a transfert modal possible, il faut alors estimer pour chaque observation la proportion d'usagers susceptibles d'y participer. Cette proportion est déterminée à l'aide de courbes de répartition modale qui illustrent la part modale du transport en commun par rapport à l'ensemble des déplacements motorisés, en fonction de la performance relative en ce qui a trait au temps de déplacement du transport en commun par rapport au mode automobile. Cette relation s'exprime comme suit :

$$\frac{\text{Dépl.}_{TC}}{\text{Dépl.}_{total}} = f\left(\frac{\text{Temps}_{TC}}{\text{Temps}_{auto}}\right)$$



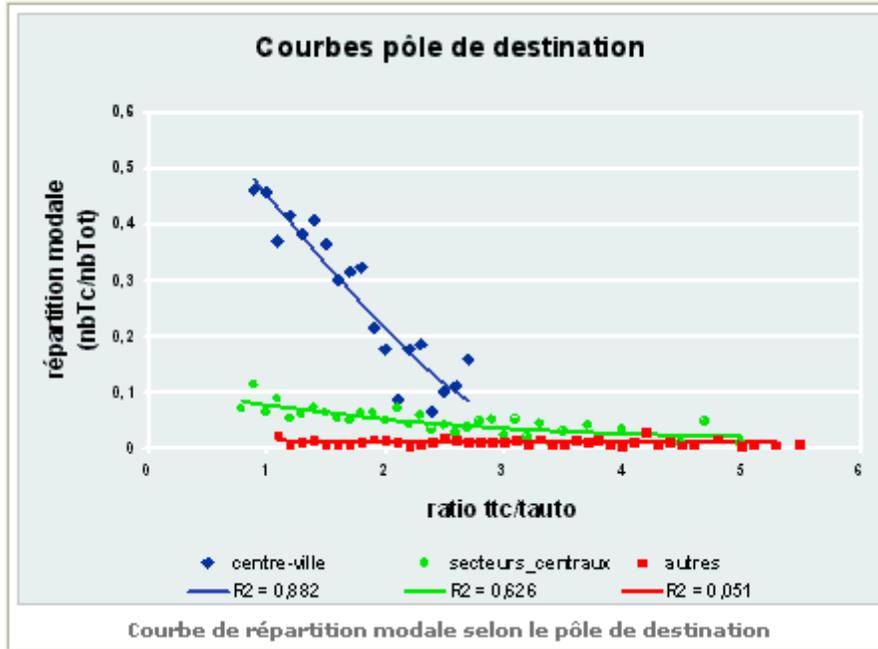
Le modèle de transfert modal examine la situation sous six angles complémentaires, correspondant chacun à une famille de courbes :

- le motif du déplacement;
- le pôle ou la région de destination du déplacement;
- le type de combinaison des modes de transport en commun (TC) pour l'option examinée;
- le mode de TC principal de la combinaison des modes de TC pour l'option examinée;
- le niveau de « pénalités tarifaires » pour l'option examinée;
- le niveau de la congestion routière sur le trajet en auto comme option examinée.

Soulignons que le modèle n'est appliqué qu'aux individus considérés comme « non-captifs » de leur choix actuel. Ainsi, les personnes accomplissant une chaîne complexe de déplacements en automobile, ou celles qui n'ont pas accès à une automobile au moment de leur déplacement, ne seront pas soumises à l'exercice de transfert modal.

Les deux diagrammes illustrent combien le comportement modal, pour les individus « non captifs », est différent selon le motif de déplacement et le pôle de destination. Ainsi, les étudiants conservent une part modale de l'ordre de 10 % même lorsque leur temps de transport en commun dépasse deux fois le temps automobile. Dans les mêmes circonstances, la part modale du TC devient quasi nulle pour les travailleurs ou les personnes qui se déplacent pour des motifs de loisirs ou de magasinage.

