

**APPLICATION DU MODÈLE DE SIMULATION MULTI-AGENTS MATSIM
AU CONTEXTE QUÉBÉCOIS AU PROFIT DE LA RÉALISATION DE
SCÉNARIOS DE MOBILITÉ INNOVANTE
PROJET R661.3**

Chercheur Principal

Francesco Ciari, PhD, professeur agrégé
Département de génies civil, géologique et des mines
Polytechnique Montréal
Téléphone : 514-340-4711, poste 3772
Courriel : francesco.ciari@polymtl.ca

Réalisé pour le compte du ministère des Transports et de la Mobilité durable du
Québec

Septembre 2025

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec et elle a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec.

Collaborateurs :

Catherine Morency, Professeure, Polytechnique Montréal

Ashraf Uz Zaman Patwary, Post-doctorant, Polytechnique Montréal

Oaussim Manout, Post-doctorant, Polytechnique Montréal

Hubert Verreault, Associé de Recherche, Polytechnique Montréal

Idriss El Megzari, Étudiant de Doctorat, Polytechnique Montréal

Mathilde Molinier, Étudiante à la Maitrise, Polytechnique Montréal

Alice Marchessault, Étudiante au Baccalauréat, Polytechnique Montréal

Mael Télémaque, Étudiant au Baccalauréat, Polytechnique Montréal

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Ce projet de recherche (R661.3), commandé et financé par le Ministère des Transports et de la Mobilité Durable du Québec (MTMD), vise à utiliser le modèle MATSim pour simuler et analyser des scénarios de mobilité urbaine pour la région du Grand Montréal. S'appuyant sur les projets précédents R661.1 et R661.2, cette étude cherche à améliorer l'adaptabilité du modèle pour prévoir et évaluer les politiques de transport et les changements d'infrastructures.

Objectifs et réalisation

Les principaux objectifs du projet de recherche étaient :

- Soutenir les nouveaux besoins de modélisation du MTMD et permettre l'évaluation systématique des solutions innovantes grâce à l'approche de modélisation basée multi-agents (notamment la mobilité partagée, les nouveaux modèles d'affaires tels que Uber et Lyft, le télétravail, les services intégrés de mobilité);
- Expérimenter cette méthodologie pour la rendre complètement prête pour son utilisation pratique dans un contexte québécois.

Dans ce cadre général, les objectifs spécifiques du projet de recherche étaient :

- Appliquer le modèle MATSim pour une région métropolitaine du Québec;
- Calibrer et valider le modèle sur la base de données observées (comme les comptages de circulation);
- Réaliser une étude de cas « tendancielle » visant à déterminer les écarts entre la nouvelle approche et celle courante (en termes de résultats) ;
- Réaliser des études de cas « contrastées » liées à la mobilité innovante, visant notamment l'appropriation de la méthode de simulation par la DMST, l'évaluation de l'ampleur des efforts impliqués dans le développement et l'entretien d'un tel modèle;
- Identifier les limites et les avantages d'un tel modèle appliqué à une région métropolitaine du Québec, afin d'évaluer l'adéquation entre les résultats fournis par le modèle et les nouveaux besoins de modélisation du MTQ.

Certains objectifs, en accord avec le MTMD, ont été modifiés pendant la réalisation. Spécifiquement, les études de cas contrastées n'ont pas été réalisées, tandis que la génération d'une population synthétique exclusivement basée sur l'EOD a été réalisée.

Le projet a été structuré en trois phases principales :

1. **Phase I** : Développement d'un modèle de base MATSim, incluant les réseaux de transport et une population synthétique, suivi d'une calibration et d'une validation initiales.
2. **Phase II** : Amélioration de la logique de modélisation, des réseaux de transport et des techniques de calibration pour affiner la précision des simulations.
3. **Phase III** : Génération de scénarios de réseaux 2021 et 2041 basés sur les données OpenStreetMap (OSM) et EMME, intégration des améliorations des réseaux de transport en commun et routier et exécution des simulations.

Résultats:

- Amélioration du pointage (scoring) et de la replanification (replanning) des activités
 - Prise en compte de contraintes temporelles réalistes dans le scoring des activités.
 - Bonification de l'algorithme de mutation temporelle pour améliorer l'adhérence des heures de départ des agents aux observations.

- Amélioration de la codification du réseau routier et de transport public
 - Rééchelonnement des capacités pour les réseaux routiers et de transport en commun, garantissant une congestion et un comportement de déplacement plus représentatifs.
 - Extension du réseau de transport public MATSim à l'ensemble de la région métropolitaine de Montréal.
 - Ajustement des capacités du réseau pour mieux refléter les conditions réelles, réduisant les retards simulés de 80 à 7 minutes.
 - Minimisation des liens artificiels dans le réseau de transport en optimisant les algorithmes de correspondance.
- Génération de population synthétique :
 - Génération de population synthétique avec Eqasim, un processus bien établi, basée sur le recensement et sur l'EOD.
 - Génération de la population synthétique avec un nouveau processus basée exclusivement sur le EOD.
 - Comparaison des deux approches.
- Calibration du modèle :
 - Le processus de calibration en trois étapes, incluant la synthèse des activités, les ajustements des parts modales et une micro-calibration des volumes de trafic.
 - L'optimisation avancée par métamodèle a amélioré la calibration et réduit l'erreur de 17,83 %.
- Analyse des scénarios :
 - La simulation des scénarios pour 2021 et 2041 a permis l'évaluation de l'impact des modifications des réseaux et l'impact des tendances de socio-démographiques et de mobilité projetées.

Synthèse des conclusions

Le projet a montré la valeur de MATSim comme un outil flexible et évolutif pour la planification des transports au Québec, mettant en avant son potentiel pour tester des politiques et optimiser la mobilité urbaine. Parmi les deux approches de synthèse de population testées, l'approche basée sur l'EOD a montré une meilleure correspondance avec les comportements de déplacement réels, mais a nécessité des ajustements pour maintenir une cohérence logique dans les déplacements des ménages et des individus. L'utilisation d'un métamodèle, bien que coûteuse du point de vue computationnel, permet de réduire l'erreur de calibration, et donc la précision du modèle, de manière significative. Selon les accords pris en cours d'œuvre avec le MTMD, les objectifs spécifiques d'analyses de scénarios simulés ont été abandonnés. Cependant, la simulation du scénario 2041, avec les améliorations planifiées pour le réseau, a permis d'observer que la meilleure accessibilité des transports en commun contribue à une multimodalité accrue. Des points chauds de congestion nécessitant des interventions ciblées sur les infrastructures, ont été aussi observés. Finalement, la tendance des individus à la multimodalité, crée la nécessité d'affiner davantage la représentation des piétons et des cyclistes dans la simulation.

Synthèse des Recommandations

Sur la base des résultats du projet, si le MTMD souhaite poursuivre les travaux avec MATSim, une suite du projet devra idéalement tenir compte des points suivants :

- Poursuivre le raffinement de l'intégration multimodale de MATSim, en particulier pour les modes de transport actifs.
- Développer davantage les techniques de calibration pour s'adapter dynamiquement aux variations réelles des transports.
- Étendre l'applicabilité du modèle pour évaluer les solutions de mobilité émergentes, y compris les véhicules autonomes et le transport à la demande dynamique, mais aussi pour mieux représenter des aspects importants de la mobilité urbaine qui ne sont pas couramment très détaillés dans la simulation, comme le stationnement.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE EXÉCUTIF	II
TABLE DES MATIÈRES	1
LISTE DES TABLEAUX.....	2
LISTE DES FIGURES	2
1 GLOSSAIRE	1
2 INTRODUCTION	2
3 AMÉLIORATIONS À LA LOGIQUE DE MODÉLISATION	3
3.1 Pointage des activités	4
3.2 Mutation temporelle	4
3.3 Mise à l'échelle des capacités.....	6
4 AMÉLIORATIONS DU RÉSEAU DE TRANSPORT EN COMMUN.....	6
4.1 Extension du réseau de transport en commun	7
4.2 Correction de la capacité du réseau.....	7
4.3 Amélioration du réseau de transport en commun (Correction des liens artificiels). 11	
5 GÉNÉRATION DE LA POPULATION SYNTHÉTIQUE À PARTIR DE L'EOD 2018	15
5.1 Traitement des données EOD.....	17
6 VALIDATION COMPARATIVE DES POPULATIONS SYNTHÉTIQUES	18
6.1 Âge et Genre	18
6.2 Distribution des Activités	20
6.3 Répartition du mode.....	24
6.4 Distribution de l'heure de départ	25
6.5 Distribution de l'origine et de la destination	26
7 CALIBRATION	28
7.1 Formulation du problème	28
7.2 Algorithme d'optimisation par métamodèle	29
7.3 Traitement des données pour la calibration.....	30
7.4 Algorithme de correspondance de liens	32
7.5 Résultat de la calibration.....	32
8 CONVERSION DU RÉSEAU EMME.....	34
8.1 Génération du réseau	34
8.2 Restrictions de virage	34
8.3 Intégration du transport en commun au réseau EMME avec restrictions de virage 35	
9 RÉSEAU OSM AVEC RESTRICTIONS DE VIRAGE	37
10 COMBINAISON DES RÉSEAUX ET GÉNÉRATION DU RÉSEAU FUTUR.....	40
11 GÉNÉRATION DE LA POPULATION SYNTHÉTIQUE EOD POUR 2018, 2021 ET 2041	42
12 SCÉNARIOS	44
12.1 Scénario OSM 2021 avec restrictions de virage.....	44
12.2 Scénario OSM 2041 avec restrictions de virage.....	55

12.3	Scénario EMME 2021 avec restrictions de virage	66
13	FINALISATION DU PROJET	73
14	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	73
15	RÉFÉRENCES	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Règles de correction de la capacité du réseau basées sur les types de liens	9
Tableau 2	Paramètres calibrés pour pt2MATSim	14
Tableau 3	Comparaison des caractéristiques du réseau entre les réseaux OSM et EMME	42
Tableau 4	Détails de la population synthétique EOD	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Déplacement des heures de départ en raison de la mutation temporelle : (a) distribution des heures de départ (b) distribution cumulative des heures de départ.....	5
Figure 2	Réseau Phase I (gauche) vs. Phase II (droite).....	7
Figure 3	Agents bloqués en route à la fin de la journée simulée en raison du retard dans le transport en commun	8
Figure 4	Agents bloqués en route à la fin de la journée simulée en raison du retard dans le transport en commun	8
Figure 5	Distribution de la capacité et de la vitesse libre des liens avant (à gauche) et après (à droite) la modification de la capacité du réseau.	10
Figure 6	Retard des transports en commun dans les scénarios 2021 (a) et 2041 (b)	11
Figure 7	Liens artificiels avec les paramètres PtToMATSim par défaut	13
Figure 8	Réseau OSM 2021 avec restrictions de virage de la Phase III, comprenant 1251 liens artificiels.....	14
Figure 9	Distribution par âge et par genre pour la population synthétique Eqasim vs données EOD	19
Figure 10	Distribution par âge et par genre pour la population synthétique EOD vs données EOD	20
Figure 11	Répartition des activités pour la population synthétique Eqasim vs données EOD	21
Figure 12	Distribution des motifs d'activité pour la population synthétique EOD vs données EOD	21
Figure 13	Distributions des paires d'activités pour la population synthétique Eqasim vs données EOD	22
Figure 14	Distributions des paires d'activités pour la population synthétique EOD vs données EOD	23

Figure 15	Choix du mode dans la population synthétique Eqasim vs données EOD 2018	24
Figure 16	Choix du mode dans la population synthétique EOD vs données EOD 2021 .	24
Figure 17	Distribution de l'heure de départ dans la population synthétique EOD vs données EOD	25
Figure 18	Heure de départ dans la population synthétique EOD vs données EOD	26
Figure 19	Carte thermique des origines (gauche) et destinations (droite) des déplacements pour la base de données EOD	26
Figure 20	Carte thermique des origines (gauche) et destinations (droite) des déplacements pour la population sythétique Eqasim.....	27
Figure 21	Carte thermique des origines (gauche) et destinations (droite) des déplacements pour la base de données EOD	27
Figure 22	Diagramme de flux de l'algorithme d'optimisation par métamodèle (Patway et al. 2021)	30
Figure 23	Diagramme de flux de l'algorithme d'optimisation par métamodèle amélioré .	30
Figure 24:	Logique de conversion du débit d'intersection en débit de liaison.....	31
Figure 25	Correction manuelle sur la sortie de l'algorithme automatique de correspondance de liens	32
Figure 26	Comparaison de l'erreur quadratique	33
Figure 27	Nombre de liens simulés et observés	34
Figure 28	Réseau EMME codé dans MATSim	36
Figure 29	Réseau EMME converti zoomé avec des liens physiques (noirs) et des liens artificiels (rouges).....	37
Figure 30	Réseau OSM avec restrictions de virage	38
Figure 31	Réseau OSM zoomé avec des liens artificiels en rouge.....	39
Figure 32	Réseau OSM en gris et réseau EMME en noir.....	39
Figure 33	Changements proposés du réseau EMME 2041	40
Figure 34	Changements mis en œuvre du réseau EMME 2041 au réseau OSM 2041 ..	41
Figure 35	Modifications du réseau en 2041	41
Figure 36	Temps de simulation vs. Itération (scénario OSM 2021 avec restrictions de virage)	45
Figure 37	Pointages vs. Itération (scénario OSM 2021 avec restrictions de virage)	45
Figure 38	Proportion de mode vs. Itération (scénario OSM 2021 avec restrictions de virage)	46
Figure 39	Comptage simulé vs observé en heure de pointe (PCU) pour le réseau OSM 21 avec 5 % de la population EOD	47

Figure 40	Comptage AADT simulé vs observé (PCU) pour le réseau OSM 21 avec une population EOD de 5 %.....	47
Figure 41	Histogramme des trajets en voiture (Scénario de base OSM 2021 itération 500)	48
Figure 42	Histogramme des trajets en transit (Scénario de base OSM 2021 itération 500)	48
Figure 43	Retard au départ et à l'arrivée en fonction des heures de simulation à l'itération 500 (scénario OSM 21 avec 5 % de la population EOD 21)	49
Figure 44	Congestion aux heures de pointe du matin et du soir aux différentes entrées et sorties (réseau OSM 21 restreint aux tournants avec une population EOD 2021 de 5 %) ...	50
Figure 45	Volume de trafic entrant et sortant de l'Île de Montréal via le Pont de l'Île-aux-Tourtes	51
Figure 46	Volume de trafic entrant et sortant de l'Île de Montréal via le Pont Viau	52
Figure 47	Correspondances à différentes stations	53
Figure 48	Scores vs. Itération (scénario OSM 2041 avec restrictions de virage).....	55
Figure 49	Temps de calcul par itération (OSM 2041, EOD 41 scénario 5%)	55
Figure 50	Part modale vs. Itération (scénario OSM 2041 avec restrictions de virage)....	56
Figure 51	Histogramme des trajets en voiture (Scénario OSM 2041 itération 500)	57
Figure 52	Histogramme des trajets en transport en commun (Scénario OSM 2041 itération 500)	57
Figure 53	Retard à l'arrivée et au départ Scénario OSM 2041	58
Figure 54	Embouteillage dans le scénario OSM 2041	59
Figure 55	Trafic de pointe du matin en direction de l'île de Montréal.....	60
Figure 56	Trafic à l'heure de pointe de l'après-midi vers l'extérieur de l'île de Montréal .	60
Figure 57	Volume de trafic sur le Pont Samuel-De Champlain.....	61
Figure 58	Volume de la liaison sur la nouvelle voie rapide proposée	62
Figure 59	Volume de liaison dans le nouveau segment de route proposé.....	63
Figure 60	Quelques statistiques de transfert de la route 2001	64
Figure 61	Embarquement, débarquement et chargement des véhicules aux heures de pointe du matin et de l'après-midi (10439 et 12003).....	66
Figure 62:	Blocage du scénario EMME	67
Figure 63	Convergence du pointage au fil des itérations - Scénario EMME 2021	68
Figure 64	Distribution du temps de calcul pour le scénario EMME 2021	69
Figure 65	Répartition modale dans l'EMME Scénario 2021	69
Figure 66	Histogramme des trajets en mode voiture (scénario EMME 2021, itération 300)	70

Figure 67	Histogramme des trajets en mode transport (scénario EMME 2021, itération 300)	70
Figure 68	Congestion aux heures de pointe du soir près du centre-ville - restriction des virages Scénario EMME 2021	71
Figure 69	Volumes de trafic et congestion sur le Pont de l'Île-aux-Tourtes	72

1 GLOSSAIRE

Acronymes

AADT	Trafic quotidien annuel moyen (Annual Average Daily Traffic)
AD	Aire de diffusion
ARTM	Autorité Régionale de Transport Métropolitain
DMST	Direction de la Modélisation des Systèmes de Transport
EOD	Enquête Origine Destination
GTFS	Spécification générale pour les flux relatifs au transport en commun (General Transit Feed Specification)
IHPF	Algorithme itératif de répartition proportionnelle hiérarchique (Ideal Highpass Filter)
MAJT	Moyenne Annuelle Journalière du Trafic
MATSim	Simulation de Trafic Multi Agents (Multi Agent Traffic Simulation)
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec
OD	Origine Destination
OSM	Open Street Map
PCU	Unité-voiture particulière (Passenger Car Unit)
RMR	Région Métropolitaine de Recensement
RTL	Réseau de Transport de Longueuil
SBO	Optimisation basée sur des substituts (Surrogate-Based Optimization)
SIG	Système d'Information Géographique
SR	Secteur de Recensement
STL	Société de Transport de Laval
STM	Société de Transport de Montréal
SUE	Équilibre Utilisateur Stochastique (Stochastic User Equilibrium)
TC	Transport en commun
VA	Véhicule Autonome

Modules

Popgen	Génère des populations synthétiques à partir de données de recensement ou d'enquêtes pour une utilisation dans MATSim.
Equasim	Fournit l'intégration de modèles de choix discrets dans le pipeline de population de MATSim.
MetamodelCalibration	Calage de la simulation basé sur un métamodèle afin de reproduire le comportement de mobilité observé.
Pt2MATSim	Convertit les horaires de transport public et les données GTFS en formats compatibles avec MATSim.
OSM2MATSim	Convertit les données OpenStreetMap en fichiers de réseau compatibles avec MATSim.