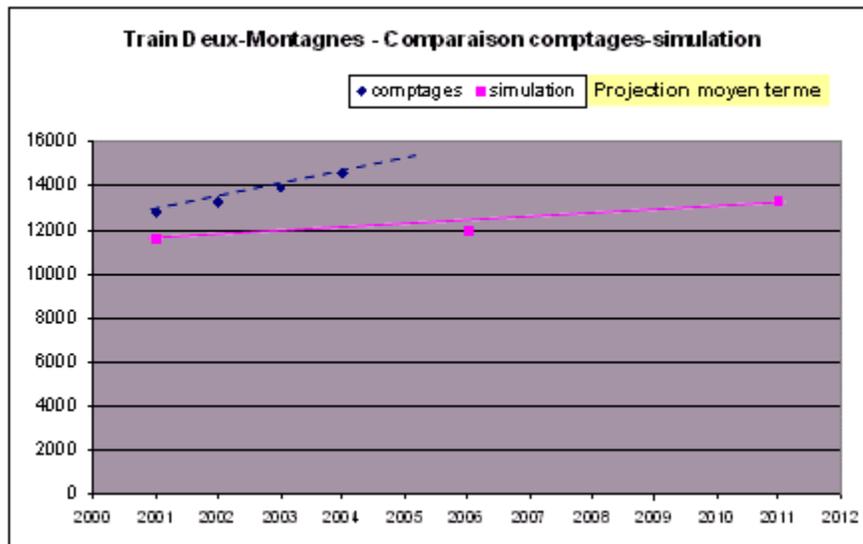
L'autre diagramme montre comment le pôle de destination « centre-ville » est dans une classe à part relativement au taux d'utilisation du transport en commun. Si la part modale du TC est plutôt faible à destination des secteurs centraux de l'agglomération montréalaise desservis par le métro, on le voit devenir tout à fait marginal pour les territoires associés aux banlieues.



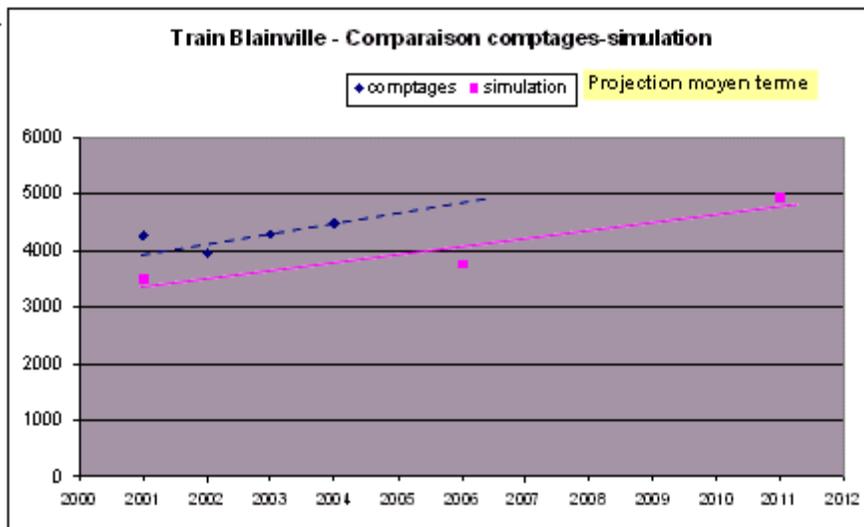
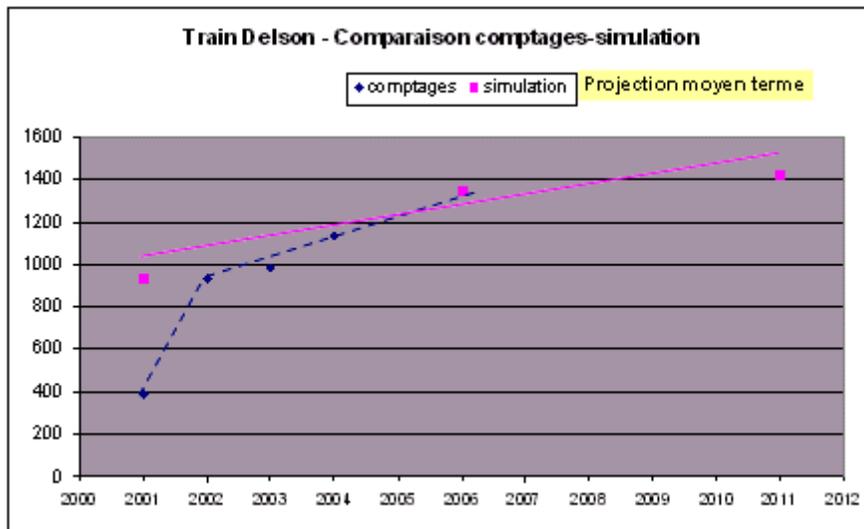
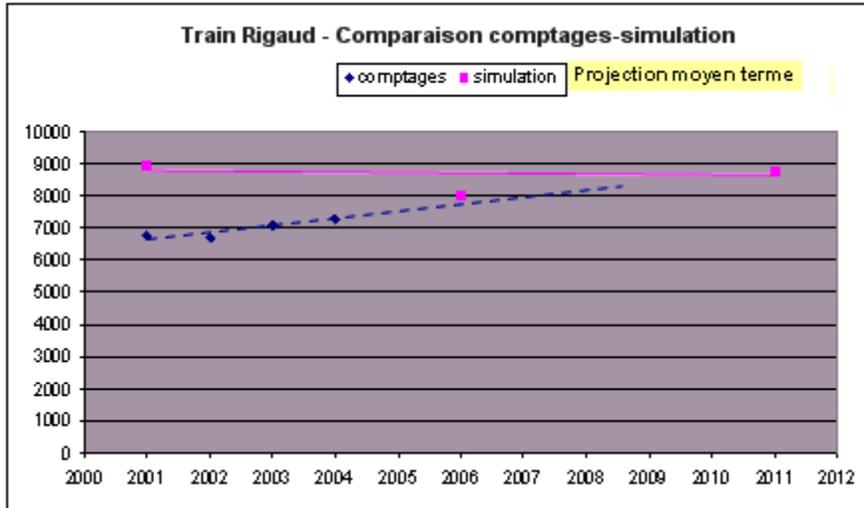
Vraisemblance des résultats

Pour connaître le comportement du modèle, et aider à sa calibration, on a tenté de reproduire des situations connues du côté des réseaux comme des achalandages.

Le modèle de transfert modal appliqué sur la base de l'enquête O-D de 1998 pour la région de Montréal permet, notamment, d'évaluer les achalandages sur les lignes de train de banlieue. Les diagrammes qui suivent montrent les prédictions du modèle de transport du MTQ, basées sur les conditions de 1998, par rapport aux achalandages révélés par les comptages devenus disponibles. Les résultats semblaient alors assez satisfaisants.



Projet R693 – Nouveau modèle urbain



Avantages du MTM

Les caractéristiques requises pour une modélisation adéquate du transfert modal dans un éventuel modèle urbain ne sont pas encore arrêtées. Les avantages exprimés ci-dessous sont en fait des particularités du MTM actuel qui, selon notre compréhension actuelle, le rendent approprié à divers niveaux (méthodologique, opérationnel, etc.) dans un contexte de développement de l'environnement futur de modélisation du SMST.

- Le modèle utilise une méthodologie simple, facilement explicable et compréhensible par les différents intervenants.
- Le modèle est incrémental, c'est donc dire qu'on fait évoluer une situation connue (observée) au lieu d'essayer d'estimer une situation « avant » et une situation « après ». En principes cela minimise les risques de surestimation grossière dans la mesure où le point de départ est évidemment toujours plausible.
- Si on devait modéliser la situation « avant », on aurait peut-être autant de situation de référence que de projets et intervenants. Et ça s'applique autant pour le réseau routier que TC.
- Le modèle permet de considérer explicitement les modifications sur les réseaux routiers et TC, et examine les possibilités de transfert modal tant vers le TC que vers le réseau routier. Le modèle est complètement désagrégé, permettant donc la micro-simulation et n'importe quelle agrégation de données.
- Le MTM considère explicitement les déplacements bimodaux et les caractéristiques des stationnements incitatifs (lieu, capacité). C'est généralement un élément important pour les projets analysés.

Limites du MTM

Les limites exprimées ci-dessous sont en fait des particularités du MTM qui méritent d'être soulignées dans un contexte de réflexion sur le développement de l'environnement futur de modélisation du SMST.