2 INTRODUCTION

La Simulation de Trafic Multi Agents (MATSim) est un modèle de trafic basé sur les activités qui simule chaque voyageur individuel en tant qu'agent effectuant des activités dans tout le réseau étudié sur une période d'une journée. Il déduit la demande de déplacements à partir des besoins en mobilité des personnes afin d'accomplir des activités. MATSim est modulaire par nature. Son architecture basée sur les agents et leurs activités permet un cadre de modélisation riche et microscopique pour simuler des scénarios futurs de mobilité urbaine complexes. Ce projet de recherche vise à utiliser et évaluer MATSim en tant qu'outil flexible et modulaire pour simuler les déplacements urbains dans les régions métropolitaines du Québec, en particulier dans la grande région de Montréal.

Ce projet de recherche fait suite aux projets R661.1 et R661.2 soutenus par la Direction de la Modélisation des Systèmes de Transport (DMST) du Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD). L'objectif est d'utiliser les résultats, les connaissances et l'expertise des deux projets précédents pour créer un outil de simulation de mobilité multi-agents pour la région métropolitaine de Montréal qui soit suffisamment flexible pour tenir compte du développement de scénarios futurs et capable de simuler des solutions innovantes. À cet effet, une présentation détaillée a eu lieu le 23 septembre 2021, suivie d'un rapport décrivant la première partie du projet, c'est-à-dire le processus initial de génération de scénarios pour MATSim Montréal. Cette présentation et le rapport ultérieur seront désignés comme le rapport de la phase I.

Ce dernier détaille trois grandes étapes:

- Création du modèle de base MATSim, comprenant le réseau et le système de transport, ainsi qu'une population synthétique;
- Calibration et validation du modèle;
- Réalisation d'une étude de cas.

Il résume les travaux réalisés pour construire le scénario MATSim pour la région métropolitaine de Montréal. Le rapport de la phase I examine les données nécessaires et obtenues pour construire le scénario MATSim, ainsi que le traitement des données et discute de la precalibration de la population synthétique ainsi que d'une calibration globale du scénario MATSim Montréal. Parallèlement, il présente quelques résultats initiaux du scénario de base.

Le présent rapport a comme objectif de mettre en évidence les améliorations apportées au scénario MATSim Montréal depuis la soumission du rapport de la phase I. Le présent rapport sera identifié comme le rapport final. Il contient les tâches accomplies dans les phases II et III du projet.

La phase II du projet comprend les améliorations suivantes :

- Améliorations de la logique de modélisation;
- Améliorations du réseau routier et du système de transport en commun;
- Calibration.

Un rapport préliminaire de la phase II a fait l'objet d'une présentation détaillée au MTMD le 15 octobre 2022.

Sur la base des commentaires reçus, une population MATSim supplémentaire a été générée directement à partir de la base de données de l'Enquête Origine Destination (EOD) 2018 en utilisant les champs de pondération. Le plan initial, qui prévoyait l'utilisation de la population synthétique du projet R661.2, migre donc vers un processus de génération de population simplifié basé sur les données de l'EOD. Bien que le projet R661.2 ait développé un cadre avancé pour la génération de populations synthétiques, le nouvel algorithme offre une méthode plus directe pour intégrer les projections de croissance des personnes et de leurs déplacements, via les facteurs de pondération, dans le processus de génération de population. Cette approche permet ainsi une évaluation des scénarios plus fluide et efficace. De plus, grâce à sa dépendance directe aux facteurs de pondération, ce cadre s'aligne fidèlement sur la distribution origine-destination représentée par ces facteurs, garantissant des évaluations de scénarios plus comparables aux données existantes. Ce rapport présente en détail les algorithmes et le raisonnement ayant conduit à la génération de la population synthétique basée sur l'EOD, ainsi que sa validation.

Enfin, dans la phase III du projet, les tâches et améliorations suivantes ont été réalisées et apportées au modèle existant :

- Génération du réseau MATSim pour le transport en commun avec restrictions de virage basé sur le réseau EMME ;
- Génération du réseau MATSim avec restrictions de virage basé sur Open Street Map (OSM);
- Génération du réseau pour 2041 à partir des réseaux EMME et OSM, en intégrant les améliorations prévues au réseau routier et au transport en commun;
- Amélioration de la génération de la population synthétique EOD pour 2021 et 2041;
- Exécution du scénario pour 2021 et 2041 avec les deux réseaux.

Les sections 3 à 7 présentent la phase II du projet. La section 3 détaille les différentes améliorations apportées à la logique de modélisation effectuées sur le scénario MATSim Montréal pour obtenir un modèle plus réaliste. La section 4 décrit les améliorations apportées au réseau depuis la phase I. La section 5 présente la logique et l'algorithme derrière la génération de la population synthétique directement à partir de la base de données EOD. La section 6 présente ensuite une validation comparative des deux populations synthétiques. La section 7 décrit le processus de collecte et de traitement des données, la méthodologie adoptée, et une comparaison des résultats avant et après la calibration.

Les sections 8 à 12 présentent la phase 3 du projet. La section 8 détaille le processus et les défis rencontrés relativement à la génération du réseau basé sur EMME. La section 9 détaille le processus de génération du réseau basé sur OSM. La section 10 décrit le processus et les défis rencontrés relativement à la génération du réseau 2041 à partir des fichiers shape d'EMME 2041 et des données additionnelles regardant le développement futur du système de transport en commun. La section 11 décrit ensuite la logique améliorée pour la génération des populations synthétiques EOD de 2021 et 2041. Enfin, la section 12 passe brièvement en revue les scénarios de 2018, 2021 et 2041 dans les réseaux basés sur EMME et OSM.

Enfin, les sections 13, et 14 présentent des suggestions d'améliorations futures et concluent le rapport.

3 AMÉLIORATIONS À LA LOGIQUE DE MODÉLISATION

La logique de modélisation sous-jacente de MATSim a été améliorée dans trois domaines : le pointage des activités, la replanification et la mise à l'échelle des capacités.

3.1 Pointage des activités

Comme MATSim est un modèle basé sur les activités, il déduit la demande de déplacement à partir de la planification quotidienne des activités des individus. Le programme quotidien des activités, ainsi que les déplacements les reliant, sont stockés dans un « Plan ». L'efficacité d'un plan est évaluée sur la base de son pointage. Au fil des itérations, les individus (agents) cherchent à améliorer leur plan quotidien en modifiant différents aspects (itinéraire, mode, heure de départ, etc.) du plan (processus connu sous le nom de replanification) dans le but d'obtenir le meilleur pointage.

Le pointage total ou l'utilité d'un plan exécuté par un agent, S_{plan} , peut s'exprimer comme suit, où N représente le nombre d'activités et q correspond au déplacement suivant l'activité act :

$$S_{plan} = \sum_{q=0}^{N-1} S_{act,q} + \sum_{q=0}^{N-1} S_{trav,mode(q)} \quad (1)$$

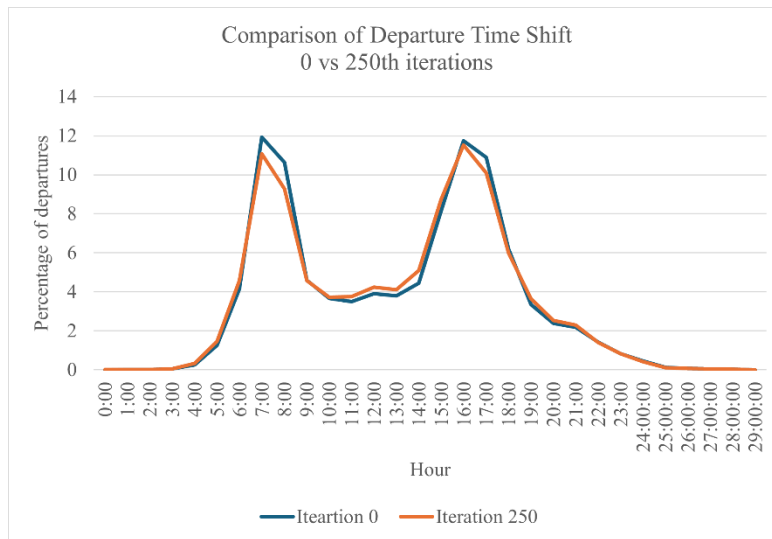
Le pointage des activités est basé sur la durée d'une certaine activité par rapport à sa durée typique et minimale (Charypar & Nagel 2005). Lorsqu'une activité dure moins que sa durée minimale, elle génère une cote d'utilité négative, tandis qu'au-delà de la durée typique, le gain marginal de pointage pour cette activité devient nul.

L'évaluation des activités permet de choisir l'heure de départ en fonction à la fois de la congestion du réseau et de la durée des activités. Par ailleurs, lorsqu'il existe des horaires d'ouverture et de fermeture, elle permet de prendre en compte les pénalités pour arrivées tardives et le départ anticipé pour chaque type d'activité. Les durées typiques et minimales des différents types d'activités sont désormais intégrées afin de mieux simuler le comportement des agents dans le scénario de MATSim Montréal.

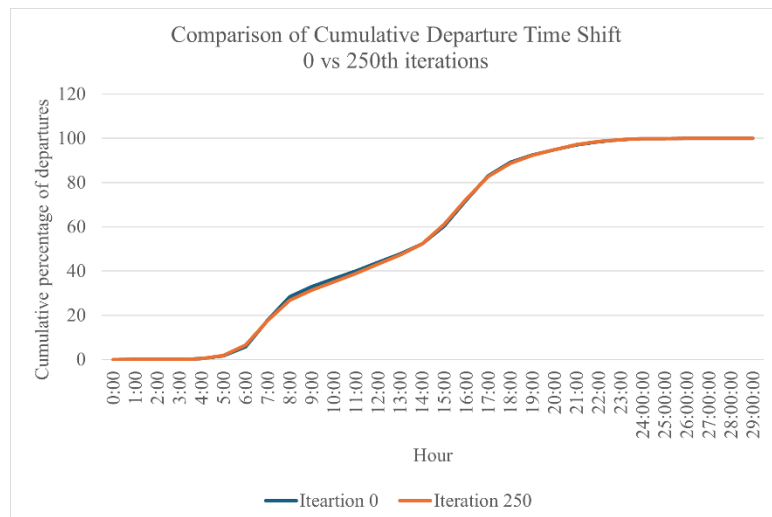
3.2 Mutation temporelle

À l'aide du pointage des activités, la mutation temporelle est incorporée au modèle amélioré en tant que stratégie de replanification par laquelle les agents tentent d'améliorer leurs plans. La stratégie de mutation temporelle permet aux agents de changer leur heure de départ de manière aléatoire dans une fenêtre de 15 minutes (prédéfinie). Une stratégie ultérieure de choix de mode et d'itinéraire détermine ensuite un mode et un itinéraire appropriés pour la nouvelle heure de départ de l'agent. Le décalage de l'heure de départ affecte la durée de l'activité précédant le voyage et modifie donc directement l'utilité de l'activité. Parallèlement, l'heure de départ, le mode et l'itinéraire modifiés affectent le coût du voyage et l'heure d'arrivée de l'agent pour l'activité suivante, modifiant à la fois sa durée et son heure de début. En tenant compte de l'effet temporel résultant, les agents atteignent un équilibre modifié avec le choix de l'heure de départ. La mutation temporelle permet de modifier les durées des activités ainsi que les pointages résultants des activités et des déplacements, ce qui influence l'équilibre et améliore ainsi le réalisme du modèle.

La Figure 1 illustre le déplacement de la distribution des heures de départ avant et après l'atteinte de l'équilibre dans une simulation à 5 %.



(a)



(b)

Figure 1 Déplacement des heures de départ en raison de la mutation temporelle : (a) distribution des heures de départ (b) distribution cumulative des heures de départ.

3.3 Mise à l'échelle des capacités

Comme MATSim simule le mouvement spatial et temporel des agents avec une résolution très fine, le temps de calcul de MATSim devient souvent un enjeu lorsqu'il est appliqué à un scénario à grande échelle comme Montréal. Pour résoudre ce problème, il est courant dans la communauté MATSim d'utiliser une version réduite du scénario d'origine, où un échantillon représentatif de la population d'origine est généré de manière aléatoire, et une échelle correspondante est appliquée à la capacité routière (capacité de flux du lien et capacité de stockage du lien). Llorca & Moeckel, (2019) analysent en détail comment la mise à l'échelle des capacités influence la représentativité des résultats de simulation en fonction du taux de mise à l'échelle. Les meilleures pratiques y sont également décrites, et ont été adoptées dans notre modèle pour améliorer la représentativité de la simulation par rapport au scénario à 100%.

L'application de la mise à l'échelle des capacités sur le réseau routier physique est facilement réalisée en appliquant un facteur d'échelle représentatif sur la capacité de flux et la capacité de stockage de chaque lien. Cependant, l'application de l'échelle au système de transport en commun devient compliquée sur deux fronts. Premièrement, le nombre de voitures équivalentes de chaque véhicule de transport en commun doit être ajusté afin que les véhicules puissent circuler dans le réseau physique réduit et en même temps maintenir un volume représentatif sur le réseau. Deuxièmement, pour garantir un temps d'attente représentatif, il est nécessaire de maintenir les taux de départ ou les intervalles de départ de la planification d'origine tout en modifiant la capacité d'embarquement. Dans le dernier scénario effectué, la logique de mise à l'échelle est étendue au système de transport en commun, où la capacité d'embarquement des passagers est réduite selon un facteur d'échelle similaire à celui de la population et du réseau routier pour chacun des départs de véhicules de transport en commun. De plus, l'équivalence en voiture de chacun des véhicules en route est réduite pour maintenir une charge représentative sur le réseau routier. Cette modification est essentielle, car elle améliore la représentativité des scénarios réduits dans la simulation et l'analyse de problèmes du monde réel à l'aide du modèle MATSim Montréal.

Ce projet utilise deux approches pour la génération de la population. La première approche, appelée ici population Eqasim, utilise les valeurs marginales des données du recensement sur divers paramètres socio-économiques pour générer la population synthétique, à laquelle sont ensuite assignées des chaînes d'activités et de déplacements basées sur -les données EOD. La deuxième approche, appelée ici population EOD, utilise directement les facteurs de pondération (facmen, facper et facdep) de la base de données EOD pour créer la population synthétique.

Lors du processus de mise à l'échelle avec la première approche, les valeurs marginales du recensement sont réduites avant la génération de la population. Avec la deuxième approche, les facteurs de pondération sont réduits avant la génération de la population. Dans les deux cas, quel que soit le taux de mise à l'échelle, une population synthétique est d'abord générée à partir des données du recensement et/ou de l'EOD, avant que lui soit assignée les activités et les déplacements, qui servent de demande initiale dans le modèle MATSim.

4 AMÉLIORATIONS DU RÉSEAU DE TRANSPORT EN COMMUN

Le réseau routier et de transport en commun (TC) a été considérablement amélioré pour le scénario MATSim Montréal depuis la phase I. Les données de spécification générale pour les flux relatifs au transport en commun (GTFS) les plus récentes disponibles en ligne ont été utilisées pour effectuer les améliorations du réseau de TC.

Les améliorations peuvent être classées dans les catégories suivantes.