- Le MTM actuel est « semi-opérationnel », c'est-à-dire qu'il aurait besoin d'une mise à jour pour pouvoir être utilisé.
- L'élaboration du MTM s'est étalée sur plusieurs années avec différents intervenants. Il a pris la forme d'un amalgame de programmes et procédures hétéroclites (SAS, Awk, etc.) qui rendent difficile sa bonification à partir de son état actuel. Une revue en profondeur serait requise.
- Le modèle est évidemment soumis aux limites des données utilisées. Étant donné l'échantillonnage des enquêtes origine-destination, il peut souvent arriver que les résultats du MTM ne soient pas significatifs, étant calculés pour un projet impliquant un trop faible de nombre d'observations de déplacements entre certaines origines et destinations.
- La notion de déplacements captifs est peut-être trop limitative, réduisant trop le marché des transferts modaux possibles. Des conditions changeantes d'accès à l'automobile devraient-elles être considérées dans un scénario?
- Le choix des options bimodales pour la situation après (Kiss&Ride ou Park&Ride) ne dépend que du mode utilisé dans la situation précédente. C'est assez simpliste et pourrait générer des situations peu réalistes (i.e. des taux passagers/conducteurs irréalistes).

- Les modes actifs ne sont pas inclus dans le MTM, bien qu'ils soient plus importants que les déplacements bimodaux et qu'ils sont au surplus probablement sous-échantillonnés dans l'enquête O-D.

Autre éléments de réflexion

Certains principes méritent réflexion.

L'approche par transfert modal

L'approche par transfert modal (plutôt que par choix modal) apporte des avantages, notamment le fait de tirer profit des données observées, mais aussi des inconvénients.

- Il est pratiquement impossible de calibrer formellement ce genre de modèles. On a rarement des situations avant-après parfaitement comparables surtout au niveau de l'ensemble d'une région. La calibration demeure souvent empirique.
- Le résultat obtenu suite à une modification de réseau dépend de la situation servant de référence. En pratique on doit toujours utiliser l'enquête O-D comme situation de référence. Dans l'éventualité d'absence de données observées décrivant complètement la situation de référence on se retrouve avec l'obligation de modéliser aussi les données décrivant cette référence. Dans l'éventualité de la création d'une O-D entièrement synthétique on imagine mal comment un modèle de transfert modal pourrait servir à traiter les choix modaux de la situation de référence.
- Il n'est pas aisé d'introduire des effets de choix de mode liés à des modifications de localisation des individus et des firmes (absence de données observées).