- Extension du réseau;
- Correction de la capacité du réseau;
- Amélioration du réseau de TC (correction des liens artificiels).

Une discussion détaillée pour chacune des améliorations est présentée dans cette section.

4.1 Extension du réseau de transport en commun

Le réseau de transport en commun utilisé pour le scénario MATSim Montréal est étendu de l'île de Montréal à la grande région de Montréal.

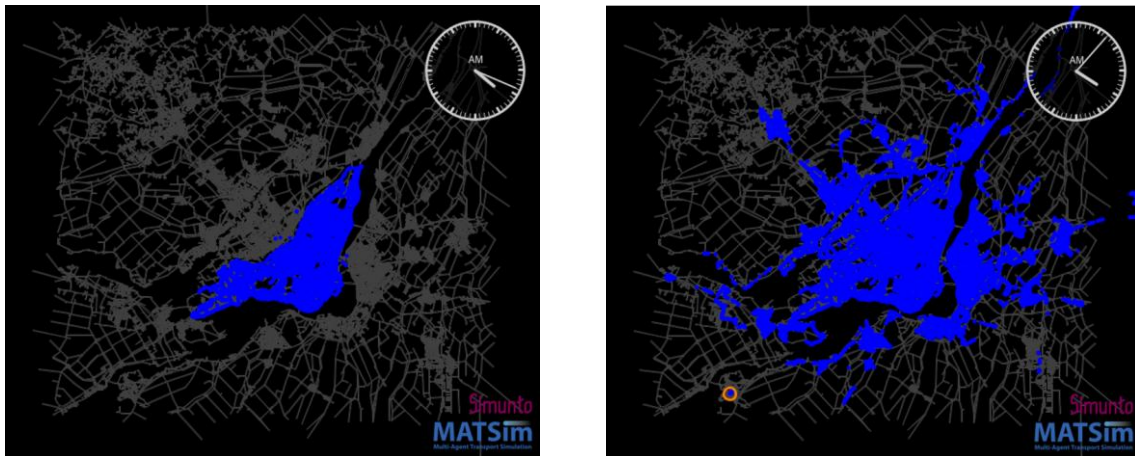


Figure 2 Réseau Phase I (gauche) vs. Phase II (droite)

La Figure 2 présente le réseau avant et après l'extension. Le réseau utilisé pour la phase I compte 9 535 arrêts et 230 lignes de transport en commun, provenant des données GTFS de la STM. Pour les phases II et III, les données GTFS du réseau de transport en commun de la STL, du RTL, d'Exo et des bus Exo sont incorporées. Le nouveau réseau étendu contient 24 205 arrêts de transport en commun et 762 lignes de transport en commun.

4.2 Correction de la capacité du réseau

En simulant le scénario multimodal pour le réseau de Montréal étendu présenté à la section 4.1 certains agents utilisant le transport en commun ne peuvent pas terminer leur plan quotidien en raison de blocages dans le système de transport en commun causés par des correspondances manquées. La Figure 3 (a) illustre le nombre de départs (en rouge), d'arrivées (en bleu) et d'agents en route (en vert) au fil du temps de simulation. La Figure 3 (b) montre le retard moyen d'arrivée et de départ des véhicules de transport en commun au cours de la journée simulée.

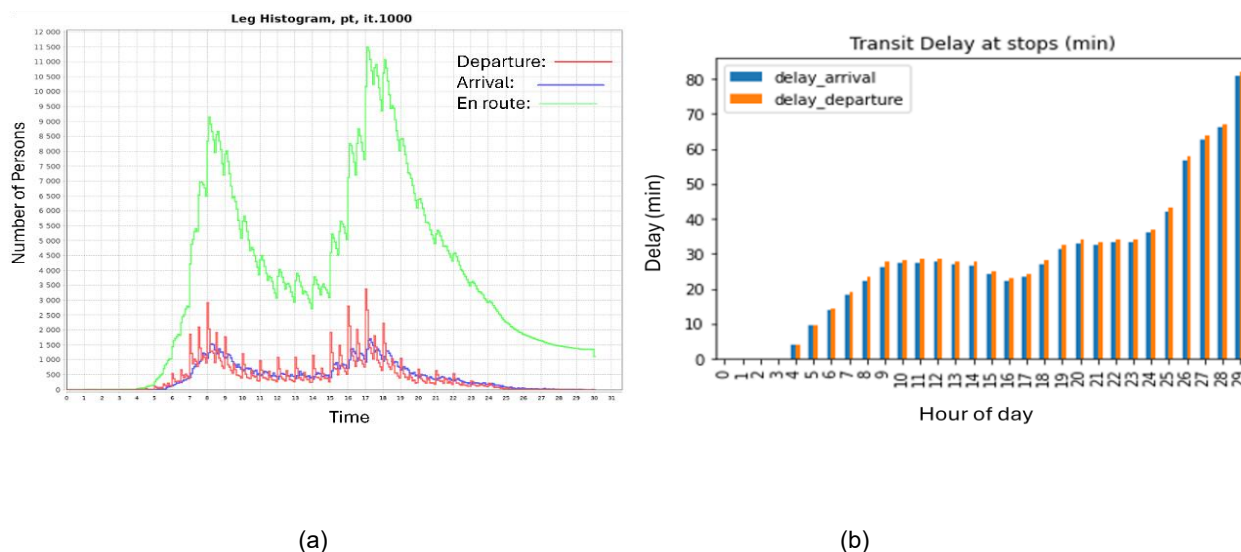


Figure 3 Agents bloqués en route à la fin de la journée simulée en raison du retard dans le transport en commun

La Figure 3 (a) révèle que certains agents sont toujours en route à la fin de la journée simulée, donc qu'ils n'ont pas réussi à se rendre à destination en utilisant le réseau modélisé. La Figure 3(b) trace le retard moyen par rapport aux horaires d'arrivée et de départ des véhicules de transport en commun tout au long de la journée de simulation. Le graphique montre un retard moyen maximal d'environ 80 minutes dans le système de transport en commun à la fin de la journée, accumulé au fil du temps de simulation. Une enquête plus approfondie révèle que ce phénomène se produit en raison d'une capacité inférieure à la réalité, mise en place pour simuler l'effet des feux de circulation sur certains liens du réseau routier physique. La Figure 4 illustre les agents bloqués en route à la fin de la journée simulée et le retard correspondant dans le système de transport en commun à la suite de l'application d'une correction de capacité présentée en détail dans le La comparaison de la Figure 4 (b) et de la Figure 3 (b) illustre une réduction du retard dans le système de transport en commun de 80 minutes à 7 minutes après les modifications de capacité du réseau, indiquant une amélioration substantielle des retards du système de transport en commun. Le nombre d'agents en route bloqués a diminué d'environ 1800 à 600, indiquant que davantage d'agents ont pu exécuter leur plan quotidien dans la fenêtre de temps de simulation fournie. Toutefois, la Figure 3 indique que le problème d'accumulation de retard persiste dans le système de transport en commun même après les corrections de capacité du réseau. Cette question sera examinée plus en détail dans des travaux ultérieurs.

La méthode employée pour déterminer les valeurs de vitesse et de capacité utilisées dans le modèle peut être détaillée ainsi. La vitesse est directement issue des données OSM lorsqu'elles sont disponibles, tandis que la capacité est estimée en fonction des attributs des liens extraits d'OSM. Étant donné que MATSim ne prend pas en compte les feux de circulation, un facteur de réduction de la vitesse et de la capacité avait été précédemment introduit, celui-ci ayant principalement été déterminé par essais et ajustements. Toutefois, comme mentionné précédemment, cette réduction a entraîné une accumulation de retards dans le système de transport en commun au fil de la simulation. Afin d'atténuer ce problème, la capacité a été ajustée en appliquant des règles de vitesse et de capacité fondées sur les types de liens, lesquelles correspondent aux valeurs typiques pour les types de routes du réseau montréalais.

et à la Figure 5

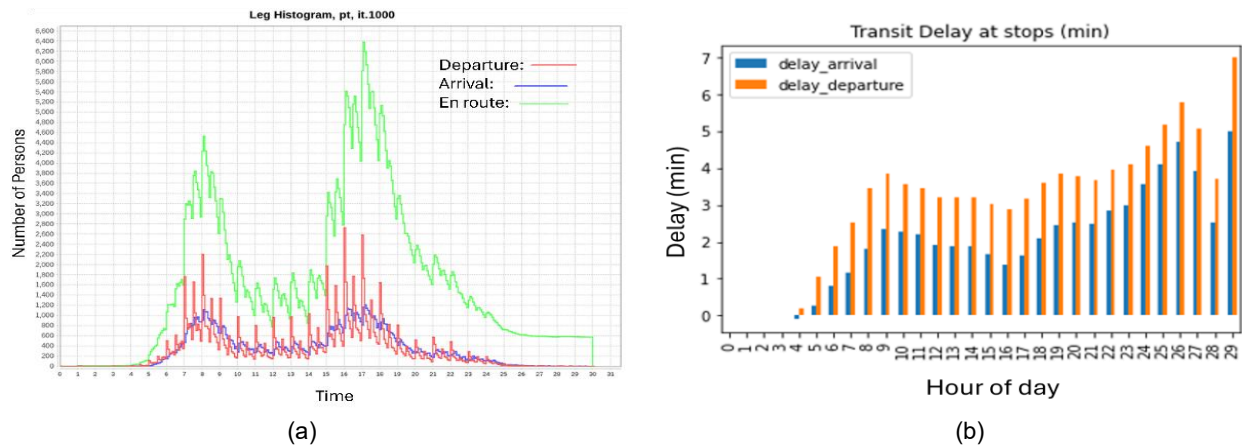


Figure 4 Agents bloqués en route à la fin de la journée simulée en raison du retard dans le transport en commun

La comparaison de la Figure 4 (b) et de la Figure 3 (b) illustre une réduction du retard dans le système de transport en commun de 80 minutes à 7 minutes après les modifications de capacité du réseau, indiquant une amélioration substantielle des retards du système de transport en commun. Le nombre d'agents en route bloqués a diminué d'environ 1800 à 600, indiquant que davantage d'agents ont pu exécuter leur plan quotidien dans la fenêtre de temps de simulation fournie. Toutefois, la Figure 3 indique que le problème d'accumulation de retard persiste dans le système de transport en commun même après les corrections de capacité du réseau. Cette question sera examinée plus en détail dans des travaux ultérieurs.

La méthode employée pour déterminer les valeurs de vitesse et de capacité utilisées dans le modèle peut être détaillée ainsi. La vitesse est directement issue des données OSM lorsqu'elles sont disponibles, tandis que la capacité est estimée en fonction des attributs des liens extraits d'OSM. Étant donné que MATSim ne prend pas en compte les feux de circulation, un facteur de réduction de la vitesse et de la capacité avait été précédemment introduit, celui-ci ayant principalement été déterminé par essais et ajustements. Toutefois, comme mentionné précédemment, cette réduction a entraîné une accumulation de retards dans le système de transport en commun au fil de la simulation. Afin d'atténuer ce problème, la capacité a été ajustée en appliquant des règles de vitesse et de capacité fondées sur les types de liens, lesquelles correspondent aux valeurs typiques pour les types de routes du réseau montréalais.

Tableau 1 Règles de correction de la capacité du réseau basées sur les types de liens

Type	Vitesse (m/s)	Capacité par voie (véh/h)
motorlink	27.78	2000
trunk	19.44	1800
primary	19.44	1500
secondary	13.89	1000
tertiary	13.89	600
residential	8.33	600
living_street	8.33	300

Dans la version la plus récente du modèle, un affinage additionnel des paramètres de capacité et de vitesse a été effectué afin de les aligner au mieux avec les données d'OSM, tout en apportant des ajustements minimaux aux capacités des liens résidentiels, comme précisé dans les scénarios OSM 2021 et 2041. Les liens résidentiels, qui servent à la fois de source et de puits dans MATSim, ont été modifiés pour réduire la congestion artificielle causée par des agents introduits sur les liens résidentiels situés à la frontière du réseau, en particulier ceux appartenant aux groupes de voyageurs de passage ou effectuant des trajets externes-internes et internes-externes. Étant donné que les liens résidentiels représentent rarement une connexion entre les parties principales du réseau, ces ajustements ont un impact négligeable sur l'équilibre global. La répartition de la capacité et de la vitesse des liens avant la phase II et après la phase III est illustrée dans la Figure 5.

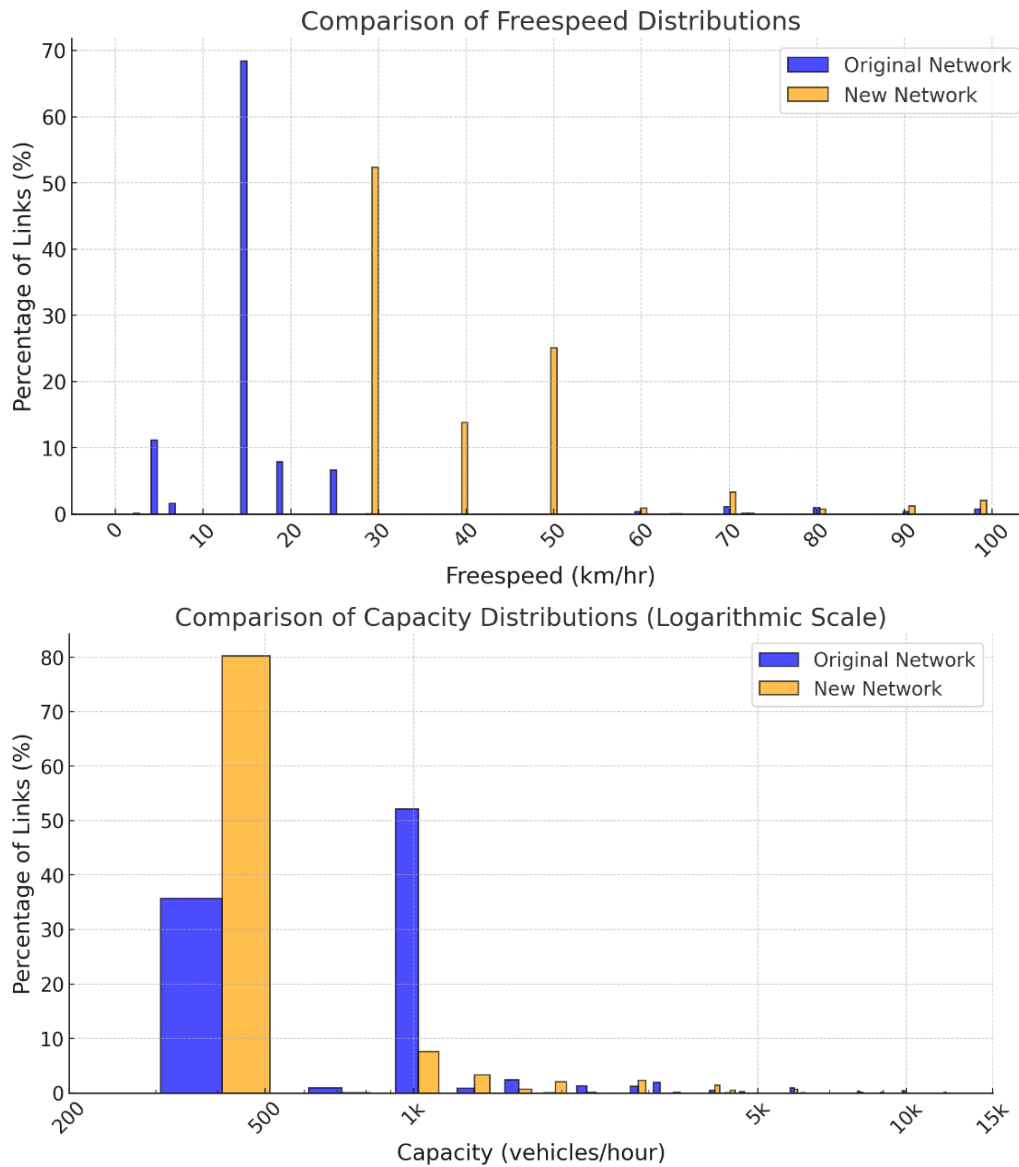


Figure 5 Distribution de la capacité et de la vitesse libre des liens avant (à gauche) et après (à droite) la modification de la capacité du réseau.

La Figure 6 montre les retards dans le système de transport en commun dans les scénarios 2021 et 2041 respectivement après les dernières améliorations de la capacité et de la vitesse.