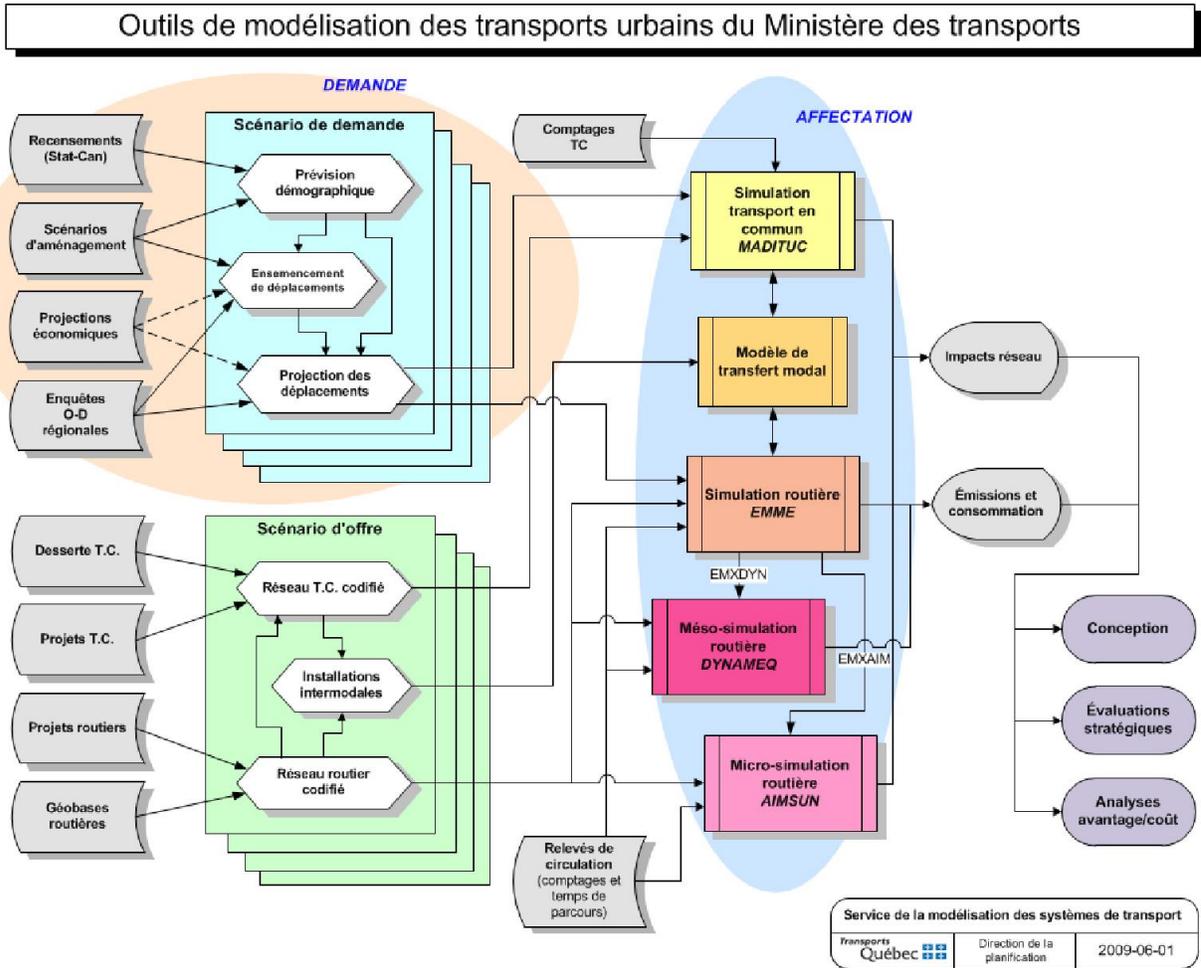
Les seuils

- Les seuils de temps sont posés arbitrairement, sur des bases empiriques.
- On ne connaît pas les préférences des gens. Le seuil ne varie pas selon les usagers.
- Il y a un effet de seuil dans les résultats. Un artifice mathématique est introduit pour atténuer cet effet en incorporant une transition entre les niveaux de transfert. Il demeure que certains déplacements pourraient se situer tout près de la limite permettant un transfert modal mais sans avoir aucun impact. Le seuil pourrait être trop contraignant.

Les familles de courbes

- L'existence de plusieurs familles de courbes permet de considérer le choix du mode sous différentes perspectives. En ce moment le résultat retenu correspond à la moyenne de ces différentes perspectives. On pourrait toutefois envisager l'utilisation d'une courbe spécifique choisie en fonction de chaque situation et qui donnerait peut-être une meilleure robustesse statistique.
- La considération de caractéristiques non traduisibles en temps de transport peut être difficile, à moins de ne créer des courbes spécifiques à ces caractéristiques. Mais il faut avoir suffisamment d'observations pour construire ces différentes familles de courbes.

Annexe 5 : Schéma de modélisation utilisé actuellement²⁶



²⁶ Cette figure a été fournie par des professionnels du SMST

Annexe 6 : Variables utilisées en lien avec les ménages dans UrbanSim²⁷

Tableau	Variables*	Description
Contrôle annuel des ménages	Year	Numéro indiquant l'année de simulation ou observée
	<i>Age of head</i>	Âge du chef de famille
	<i>Cars</i>	Nombre d'automobiles
	<i>Children</i>	Nombre d'enfants
	<i>Income</i>	Revenu annuel du ménage
	<i>Persons</i>	Taille du ménage
	<i>Race id</i>	Numéro identifiant la race du chef de famille
	<i>Workers</i>	Nombre de travailleurs
	Total number of households	Nombre de ce type de ménages à cette année
Taux de relocalisation des ménages	Age min	Âge minimal de la probabilité de relocalisation
	Age max	Âge maximal de la probabilité de relocalisation
	Income min	Revenu minimal de la probabilité de relocalisation
	Income max	Revenu maximal de la probabilité de relocalisation
	Probability of relocating	Probabilité de relocalisation en une année
Ménages	Household id	Numéro identifiant le ménage
	Grid id (ou parcel/zone id)	Numéro identifiant l'endroit où habite ce ménage
	Persons	Taille du ménage
	Workers	Nombre de travailleurs
	Age of head	Âge du chef de famille
	Income	Revenu annuel du ménage
	Children	Nombre d'enfants
	Race id	Numéro identifiant la race du chef de famille
	<i>cars</i>	Nombre d'automobiles
Tableau définissant les races**	Race id	Numéro identifiant une race
	Name	Nom de cette race
	Minority	Vrai si cette race représente une minorité