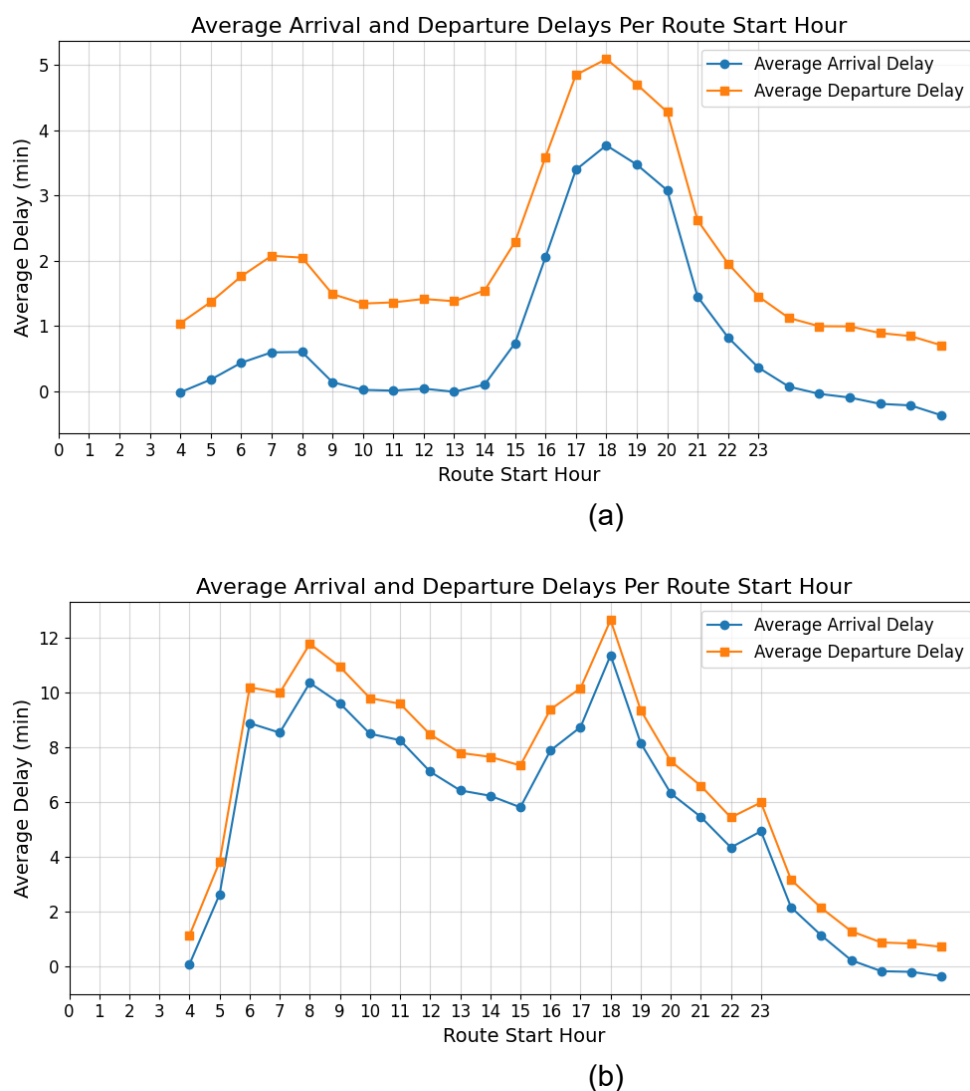


Figure 6 Retard des transports en commun dans les scénarios 2021 (a) et 2041 (b)

4.3 Amélioration du réseau de transport en commun (Correction des liens artificiels)

Le logiciel PtToMATSim (Poletti 2016) est utilisé pour codifier à la fois le réseau de transport en commun et les horaires de transport en commun à partir des données OSM et des données GTFS pour la grande région de Montréal.

Pt2MATSim est un outil logiciel conçu pour intégrer les horaires de transport en commun issus des données GTFS sur un réseau routier physique. Les données GTFS incluent généralement les coordonnées des arrêts de transport en commun et les séquences d'arrêts, qui doivent être associées aux liens routiers physiques et aux séquences de liens correspondantes afin d'être intégrées dans des simulations multimodales.

Le processus commence par l'identification, par Pt2MATSim, des liens candidats, c'est-à-dire des liens routiers physiques du réseau auxquels un arrêt de transport en commun pourrait

logiquement être connecté. Le logiciel utilise des hyperparamètres configurables, tels que le multiplicateur de distance des candidats, la distance maximale des liens candidats et le seuil $nLink$, pour définir les critères de recherche et déterminer les liens les plus appropriés pour chaque arrêt. Une fois les liens candidats identifiés, Pt2MATSim évalue toutes les combinaisons possibles de ces liens pour une séquence d'arrêts donnée afin de générer des itinéraires de transport.

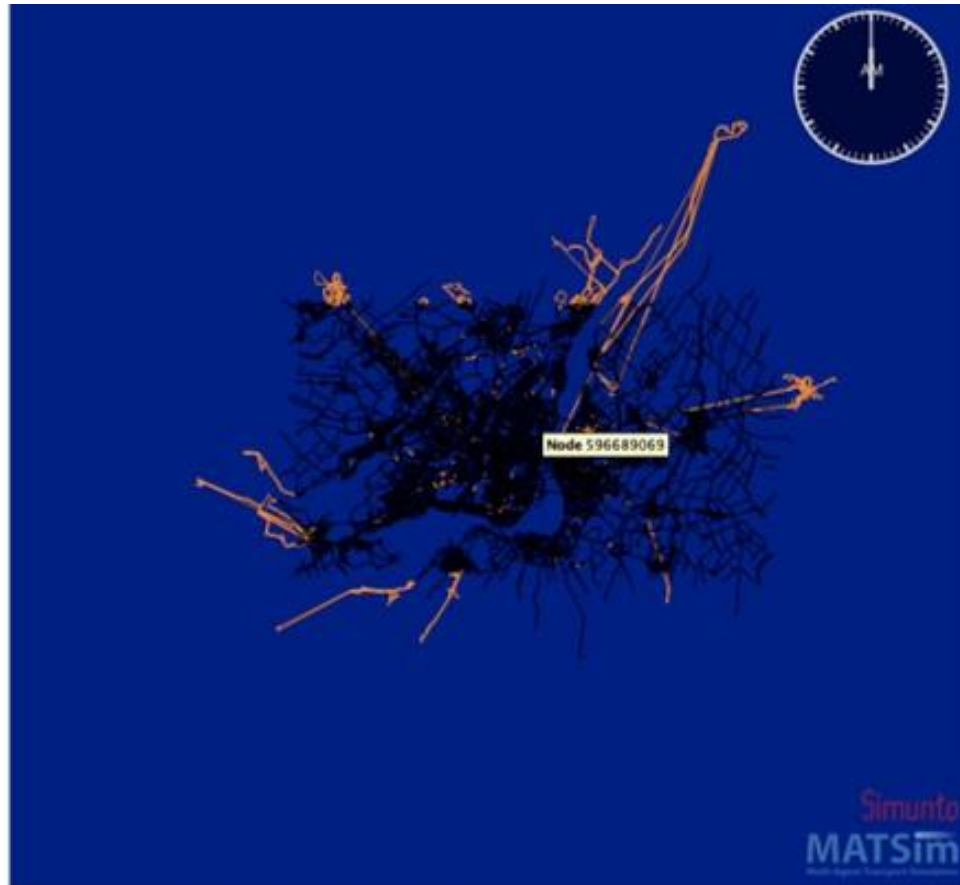
Pour garantir la plausibilité des itinéraires générés, Pt2MATSim applique un facteur maximal de coût de déplacement, qui limite le temps de trajet autorisé pour un itinéraire généré en fonction du temps de déplacement prévu dans les données GTFS. Si le réseau physique ne permet pas de générer un itinéraire valide dans ces contraintes, Pt2MATSim crée des liens artificiels pour combler les lacunes. Ces liens artificiels garantissent que le réseau de transport en commun reste complet, fonctionnel et aligné avec les horaires GTFS, permettant ainsi une intégration fluide dans des simulations multimodales. Le lecteur intéressé peut se référer à [Poletti \(2016\)](#) ou à la page wiki *Pt2MATSim* et *Pt2MATSim algorithme* pour en savoir plus sur le principe de fonctionnement et les hyperparamètres utilisés dans le logiciel.

La création de liens artificiels est un sous-produit de l'application du logiciel PtToMATSim lors de la génération du système de transport en commun. Les liens artificiels sont créés pour les raisons suivantes :

- Aucun chemin réseau n'a été trouvé entre deux arrêts de transport en commun dans un itinéraire.
- Le chemin le moins coûteux entre deux arrêts a un coût (temps de parcours) supérieur au coût défini en fonction de l'horaire de transport en commun.

Les liens artificiels sont nécessaires, car le réseau physique peut parfois omettre certains liens de transport en commun souterrains (c-à-d des liens de métro). Ils peuvent également être créés lorsque le réseau physique se termine à une certaine limite, alors que le système de transport en commun se poursuit jusqu'à une ville voisine.

La Figure 7 représente les 6287 liens artificiels en orange générés pour le réseau de Montréal, en utilisant la valeur par défaut des paramètres mentionnés.



(a)



(b)



(c)

Figure 7 Liens artificiels avec les paramètres PtToMATSim par défaut

Figure 7 illustre plusieurs liens artificiels passant au-dessus des plans d'eau, ce qui indique une correspondance incorrecte entre certaines installations et itinéraires de transport en commun et le réseau réel de transport en commun de Montréal. Les paramètres PtToMATSim ont été changés manuellement et des centaines de scénarios ont été testés pour identifier l'ensemble de paramètres optimal qui permet d'obtenir la meilleure correspondance du système de transport en commun avec le réseau routier physique de Montréal. La meilleure

correspondance est quantifiée par une faible quantité de liens artificiels requis. Le Tableau 2 présente les paramètres calibrés utilisés pour la cartographie du transit dans le logiciel pt2Matsim qui ont permis d'obtenir le moins de liens artificiels au cours de la phase II.

Tableau 2 Paramètres calibrés pour pt2MATSim

Paramètre	Défaut	Calibré
Multiplicateur de distance des candidats	1.5	5
Distance maximale des liens candidats	90	1000
Facteur maximal de coût de déplacement	5	200
Seuil nLink	6	10

La Figure 8 montre le réseau OSM restreint généré lors de la phase III avec 1251 liens artificiels.

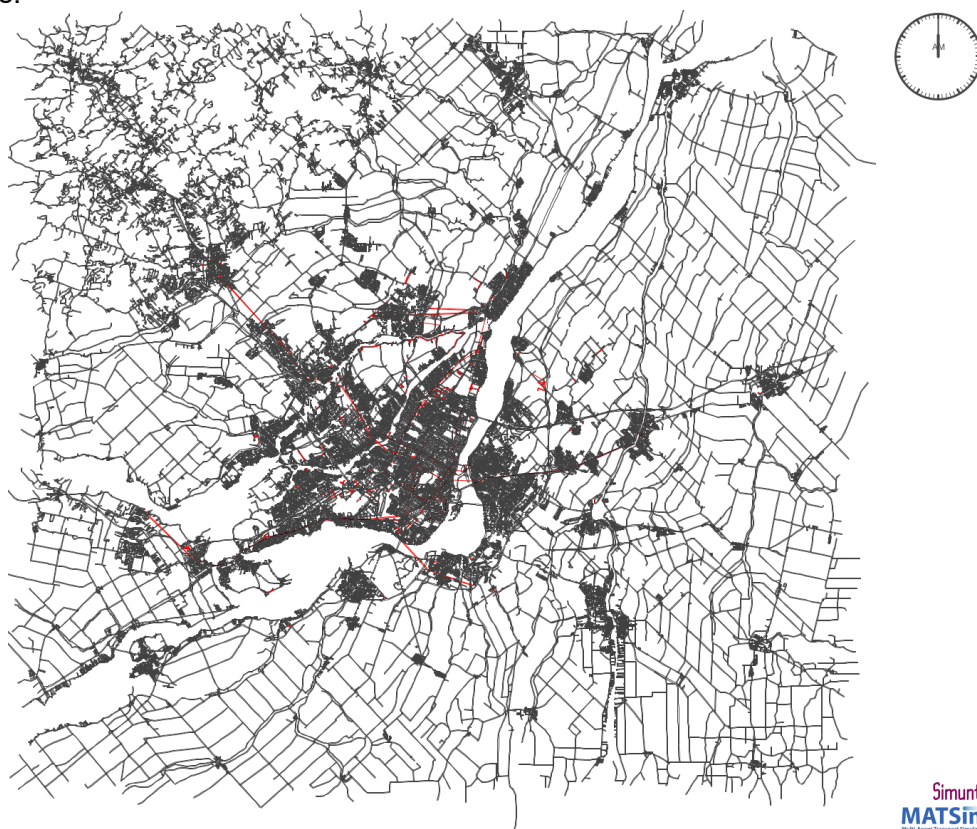


Figure 8 Réseau OSM 2021 avec restrictions de virage de la Phase III, comprenant 1251 liens artificiels.

La phase III inclut une amélioration de la cartographie du réseau de transport en commun et une réduction additionnelle du nombre de liens artificiels. Le réseau OSM restreint créé au cours de la phase III compte 1251 liens artificiels, alors que le meilleur réseau de la phase II en compte 3127.

5 GÉNÉRATION DE LA POPULATION SYNTHÉTIQUE À PARTIR DE L'EOD 2018

La génération d'une population synthétique constitue une étape fondamentale dans la création de simulations basées sur les agents. Son objectif principal est de développer un échantillon représentatif de la population réelle, intégrant les principales caractéristiques démographiques et comportementales de celle-ci. De plus, le processus de génération de population synthétique permet de créer des scénarios échantillonnés à plus petite échelle, réduisant ainsi la complexité de traitement informatique et le temps de simulation tout en préservant la validité des résultats.

Dans ce contexte, il est important d'expliquer pourquoi la génération de populations synthétiques est nécessaire pour des scénarios avec un échantillon réduit à 5 % ou moins, au lieu d'utiliser directement la base de données de l'EOD 2018, qui contient déjà un échantillon de 5 %. La raison principale réside dans le fait que, bien que les données OD représentent efficacement les motifs de déplacement, elles ne reflètent pas de manière adéquate les caractéristiques sociodémographiques des personnes exécutant ces déplacements. Cela explique le recours à des champs de pondération calculés pour l'échantillon de données OD, tels que **facmen**, **facdep** et **facper**, qui affichent des valeurs différentes pour chaque ligne de l'échantillon. Ces variations montrent que chaque entrée de l'échantillon dans la base de données OD représente un nombre différent d'individus, de ménages et de déplacements. Une méthode de génération d'une population synthétique permet de s'affranchir d'un facteur d'expansion, grâce à une représentation complètement énumérée de la population dans la simulation.

Comme indiqué dans les sections précédentes, deux approches distinctes ont été testées pour générer des populations synthétiques. La première approche, appelée **chaîne de traitements Eqasim** dans ce rapport, utilise la méthodologie de génération de populations synthétiques Eqasim de MATSim. Cette chaîne de traitements commence par créer une population synthétique conforme aux valeurs marginales des caractéristiques socioéconomiques issues de la base de données du recensement. Ensuite, il attribue des déplacements et des chaînes d'activités comprenant leurs localisations respectives, à la population synthétique générée en s'appuyant sur la base de données OD.

La deuxième approche, appelée **chaîne de traitements EOD**, adopte une méthode différente. Au lieu de construire une population représentative à partir des données du recensement, elle repose sur les poids représentatifs fournis par le MTMD, spécifiquement les champs de pondération **facmen**, **facper** et **facdep**. Cette méthode génère directement la population synthétique et ses déplacements en clonant les données d'enquête de manière proportionnelle à ces poids.

Chaque approche présente des avantages et des limites. La chaîne de traitements Eqasim propose une méthodologie complète et flexible, qui permet l'intégration de plusieurs jeux de données, allant des données brutes du recensement à la population synthétique finale. Cependant, cette intégration peut entraîner des écarts par rapport aux comportements de mobilité observés dans la base de données OD, notamment en ce qui concerne la distribution des origines et des destinations des déplacements, en raison de la combinaison de plusieurs ensembles de données. En revanche, la chaîne de traitements EOD respecte plus strictement la distribution des origines et des destinations des déplacements, puisqu'elle n'intègre pas plusieurs jeux de données. De plus, elle permet une intégration fluide au processus de modélisation utilisé par le MTMD, en exploitant ses poids représentatifs, tout en s'appuyant sur une logique sous-jacente plus simple.

Lors de la génération d'une population à partir de la base de données EOD 2018 ou de la validation d'une population synthétique à l'aide de cette base, il est important de comprendre les facteurs de pondération : les champs **facmen18**, **facper18** et **facdep18**, qui correspondent respectivement aux facteurs de pondération pour les ménages, les individus et les déplacements. Le facteur de pondération des ménages extrapole les données pour représenter le nombre total de ménages, le facteur associé aux individus extrapole les données pour refléter la population totale, et le facteur associé aux déplacements extrapole les données pour représenter le nombre total de déplacements. Cependant, bien que l'objectif de ces facteurs de pondération soit bien défini, leur utilisation combinée pour des mesures impliquant ces trois facteurs peut manquer de précision, car les valeurs de ces facteurs ne sont pas toujours identiques pour les données collectées au sein d'un même ménage ou au sein d'une même personne.

Bien que les données EOD fournissent des informations détaillées et cohérentes sur les ménages, leurs membres et les déplacements effectués par chacun d'eux, elles restent un échantillon plutôt qu'une représentation de l'ensemble de la population. Le logiciel Eqasim, développé par l'équipe de MATSim, propose une méthode structurée pour générer des populations synthétiques représentatives en combinant les données des enquêtes sur les déplacements avec les informations issues des recensements. Eqasim crée une population synthétique en alignant des contraintes marginales sur les caractéristiques des ménages et des individus extraites des données du recensement. En utilisant les données EOD, il calcule les distributions des ménages et des types d'activités primaires et secondaires pour des sous-groupes d'individus partageant des caractéristiques communes. Les emplacements des activités sont déterminés en fonction de la distribution des distances et de la disponibilité des installations autour du lieu de départ principal d'un individu. Ces activités sont ensuite reliées pour générer des déplacements, avec une attribution des modes de transport basée sur la distribution des choix modaux présents dans les données EOD. Cependant, en combinant deux sources de données – le recensement et les enquêtes sur les déplacements – la population résultante peut légèrement s'écarter des distributions des déplacements rapportées dans la base de données EOD. Additionnellement, plus les caractéristiques incluses sont détaillées, plus les données disponibles pour les distributions des sous-groupes sont limitées, ce qui peut réduire la précision.

À l'inverse, pour la population EOD, les facteurs de pondération fournis dans les données EOD sont utilisés pour estimer les distributions nécessaires à la génération d'une population synthétique de la taille souhaitée. Un avantage clé de cette méthode, par rapport à la population générée par Eqasim, réside dans sa capacité à préserver directement les déplacements déclarés par les répondants des EOD. De plus, cette approche s'intègre au processus existant de génération des prévisions du MTMD en exploitant les poids représentatifs calculés par le MTMD (**facmen**, **facper** et **facdep**). L'utilisation directe de ces facteurs de pondération simplifie le processus de génération de population et améliore la compatibilité avec la structure des données et la méthodologie déjà établies par le MTMD.

Bien qu'étant la plus réaliste par rapport aux données sources, la population EOD présente les deux problèmes suivants :

En raison de l'inégalité des différents facteurs de pondération (ménage, individu et déplacement) d'un même enregistrement, les ménages ne peuvent pas être clonés parfaitement. Ces différences proviennent de divers facteurs, tels que les corrections de biais (journée d'enquête, groupes d'âge et de sexe au sein des ménages, ou mobilité inconnue). Par conséquent, il peut y avoir trop ou trop peu d'individus dans les ménages lorsque le facteur de pondération des individus diffère du facteur de pondération des ménages. Un problème similaire se pose pour les déplacements effectués par un même individu, lorsque le facteur de pondération des déplacements diffère du facteur de pondération des individus. Il peut donc

y avoir des individus non attribués à un ménage et des déplacements non attribués à un individu, selon l'algorithme utilisé pour résoudre ce problème.

Les discontinuités dans certaines chaînes de déplacements déclarées ont engendré le développement d'une méthode d'insertion de déplacements fantômes. Ces discontinuités surviennent lorsque l'origine d'un déplacement effectué par un individu ne correspond pas à la destination du déplacement précédent effectué par le même individu. L'ajout de déplacements fantômes permet d'assurer la continuité des chaînes de déplacements, mais peut altérer la distribution des paires origine-destination, des distributions activité-à-activité et des choix de mode, ce qui peut différer de la réalité individuelle des individus. Il y a 175 occurrences de tels cas, représentant moins de 0,1 % des paires de déplacements. Avec cette méthode, les données EOD sont directement extrapolées plutôt qu'utilisées pour générer une distribution. Par conséquent, les valeurs manquantes dans les données (origine du déplacement, destination et heure de départ) doivent être traitées au préalable afin de garantir des distributions marginales cohérentes pour les ménages, les individus et les déplacements.

Lors de la génération de la population EOD, des vérifications sont faites afin que la correction de biais initiale appliquée par le biais des facteurs de pondération des déplacements reste inchangée. Le nombre total de déplacements correspond à la somme des facteurs de pondération des déplacements. Cependant, les facteurs de pondération des ménages sont ajustés à la valeur minimale de l'ensemble de leurs facteurs de pondération, des membres et des déplacements pour tous les membres et déplacements au sein d'un même ménage. De même, les facteurs de pondération des membres sont ajustés à la valeur minimale entre le facteur de pondération du membre et les facteurs de pondération des déplacements pour tous les déplacements effectués par ce membre.

Dans les cas où le facteur de pondération des membres permet de créer plus de membres que le facteur de pondération du ménage ne le permet pour une paire ménage-membre donnée, des membres supplémentaires, sans ménage associé, sont générés afin de maximiser le nombre de membres avec des chaînes de déplacements cohérentes. De même, lorsque les facteurs de pondération des déplacements dépassent le facteur de pondération du membre correspondant, des membres distincts avec des déplacements uniques sont créés. Cette approche donne la priorité à la préservation de la distribution initiale des déplacements et de la correction de biais associée, tout en maintenant la cohérence interne au sein de la population synthétique.

5.1 Traitement des données EOD

Les étapes de prétraitement suivantes ont été appliquées à la base de données EOD :

Premièrement, les localisations d'activités en dehors du territoire couvert par les secteurs de recensement ont été remplacés par les AD, car les AD existent sur l'ensemble du territoire canadien. En utilisant des outils de système d'information géographique (SIG), des identifiants d'AD ont été générés pour toutes les coordonnées valides des origines, destinations et emplacements des ménages. Pour les AD situées en dehors des limites du réseau, nous avons attribué à la localisation, l'AD la plus proche au sein du réseau, déterminée comme étant géographiquement la plus proche des coordonnées initiales.

Deuxièmement, pour les AD d'origine ou de destination nulles restantes, ces lacunes ont été comblées en utilisant les informations provenant du déplacement précédent ou suivant dans la chaîne de déplacements, si de tels déplacements existent. Les origines nulles pour les premiers déplacements de la chaîne ont été complétées à l'aide de l'emplacement du ménage, si disponible.

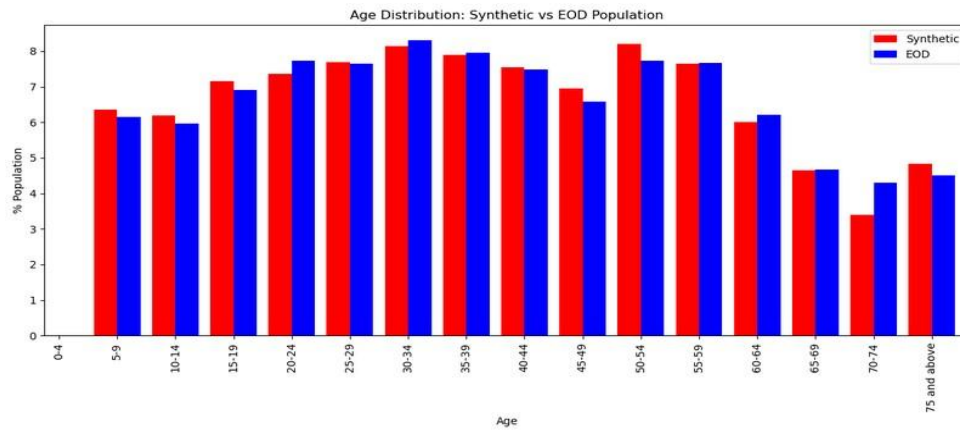
Enfin, des valeurs ont été attribuées à toute valeur de localisation nulle non résolue en échantillonnant aléatoirement des valeurs non nulles du même champ, catégorisées par localisation et activité, lorsque ces données étaient disponibles. Par exemple, une AD d'origine manquante dans un échantillon de déplacement avec une destination valide pourrait être complétée en échantillonnant aléatoirement une AD d'origine parmi les déplacements ayant la même AD de destination et le même type d'activité que l'échantillon de déplacement.

6 VALIDATION COMPARATIVE DES POPULATIONS SYNTHÉTIQUES

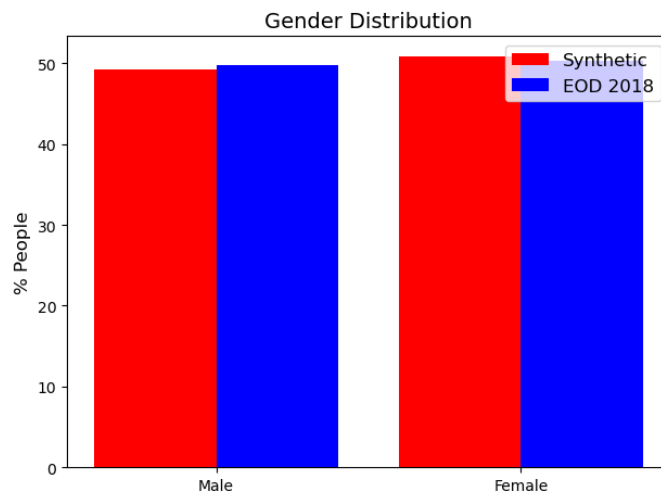
Comme mentionné précédemment, deux méthodes distinctes ont été employées pour la génération de population synthétique : le logiciel **Eqasim** (désigné comme la *population Eqasim*) et une approche directe basée sur l'enquête de déplacements **EOD 2018** (désignée comme la *population EOD*). Cette section présente les résultats de validation des deux populations synthétiques. Les graphiques, principalement exprimés en pourcentage, comparent les populations Eqasim et EOD à la base de données de l'enquête EOD. Pour ces comparaisons, les facteurs de pondération de 2018 (facmen, facper et facdep) sont appliqués lors de l'extraction des données de l'EOD pour les comparer à la population Eqasim, et les pondérations de 2021 sont appliquées pour l'extraction des données de l'EOD destinées à la comparaison avec la population EOD. Ces années correspondant aux facteurs utilisés pour générer respectivement les populations Eqasim et EOD.

6.1 Âge et Genre

Comme la version actuelle de la simulation n'intègre ni l'âge ni le sexe des agents dans les calculs, les mesures agrégées pour comparer l'âge et le sexe entre les populations synthétiques et les données EOD sont considérées suffisantes. Les Figure 9 (a) et (b) montrent la comparaison de la répartition par âge et sexe entre la population synthétique Eqasim et l'EOD. Les Figure 10 (a) et (b) montrent la comparaison de la répartition par âge et sexe pour la population synthétique EOD et l'EOD.

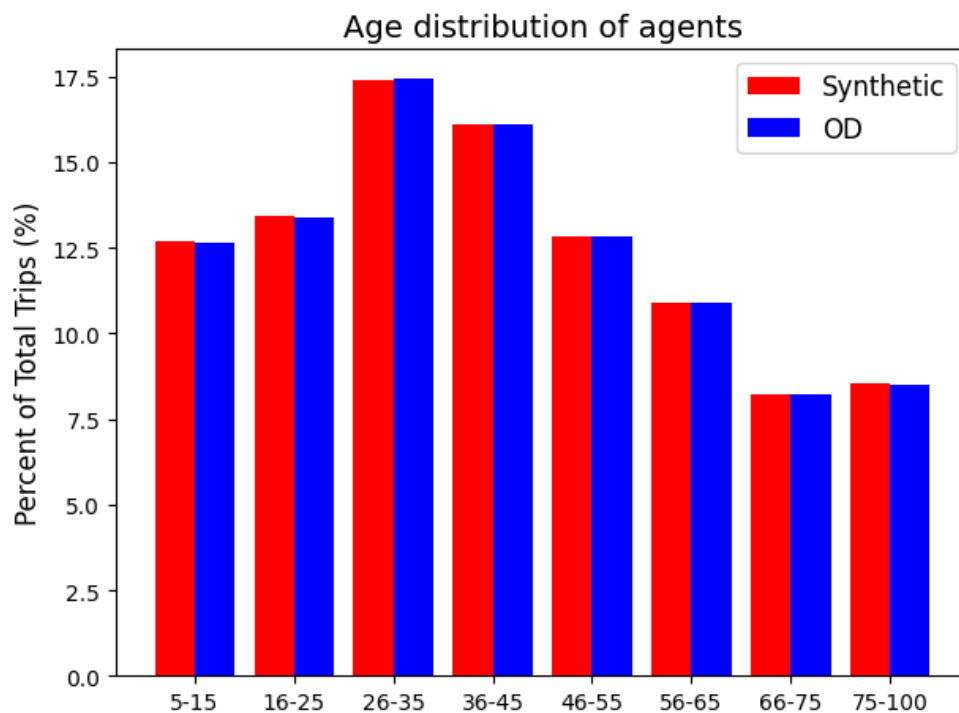


(a)

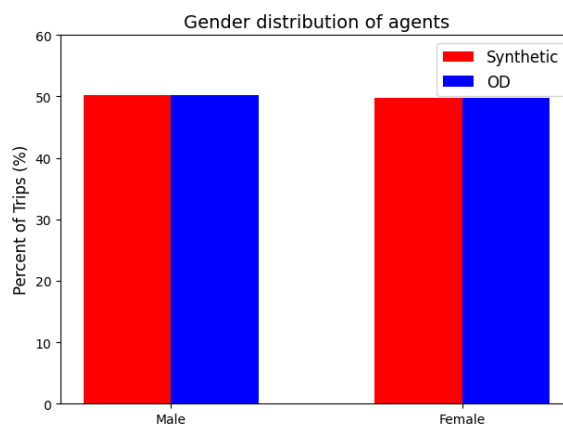


(b)

Figure 9 Distribution par âge et par genre pour la population synthétique Eqasim vs données EOD



(a)



(b)

Figure 10 Distribution par âge et par genre pour la population synthétique EOD vs données EOD

Comme prévu, pour le sexe et l'âge, la population synthétique EOD reflète mieux la distribution des données de l'enquête EOD que celle générée par Eqasim. Cette dernière est néanmoins largement fidèle à la distribution de l'EOD et les écarts observés sont minimes.

6.2 Distribution des Activités

Les Figure 11 et Figure 12 représentent la répartition des motifs d'activités pour les déplacements. Dans le cas de la population EOD, un type d'activité supplémentaire appelé commissions (errands) est ajouté. Ceci permet surtout de corriger la surestimation des déplacements pour le travail. En sens général, comme décrit précédemment, la population

synthétique EOD présente une plus grande cohérence avec l'enquête EOD par rapport à la population Eqasim.

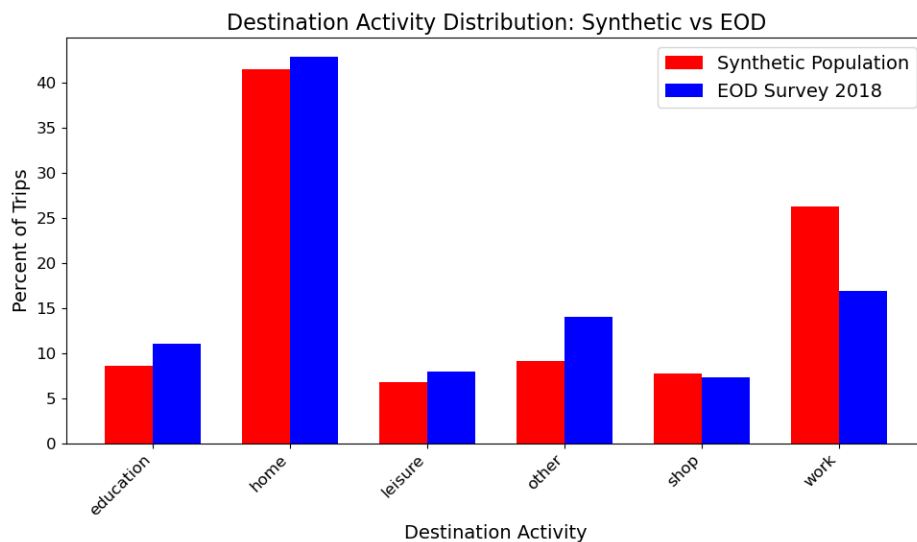


Figure 11 Répartition des motifs d'activité pour la population synthétique Eqasim vs données EOD

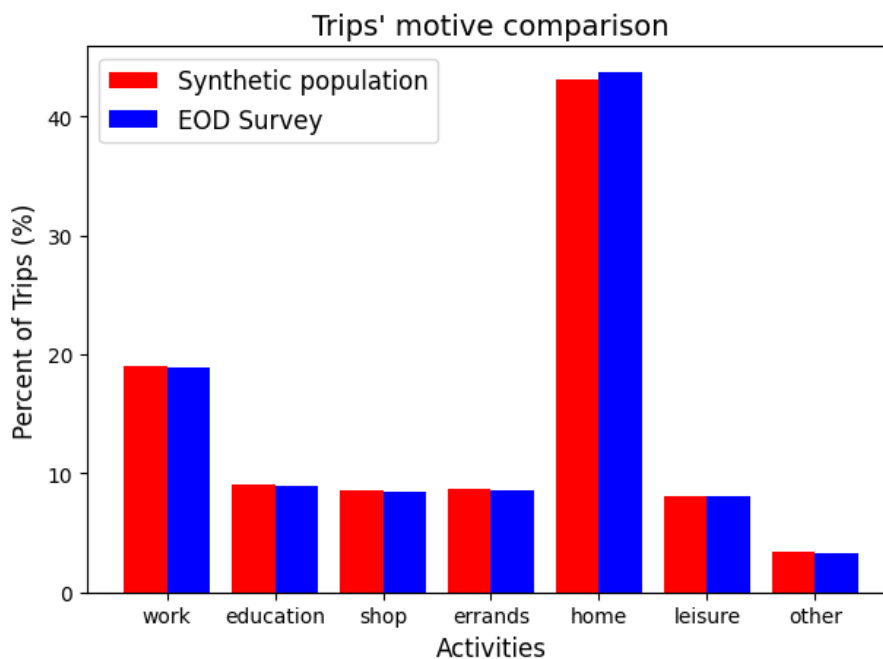


Figure 12 Répartition des motifs d'activité pour la population synthétique EOD vs données EOD

Les Figure 13 et Figure 14 présentent respectivement la distribution des paires d'activités pour les populations synthétiques Eqasim et EOD.