*Les variables en italique sont optionnelles

**Le tableau définissant les races n'est inclus que si cette variable est prise en considération dans les autres tableaux

²⁷ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Annexe 7 : Variables utilisées en lien avec les emplois dans UrbanSim²⁸

Tableau	Variabes	Description
Contrôle annuel d'emploi	Sector id	Numéro identifiant un secteur d'emploi
	Year	Numéro indiquant l'année de simulation ou observée
	Total home based employment	Le nombre d'emplois à domicile de ce secteur
	Total non-home based employment	Le nombre d'emplois non domiciliaire de ce secteur
Taux de relocalisation	Sector id	Numéro de référence pour un secteur d'emploi
	Job relocation probability	La probabilité qu'un emploi soit relocalisé
Secteurs d'emploi	Sector id	Numéro identifiant un secteur d'emploi
	Name	Nom de ce secteur d'emploi
Secteur d'emploi <i>ad hoc</i>	Group id	Numéro identifiant secteur d'emploi <i>ad hoc</i>
	Name	Nom du secteur d'emploi <i>ad hoc</i>
Définition des secteurs d'emploi <i>ad hoc</i>	Sector id	Numéro identifiant un secteur d'emploi
	Group id	Numéro identifiant un secteur d'emploi <i>ad hoc</i>
Emplois par unité géographique et les édifices reliés aux emplois	Job id	Numéro identifiant un emploi
	Building id	Numéro identifiant les édifices où cet emploi existe
	Sector id	Numéro identifiant le secteur de cet emploi
	Building type	Le type d'édifice
	Sqft	L'espace utilisé par cet emploi
Édifices reliés aux emplois	id	Numéro identifiant cet édifice
	Name	Nom du type d'édifice
	Home based	Vrai si emploi à domicile

²⁸ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section Références. **Erreur ! Source du envoi introuvable.**

Annexe 8 : Sources potentielles des données reliées aux emplois dans UrbanSim²⁹

Données	Variables	Sources
Nombre d'emploi par secteur d'activité	Total home (et non-home) based employment	Recensement
Mobilité des emplois par secteur	Job relocation probability	Statistique Canada
Localisation des emplois	Job id	Infogroup Canada, Registraire d'entreprise d'emploi Québec, Liste des industries et commerces
Espace utilisé par emploi	Sqft	Registraire d'entreprise d'emploi Québec, Rôle foncier

²⁹ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section Références.

Annexe 9 : Variables utilisées en lien avec les ZATs dans UrbanSim³⁰

Tableau	Variables*	Description
Zones	Zone id	Numéro identifiant le ZAT
	Travel time to airport	Temps de trajet à l'aéroport
	Travel time to CBD	Temps de trajet au centre d'affaires
Trajet	From zone id	Zone origine du trajet
	To zone id	Zone destination du trajet
	<i>logsumN</i>	Coût du trajet en fonction du nombre d'automobiles du ménage (N=0, 1, 2,...)

*Les variables en italique sont optionnelles

³⁰ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section Références.

Annexe 10 : Variables utilisées en lien avec les parcelles dans UrbanSim³¹

Tableau	Variables	Description
Parcelles	Parcel id	Numéro identifiant la parcelle
	Zone id	Numéro identifiant la zone dans laquelle fait partie cette parcelle
	Land use type id	Type d'utilisation du sol permis
	City id	Numéro identifiant la ville dans laquelle fait partie cette parcelle
	Plan type id	Numéro identifiant le type de zonage
	Parcel sqft	Taille de la parcelle
	<i>Assessor parcel id</i>	Numéro de la personne ayant évalué la valeur de la parcelle
	<i>Tax exempt flag</i>	Vrai si la parcelle est exemptée de taxe
	Land value	Valeur évaluée de la parcelle
	<i>Is in flood plain</i>	Vrai si dans une plaine inondée
	<i>Is on steep slope</i>	Vrai si dans une pente abrupte
	<i>Is in fault zone</i>	Vrai si dans une zone à risque de tremblement de terre
	Centroid x	Coordonnée du centroïde
	Centroid y	Coordonnée du centroïde
	<i>Census block id</i>	Numéro identifiant le numéro de recensement de cette parcelle

³¹ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section Références.