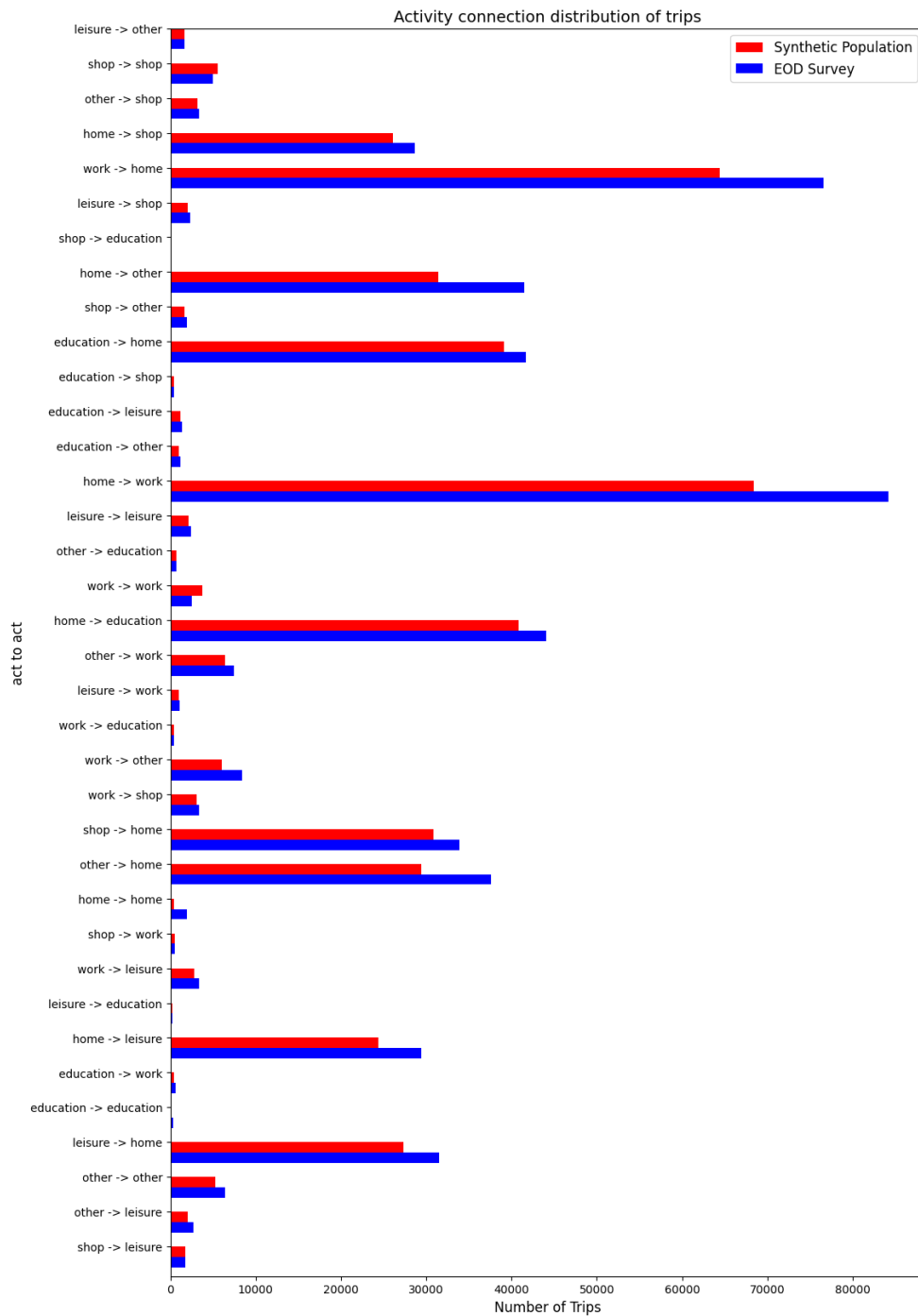


Figure 13 Distribution des paires d'activités pour la population synthétique Eqasim vs données EOD

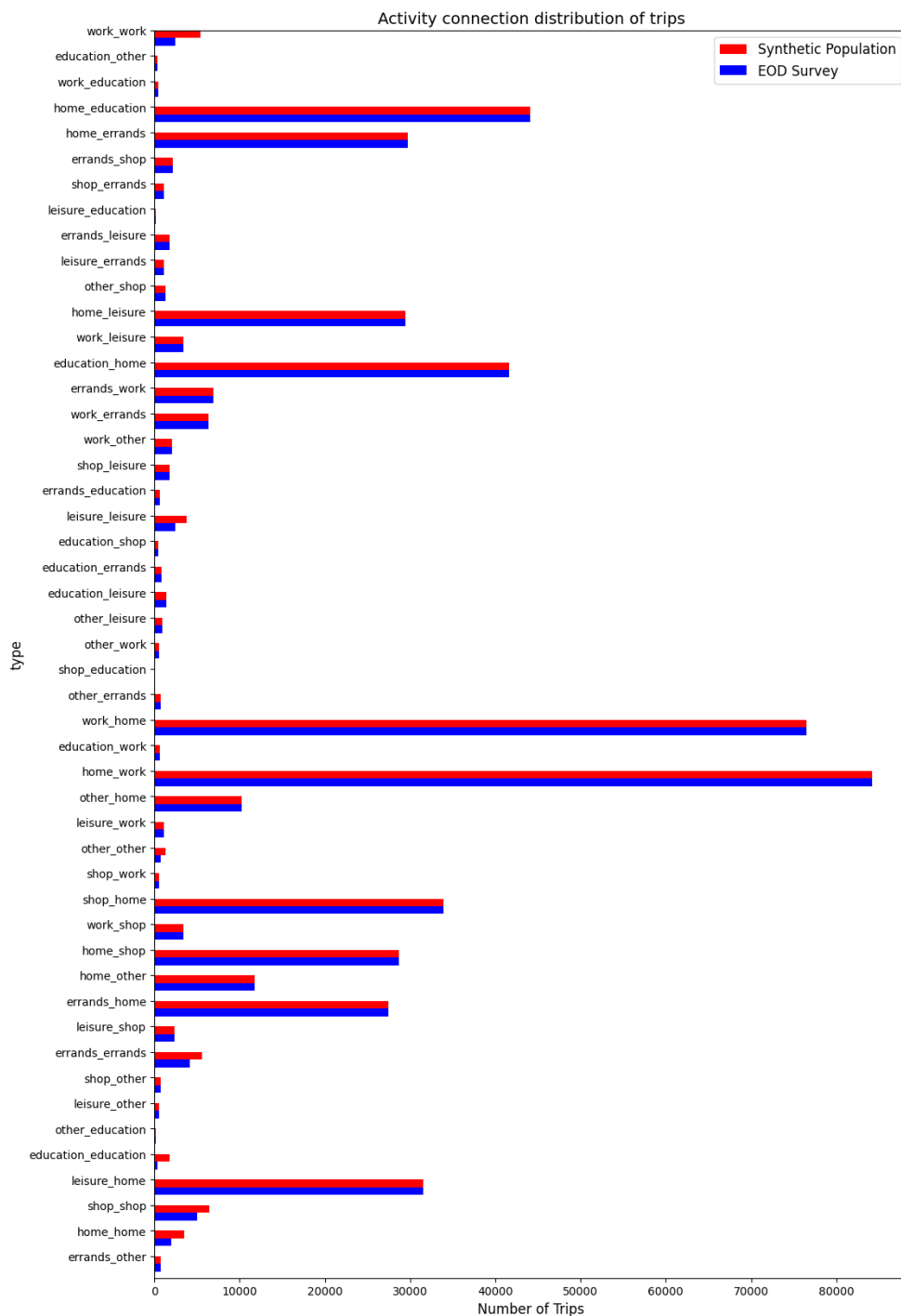


Figure 14 Distribution des paires d'activités pour la population synthétique EOD vs données EOD

En cas de discontinuité dans la chaîne de déplacements déclarée dans l'EOD, un déplacement est inséré depuis la destination du déplacement précédent jusqu'à l'origine du prochain déplacement en supposant que les types d'activités des deux endroits sont les mêmes. Ces déplacements ne sont essentiellement pas présents dans les données EOD et sont insérés en plus, augmentant ainsi le nombre total de déplacements par personne. Par conséquent, la population synthétique EOD a un nombre plus élevé de déplacements domicile-domicile, travail-travail, loisirs-loisirs, magasinage-magasinage et commissions-commissions par rapport aux données brutes.

Les déplacements insérés sont supposés être effectués à pied. Par conséquent, dans la section suivante, la population EOD présente un nombre plus élevé de déplacements en mode marche par rapport à la base de données de l'enquête EOD. Le choix est fait pour éviter de surestimer la demande sur les réseaux des transports en commun et routier, ce qui serait plus problématique dans la simulation.

6.3 Répartition du mode

Les Figure 15 et Figure 16 représentent la répartition du choix du mode pour les populations synthétiques Eqasim et EOD, par rapport aux bases de données EOD respectives (2018 et 2021) desquelles elles sont issues.

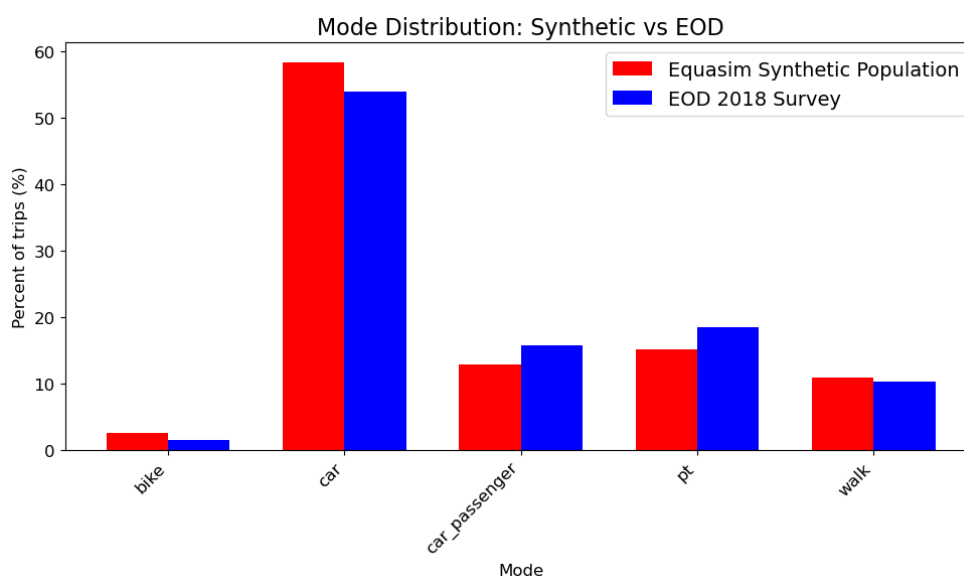


Figure 15 Répartition modale dans la population synthétique Eqasim vs données EOD 2018

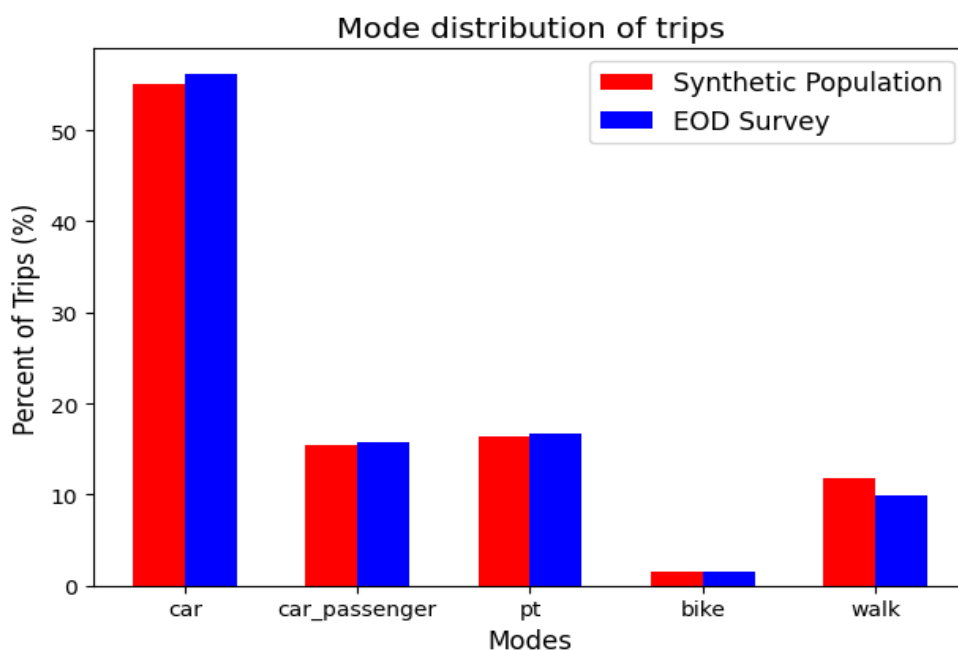


Figure 16 Répartition modale dans la population synthétique EOD vs données EOD

La Figure 16 montre que la **population synthétique EOD** présente une proportion plus faible de trajets en voiture et en transport en commun par rapport aux **données de l'enquête EOD**, mais une proportion plus élevée de déplacements à pied. Ces légères divergences résultent des discontinuités dans les chaînes de déplacements de la **base de données EOD**, où des trajets à pied sont ajoutés pour combler les écarts entre des lieux non connectés. En conséquence, la proportion de trajets à pied augmente, tandis que les proportions des autres modes — **à l'exclusion du mode marche** — diminuent, bien que le nombre total de déplacements pour ces modes reste inchangé.

6.4 Distribution de l'heure de départ

Les Figure 17 et Figure 18 montrent la distribution de l'heure de départ dans les populations synthétiques Eqasim et EOD, respectivement. Il est important de préciser qu'au cours de la génération de la population synthétique EOD, les heures de départ ont été réparties selon une distribution normale $N(0, 5 \text{ min})$ afin d'éviter que les trajets clonés ne commencent exactement au même moment.

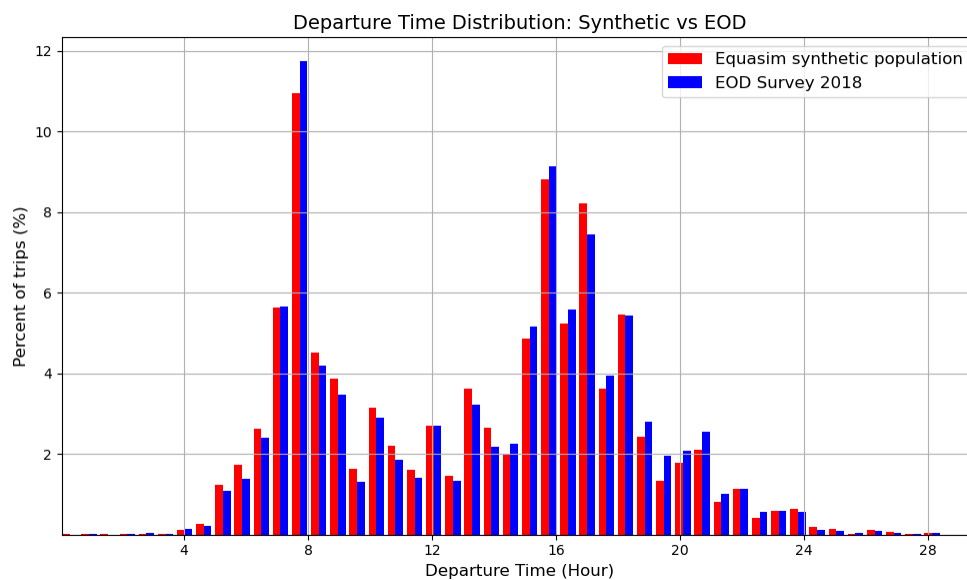


Figure 17 Répartition de l'heure de départ dans la population synthétique EOD vs données EOD

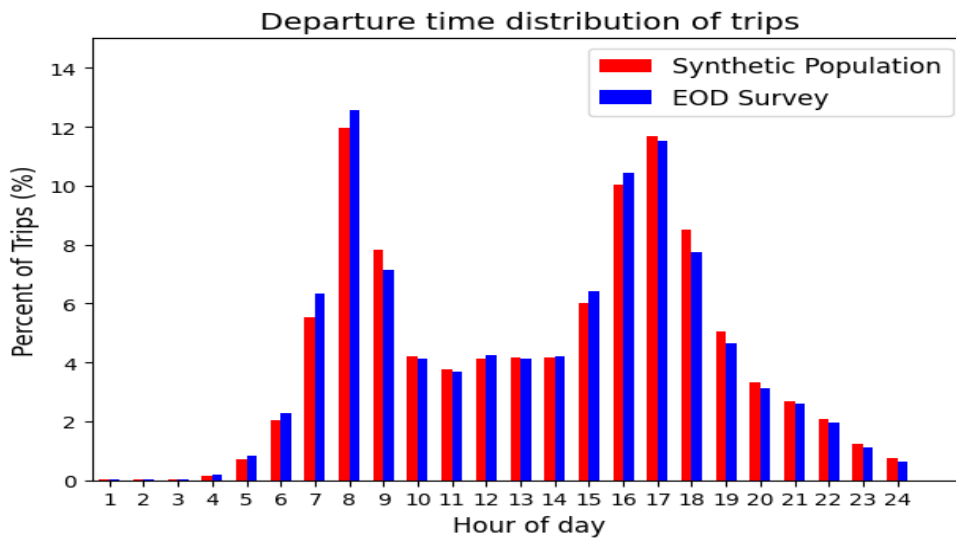


Figure 18 Répartition de l'heure de départ dans la population synthétique EOD vs données EOD

6.5 Distribution de l'origine et de la destination

La Figure 19 présente des cartes thermiques mettant en évidence les origines et destinations des déplacements dans la grande région de Montréal, à partir des données EOD.

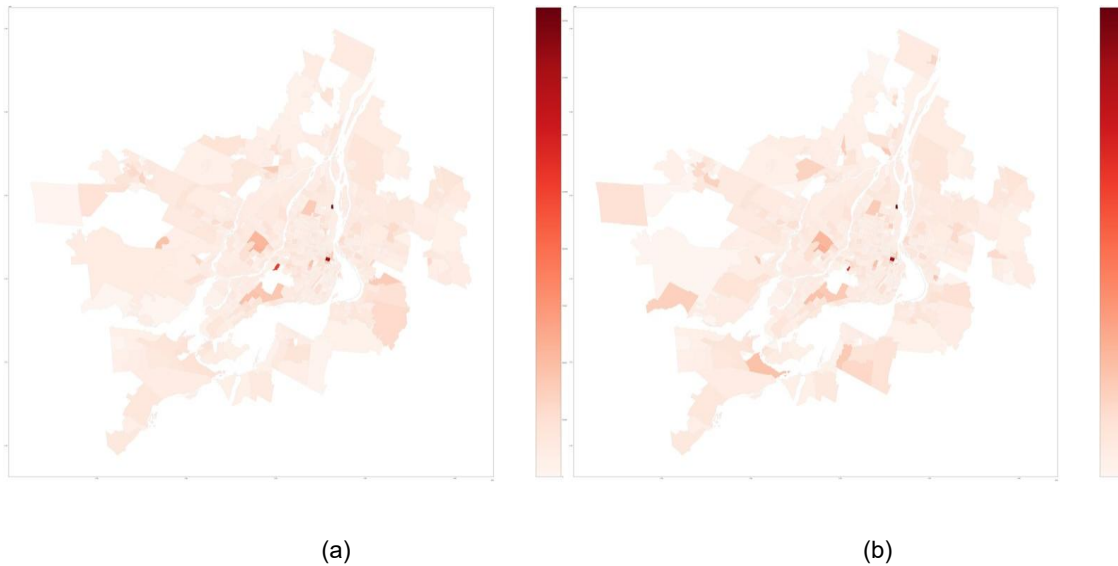


Figure 19 Carte thermique des origines (gauche) et destinations (droite) des déplacements pour la base de données EOD

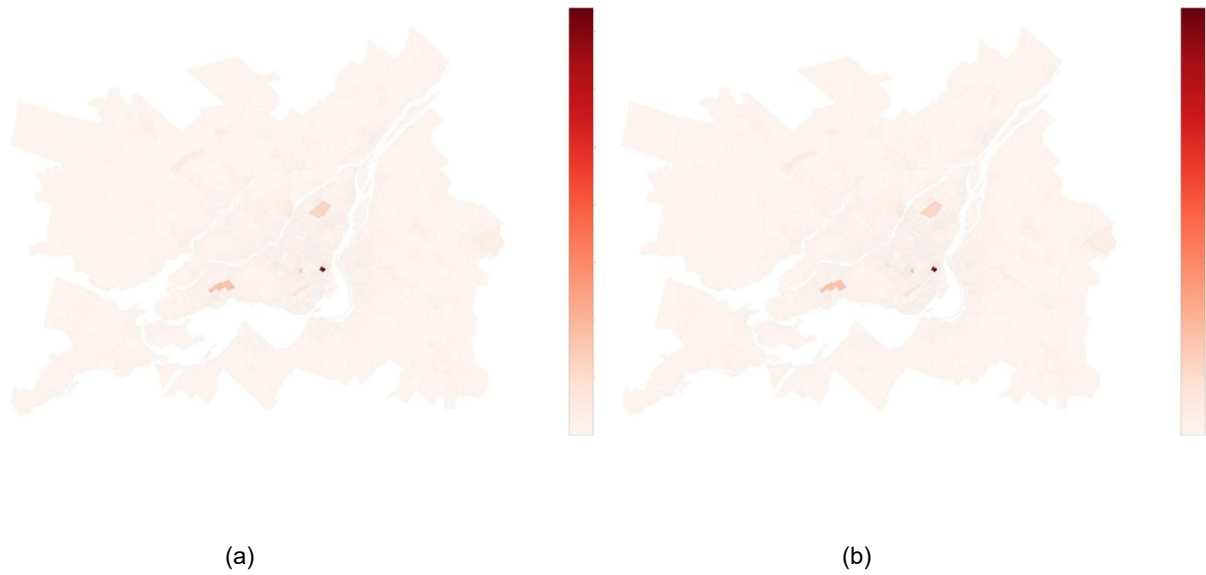


Figure 20 Carte thermique des origines (gauche) et destinations (droite) des déplacements pour la population synthétique Equisim

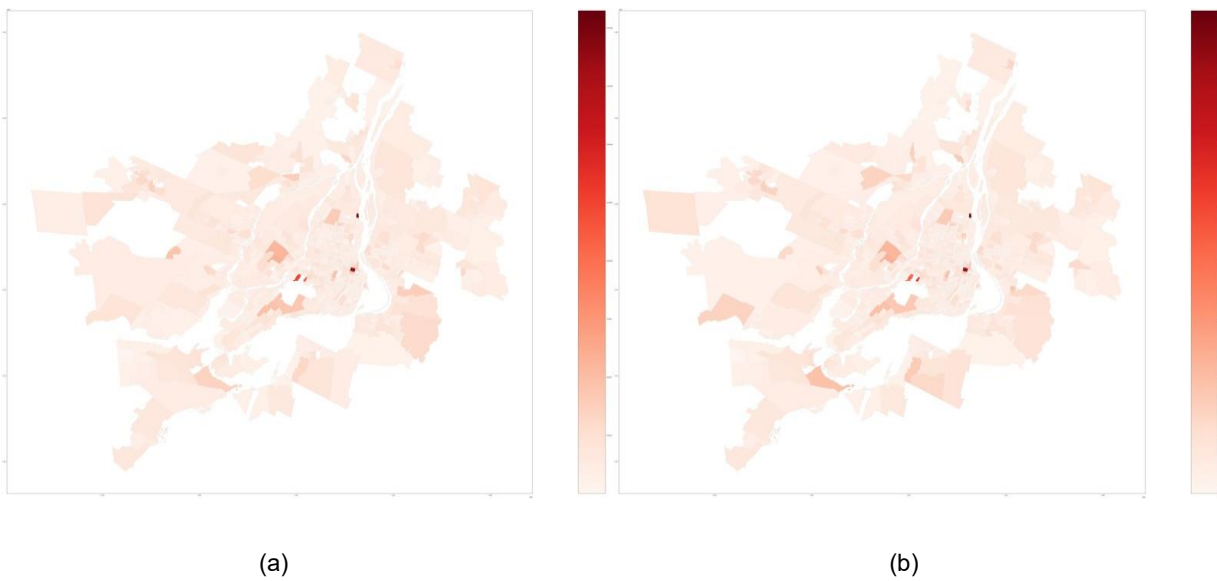


Figure 21 Carte thermique des origines (gauche) et destinations (droite) des déplacements pour la population synthétique EOD

L'analyse des cartes thermiques d'origine-destination aux Figure 19,

(a) (b)

Figure 20 et Figure 21 permet de conclure que la population synthétique EOD correspond mieux au modèle spatial des déplacements que la population Eqasim. Cependant, la chaîne de traitement Eqasim crée une population synthétique dont l'ensemble des ménages, des personnes et des déplacements respecte la distribution marginale des données du recensement. Seule une calibration sur la population synthétique Eqasim a été effectuée jusqu'à présent. Une calibration supplémentaire de la population synthétique EOD peut être effectuée si la décision d'utiliser cette dernière plutôt que la population Eqasim est prise à l'avenir.

7 CALIBRATION

7.1 Formulation du problème

La calibration est le processus de réduction de l'erreur entre la sortie du modèle développé et la réalité observée. Pour le scénario MATSim de Montréal, un processus de calibration en trois étapes est incorporé.

- Calibration pour la synthèse des activités de la population synthétique (Phase I) ;
- Calibration manuelle pour correspondre à la part modale (Phase I) ;
- Micro-calibration automatique pour aligner les comptages des liens simulés et observés sur des liens spécifiques pendant une période définie. (Phase II)

La première étape de la calibration a été réalisée lors de la génération de la population synthétique en phase I. Cette étape garantit que la distribution des activités, des modes de transport, de l'âge, du sexe et des autres caractéristiques socio-démographiques de la population synthétique générée correspond aux valeurs observées dans la base de données de l'enquête EOD. Dans la section précédente, des figures comparent ces indicateurs pour les deux processus de génération de population synthétique. La synthèse de la population et la comparaison ultérieure de la distribution des activités ont été ajoutées au rapport de la phase I. La deuxième étape de calibration consiste à ajuster manuellement les valeurs des paramètres comportementaux dans MATSim afin de garantir qu'à l'équilibre, la distribution simulée des modes de déplacement agrégés pour l'ensemble des trajets corresponde aux observations réelles issues de la base de données EOD. Cette étape faisait également partie du développement de la phase I, comme détaillé dans le rapport précédent.

Bien que le processus de calibration effectué en phase II fournisse un bon ensemble initial de paramètres, la part modale correspondant à la deuxième étape (pour les modes Auto, TC, Vélo, Marche, et Passenger Auto) est une mesure agrégée et ne garantit pas que le modèle est représentatif de la réalité aux échelles spatiale et temporelle. C'est pourquoi, le modèle a subi une calibration supplémentaire pour correspondre aux comptages de liens spécifiques dans le temps (basée sur les années 2020 à 2022). Le problème de calibration des flux de liens spécifiques dans le temps peut être formulé comme un problème d'optimisation des moindres carrés, démontré par l'équation (2).

$$\min_{\theta \in \Theta} \sum_{l,t \in L,T} [x_{l,t}^{sim}(\theta) - x_{l,t}^{obs}]^2 \quad (2)$$

$x_{l,t}^{sim}$ et $x_{l,t}^{obs}$ représentent les volumes de liens simulés et observés pour le lien l et le temps t . Le temps t n'est pas limité par l'algorithme. Il peut être affiché en format horaire ou trafic quotidien annuel moyen (AADT). Il est également possible que des comptages soient disponibles pour différents moments de la journée pour différents liens. l, t représente l'ensemble de liens et d'étapes temporelles pour lesquels des comptages sont disponibles. Dans les expériences effectuées, des comptages horaires ont été utilisés. θ est l'ensemble des paramètres à calibrer avec la condition aux limites $\theta \in \Theta$. Même si le problème est formulé en termes de comptages de liens observés et simulés, il est facile d'étendre la formulation à tout type de mesures observables telles que le volume d'entrée ou de sortie de cartes intelligentes dans les stations de métro, les péages collectés sur un pont, la fréquentation des bus, le temps de trajet des liens, etc., qui peuvent être étendus dans une étude future. À noter aussi que, bien qu'avec la calibration on cherche à faire coïncider les comptages réels avec le passage de véhicules dans la simulation, les paramètres ajustés pour obtenir cet effet ne sont pas exclusivement ceux relatifs à la voiture, mais aussi ceux qui sont attachés aux trajets, au temps d'attente, et aux transferts pour le transport en commun, à la marche, aux trajets à vélo, et à l'utilité marginale des activités.

7.2 Algorithme d'optimisation par métamodèle

Pour résoudre le problème de calibration basé sur la simulation mentionnée dans la section 7.1, l'algorithme d'optimisation par métamodèle proposé par [Patwary et al. \(2021\)](#) est utilisé. L'algorithme minimise le nombre de simulations en remplaçant le simulateur original, c'est-à-dire MATSim, par un métamodèle hybride. Ici, le terme métamodèle fait référence à un modèle simplifié, plus facile à gérer ayant un temps de calcul limité par rapport à celui du modèle plus complexe qu'il approxime (en l'occurrence, MATSim).

L'approche propose une forme hybride de métamodèle composée d'un modèle de trafic simplifié et d'un correcteur polynomial générique pour émuler l'effet d'un changement de paramètres dans MATSim. Le modèle de trafic simplifié fournit des informations spécifiques du problème à l'optimiseur, tandis que le correcteur polynomial comble l'écart entre le modèle de trafic simplifié et la sortie du simulateur. Ce type de métamodèle peut être décrit par l'équation (3). L'algorithme utilise le métamodèle dans un cadre d'optimisation de la région de confiance ([Conn et al. 2009](#)) pour effectuer une optimisation sans dérivée de MATSim avec un budget de simulation très faible. Le diagramme de flux de l'algorithme est présenté dans la Figure 22. Ici la simulation par blocs désigne l'exécution à l'équilibre de MATSim avec le réseau généré et la population synthétique, produisant le comptage des liens simulé à l'équilibre $x_{l,t}^{sim}(\theta)$. Les sorties du modèle de simulation (itinéraires et comptages de liens), la demande issue de la population synthétique et le réseau sont utilisés pour construire des métamodèles hybrides en associant un modèle statique d'affectation du trafic à l'équilibre utilisateur stochastique (SUE) avec des polynômes génériques, comme exprimé dans l'équation ci-dessous. Ce processus est représenté par le bloc Ajustement du Métamodèle (Metamodel Fitting) dans le diagramme. Le métamodèle ajusté est ensuite utilisé pour optimiser le problème de l'Équation (2) remplaçant ainsi la simulation directe, comme illustré dans le bloc Optimisation du Métamodèle (Metamodel Optimization). Cette étape génère les paramètres d'essai pour l'itération suivante de la simulation.

$$y_{l,t}(\theta) [\text{Volume du métamodèle}] = \alpha \times \lambda_{l,t}(\theta) [\text{Volume du modèle de trafic simplifié}] + g(\beta, \theta) [\text{Correcteur polynomial générique}] \quad (3)$$

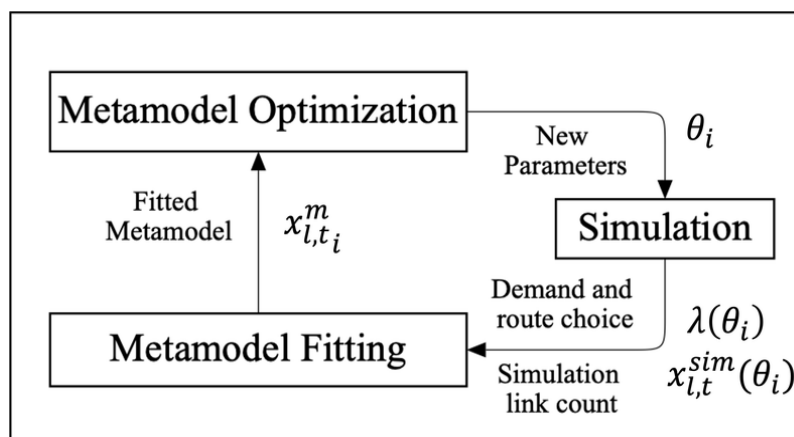


Figure 22 Diagramme de flux de l'algorithme d'optimisation par métamodèle (Patwary et al. 2021)

Pour la calibration du scénario MATSim Montréal, un modèle d'assignation de trafic multimodal simplifié et statique a été développé. Ce dernier est capable d'incorporer les modes automobile et transport en commun (TC), le temps de trajet en TC et le temps de transfert. En ce qui concerne l'optimiseur, une structure améliorée d'optimisation par métamodèle itérative est proposée. Cette dernière exécute une optimisation par métamodèle basée sur des substituts (SBO), de manière itérative, avec une perturbation aléatoire infinitésimale sur les paramètres pour extraire la solution des minima locaux. L'algorithme SBO itératif proposé est présenté dans la Figure 23.