Annexe 11 : Variables utilisées en lien avec les édifices dans UrbanSim³²

Édifices	Building id	Numéro identifiant l'édifice
	<i>Building quality id</i>	Numéro identifiant la qualité de l'édifice
	Building type id	Numéro identifiant le type d'édifice
	Improvement value	Valeur de remplacement de l'édifice
	Land area	Espace utilisé par l'édifice et aménagements
	Non residential sqft	Espace utilisé à des fins non résidentielles
	Parcel id	Numéro identifiant la parcelle
	Residential units	Nombre d'unité résidentielle
	sqft per units	Taille des unités résidentielles
	<i>Stories</i>	Nombre d'étages
	<i>Tax exempt</i>	Indicateur de l'exemption de taxe
	Year built	Année de construction
Type d'édifice	Building type id	Numéro identifiant le type d'édifice
	Building type name	Nom de ce type d'édifice
	<i>Description</i>	Description de ce type d'édifice
	<i>Generic building type id</i>	Numéro identifiant certains types d'édifice générique
	<i>Generic building type description</i>	Description de ce type d'édifice générique
	Is residential	Vrai si l'édifice est résidentiel
	Unit name	Nom des unités pour ce type d'édifice

³² Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section section Références.

Annexe 12 : Tableaux des variables utilisées pour les développements dans UrbanSim³³

Tableau	Variabes	Description
Proposition de projet	Development project id	Numéro identifiant le projet
	Development template id	Numéro identifiant le modèle du projet
	FAR	Ratio plancher/surface
	Percent open	Pourcentage d'espace ouvert
	Status id	Niveau d'avancement du projet (ex.: proposé, refusé, etc.)
	Parcel id	Numéro identifiant la parcelle du projet
	Start year	Année de début de construction
	Built sqft to date	Espace non résidentiel complété
	Built units to date	Nombre d'unités résidentielles complétées
Composante du projet	Development project component id	Numéro identifiant la composante du projet
	Development project id	Identifie de quel projet cette composante fait partie
	Percentage of building sqft	Pourcentage du projet que cette composante utilise
	Construction cost per unit	Coût de construction par unité résidentielle
	sqft per unit	Taille des unités résidentielles
	Building type id	Numéro identifiant le type d'édifice
	Land area	Espace utilisé par cette composante
	Residential units	Nombre d'unités résidentielles
Modèle de développement	Development template id	Numéro identifiant le modèle
	Percent open	Pourcentage d'espace ouvert
	Min land	Utilisation minimale du sol pour ce modèle
	Max land	Utilisation maximale du sol pour ce modèle
	Density type	Nom identifiant l'unité utilisée pour la densité
	Density	La densité de ce modèle de développement
	Land use type id	Utilisation du sol pour ce modèle
	Development type	Nom identifiant le modèle de développement
Composante du modèle de développement	Development template component id	Numéro identifiant la composante du modèle
	Development template id	Numéro identifiant le modèle
	Building type id	Numéro identifiant le type d'édifice
	Percent of building sqft	Pourcentage d'utilisation du modèle pour cette composante
	Construction cost per unit	Coût de construction par unité résidentielle
	Building sqft per unit	Taille des unités résidentielles

³³ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section Références.

Projet R693 – Nouveau modèle urbain

Fonction de vélocité	Velocity function id	Numéro identifiant la fonction de vélocité
	Annual construction schedule	Pourcentage du projet complété par année (ex.: 0, 20, 50, 80, 100)
	Building type id	Numéro identifiant à quel type d'édifice cette fonction s'applique
	Minimum units	Minimum d'unités auxquelles cette fonction peut être appliquée
	Maximum units	Maximum d'unités auxquelles cette fonction peut être appliquée
Coût de démolition	Building type id	Numéro identifiant le type d'édifice
	Demolition cost per sqft	Coût de démolition par unité de surface
Espace occupé par emploi	Zone id	Zone à laquelle s'appliquent ces caractéristiques
	Building type id	Type d'édifice auquel s'appliquent ces caractéristiques
	Building sqft per job	Espace pris par emploi dans cette zone et type d'édifice

Annexe 13 : Variables utilisées pour fixer les contraintes aux nouveaux développements dans UrbanSim³⁴

Tableau	Variables	Description
Contrainte de développement	Constraint id	Numéro identifiant la contrainte
	Constraint type	Type de contrainte (ex.: Unités/surface)
	Generic land use type id	Numéro identifiant une contrainte générique
	Maximum	Valeur maximale permise au développement
	Minimum	Valeur minimale permise au développement
	Plan type id	Numéro identifiant un type de zonage

³⁴ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section Références.

Annexe 14 : Variables utilisées pour fixer les taux de vacance dans UrbanSim³⁵

Tableau	Variables	Description
Objectif d'espace vacant	Year	Année simulée ou observée
	Target vacancy	Ratio d'espace vacant sur l'espace total
	Building type id	Numéro identifiant le type d'édifice

³⁵ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section section Références.

Annexe 15 : Variables encadrant les simulations d'UrbanSim³⁶

Tableau	Variables	Description
Constante d'UrbanSim	Cell size	Taille des unités géographiques
	Units	Unités de mesure utilisées
	Walking distance circle radius	Distance de marche acceptable
	Young age	Âge maximal pour être considéré jeune
	Preperty value to annual cost ratio	Ratio de la valeur de la propriété et des coûts qui y sont rattachés
	Low income fraction	Fraction des ménages à faible revenu
	Mid income fraction	Fraction des ménages à revenu moyen
	Near arterial threshold	Distance considérée à proximité d'une artère
	Near highway threshold	Distance considérée à proximité d'une autoroute
	Percent coverage threshold	Pourcentage requis pour qu'une parcelle soit considérée couverte
	Recent years	Nombre maximal d'années considérées comme récentes
Scénario de raffinement	Refinement id	Numéro identifiant le scénario de raffinement
	Agent expression	Identification de l'agent à modifier
	Location capacity attribute	L'attribut à modifier
	Location expression	L'endroit où faire la modification
	Amount	La quantité d'agents à modifier
	Year	L'année où se déroule le raffinement
	Action	Addition ou soustraction de l'agent
	Transaction id	Identifiant permettant de jumeler et d'équilibrer deux raffinements

³⁶ Les informations contenues dans ce tableau proviennent du Manuel de référence et du Guide de l'utilisateur d'UrbanSim (version 4.3) dont la référence complète se trouve dans la section Références.

Annexe 16 : Variables de base de l'approche sur mesure

Facteurs	Variables	Sources
Caractéristiques des ménages	Nombre d'individus	Enquête O-D
	Nombre d'enfants	Enquête O-D
	Âge du chef de famille	Enquête O-D
	Nombre de travailleurs	Enquête O-D
	Nombre d'automobiles	Enquête O-D
	Revenu moyen	Recensement
	Lieu de résidence	Enquête O-D
	Lieu de travail	Enquête O-D
	Probabilité de relocalisation	Recensement
	Prévision de croissance par type de ménage	Recensement
Caractéristiques des emplois	Nombre d'emplois par secteur d'activité	Recensement
	Nombre d'emplois par profession	Recensement
	Espace occupé par chaque type d'emploi	Registraire d'entreprise
	Probabilité de relocalisation	Registraire d'entreprise
	Emplacement de l'emploi	Registraire d'entreprise
	Prévision de croissance par secteur d'activité	Données gouvernementales
Caractéristiques des parcelles	Utilisation du sol	Règlement d'urbanisme
	Contraintes d'aménagement	Règlement d'urbanisme
	Taille de la parcelle	Registre foncier
	Valeur de la parcelle	Registre foncier
	Niveau d'accessibilité	Fourni par modèle de transport
	Niveau de taxation	Règlement municipal
	Nombre d'unités résidentielles	Registre foncier
	Espace commercial	Registre foncier
	Taille de l'édifice	Registre foncier
	Année de construction	Registre foncier
	Données topographiques	Banque de données achetables