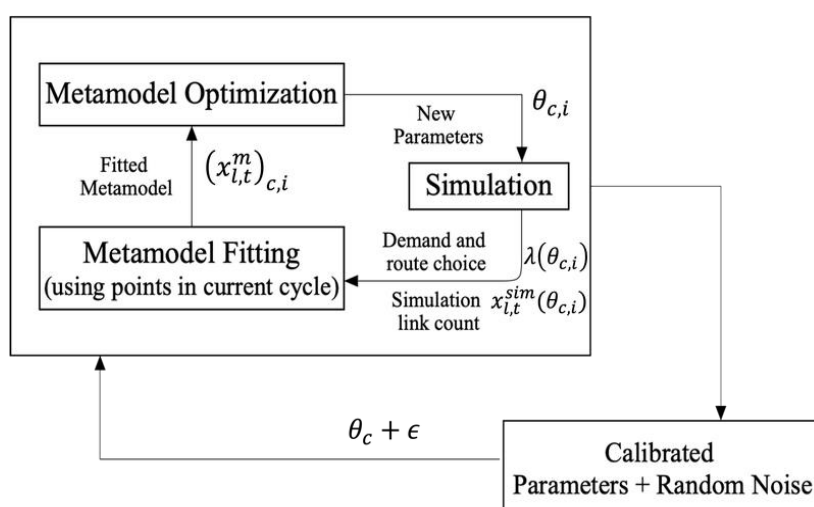


Figure 23 Diagramme de flux de l'algorithme d'optimisation par métamodèle amélioré

7.3 Traitement des données pour la calibration

Les données de comptage des véhicules, des cyclistes et des piétons aux intersections (2020-2022), issues du Portail de données ouvertes (2022), sont utilisées pour générer des comptages de liens spécifiques dans le temps afin d'effectuer la micro-calibration du scénario MATSim Montréal. Ces données incluent les coordonnées précises des intersections ainsi que les flux de véhicules dans les directions cardinales (nord, sud, est et ouest), répartis selon trois types de mouvements : gauche, droite et tout droit.

En termes de résolution temporelle, les données comprennent les flux horaires de circulation aux heures de pointe du matin et du soir, ainsi que la moyenne annuelle journalière du trafic (MAJT). Pour convertir les comptages directionnels des mouvements gauche, droit et tout droit en comptages de liens, les règles définies dans les équations (4) sont appliquées. Ici, NB, EB, WB et SB désignent respectivement nord, est, ouest et sud. Ce type de conversion génère un flux spécifique aux liens directionnels à partir du flux directionnel à une intersection. Après l'application de l'équation (4), il est nécessaire d'identifier les liens directionnels dans le réseau MATSim Montréal. Comme seule la coordonnée de l'intersection à partir de laquelle le lien est originaire ou dirigé est disponible, un algorithme de correspondance de liens approprié est requis.

$$\begin{aligned}
 NB_{in} &= NB_{left} + NB_{right} + NB_{through} \\
 NB_{out} &= EB_{left} + WB_{right} + NB_{through} \\
 SB_{in} &= SB_{left} + SB_{right} + SB_{through} \\
 SB_{out} &= WB_{left} + EB_{right} + SB_{through} \\
 EB_{in} &= EB_{left} + EB_{right} + EB_{through} \\
 EB_{out} &= SB_{left} + NB_{right} + EB_{through} \\
 WB_{in} &= WB_{left} + WB_{right} + WB_{through} \\
 WB_{out} &= NB_{left} + SB_{right} + WB_{through}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

La Figure 24 présente un schéma simplifié du processus de conversion des comptages de mouvements à l'intersection en comptages de liens.

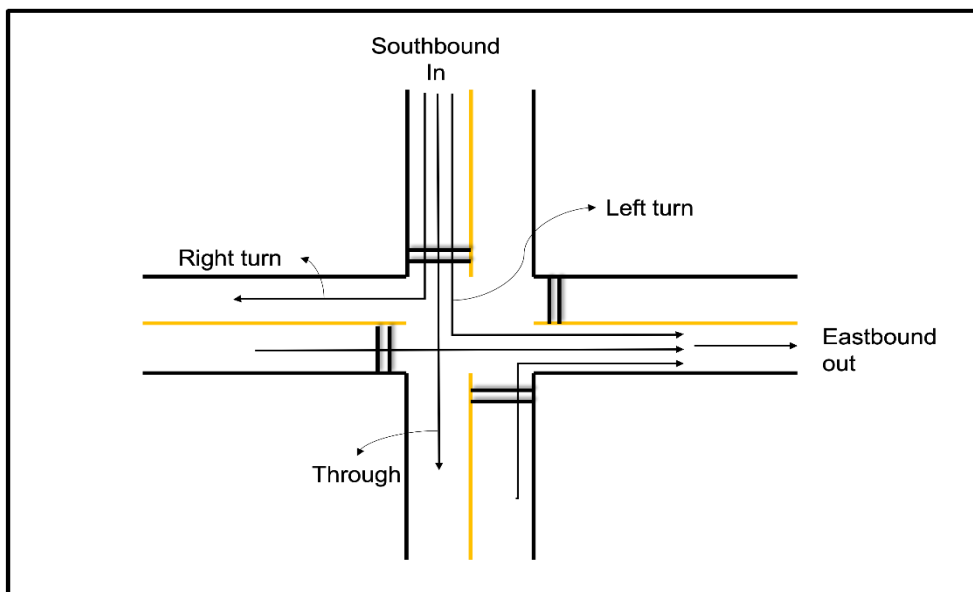


Figure 24: Logique de conversion du débit d'intersection en débit de liaison

7.4 Algorithme de correspondance de liens

Un algorithme automatique de correspondance de liens est utilisé et un ensemble de nœuds candidats à proximité d'une coordonnée d'intersection est identifiée. Pour les liens entrants, tous les liens se dirigeant vers les nœuds candidats sont collectés. De même, pour les liens sortants, tous les liens provenant des nœuds candidats sont collectés. Pour chacun des liens candidats, la différence entre la coordonnée de l'axe horizontal et les coordonnées de l'axe vertical des points de départ et d'arrivée fournit la direction de ce lien.

Par exemple, si $|\Delta Y| > |\Delta X|$ et $\Delta Y < 0$, le lien est orienté vers le sud. Enfin, le plus grand lien MATSim correspondant à la fois aux critères "entrée" ou "sortie" et aux critères de direction est associé au comptage de liens cibles. En utilisant cet algorithme, il est possible que le même lien soit associé à la direction "entrée" ou "sortie" de plusieurs intersections. Dans ce cas, la moyenne des comptages est calculée et les informations de variabilité sont stockées pour une analyse ultérieure.

Bien que l'algorithme élaboré donne une bonne correspondance pour les comptages directionnels entrants et sortants pour la plupart des intersections, la correspondance est parfois incorrecte en raison d'une incompatibilité entre le vrai nord et le nord de Montréal. Une correspondance manuelle et une vérification ultérieure sur la sortie de l'algorithme automatique de correspondance de liens ont été effectuées. La Figure 25 montre la correction apportée manuellement à la sortie de l'algorithme automatique de correspondance de liens pour une intersection spécifique.

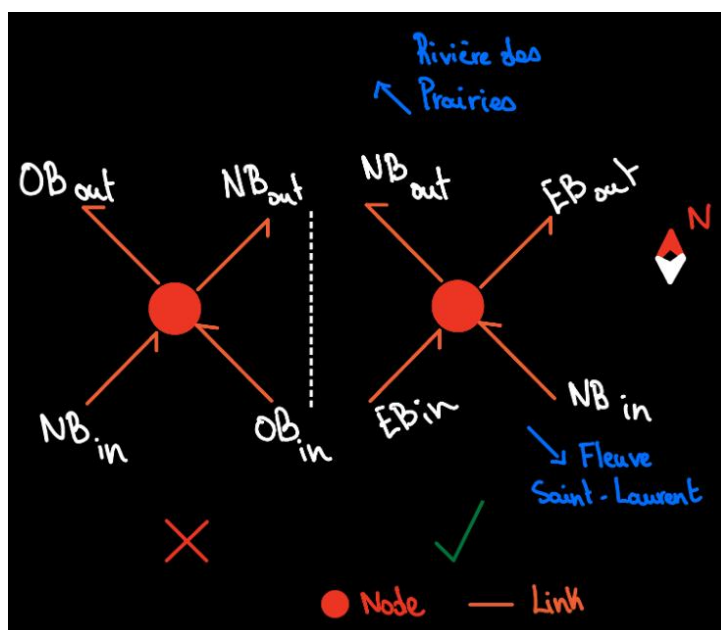


Figure 25 Correction manuelle sur la sortie de l'algorithme automatique de correspondance de liens

Au total, 2047 liens dans 312 intersections ont été vérifiés et corrigés manuellement après l'application de l'algorithme automatique de correspondance de liens.

7.5 Résultat de la calibration

Un budget de simulation de 55 a été fourni dans MATSim pour calibrer 10 paramètres comportementaux. La valeur de 55 est arbitraire et a été choisie empiriquement selon le temps effectivement disponible pour les simulations et le temps de calcul d'une simulation avec le

matériel informatique à disposition. Les valeurs des paramètres provenant de la calibration manuelle à la deuxième étape ont été prises comme valeurs initiales de l'ensemble de paramètres. Pour réduire le temps de simulation, MATSim a été démarré à chaud à partir d'un scénario déjà convergé, de sorte que la convergence soit atteinte avec un nombre minimal d'itérations internes, appelées itérations qsim. Pour chacune des évaluations de simulation, 50 itérations qsim ont été fournies pour que MATSim converge. Le résultat de la simulation permet de constater que l'algorithme SBO de métamodèle modifié réduit de 17,83% l'erreur quadratique totale. Cela réduit l'erreur quadratique moyenne de la racine carrée de 14,053 à 12,75. La Figure 26 montre la réduction de l'erreur quadratique au fil des itérations de calibration pour l'algorithme SBO original et l'algorithme SBO de métamodèle modifié proposé.

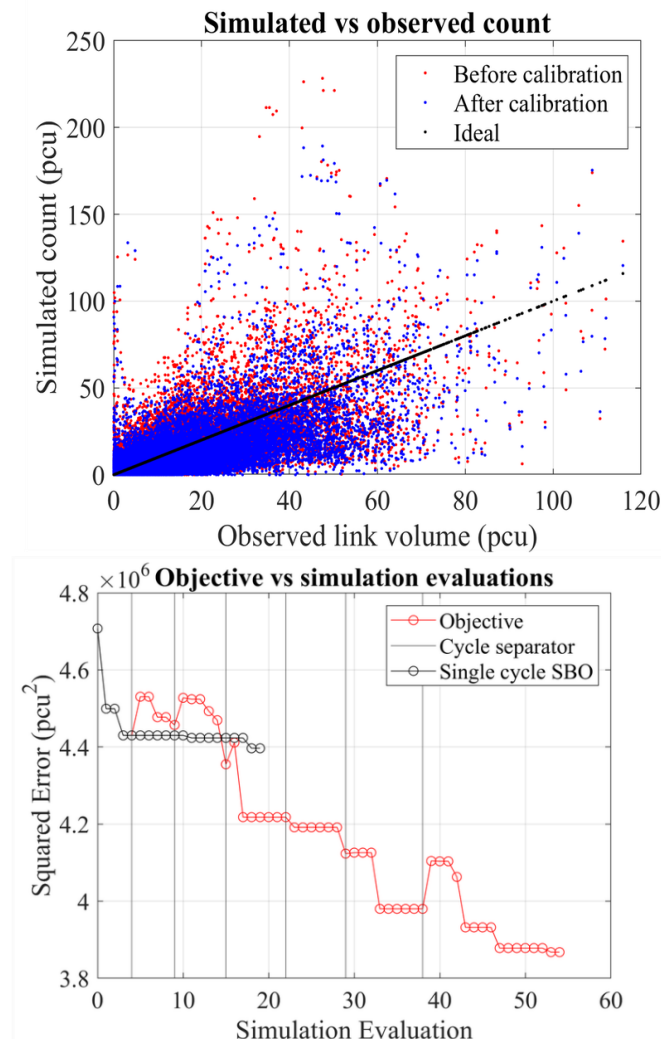


Figure 26 Comparaison de l'erreur quadratique

La figure révèle que, par rapport à l'algorithme SBO de métamodèle original (Patwary et al. 2021), l'algorithme SBO de métamodèle modifié proposé atteint une valeur objective nettement inférieure avec le même budget de calibration. La figure indique en outre qu'une meilleure calibration est possible avec un budget de simulation plus élevé. La Figure 27 trace les comptages de liens simulés par rapport aux comptages observés en unité-voiture particulière (PCU).

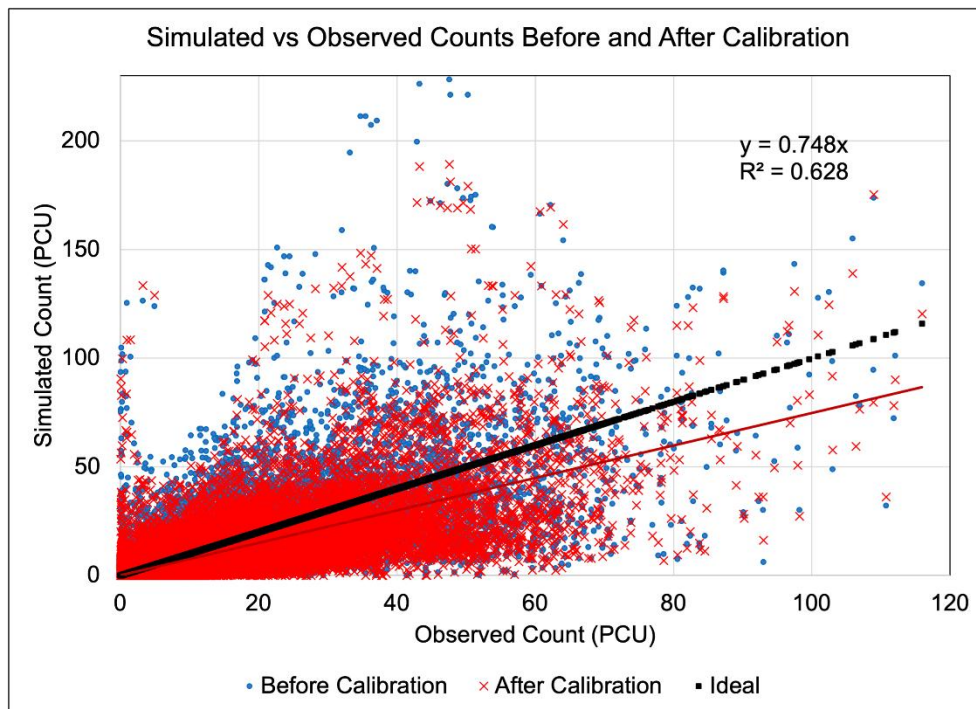


Figure 27 Nombre de liens simulés et observés

Pour une correspondance idéale, le tracé devrait créer une ligne de 45°. La figure indique que l’algorithme déployé a réduit la dispersion de l’erreur entre les comptages simulés et observés.

8 CONVERSION DU RÉSEAU EMME

8.1 Génération du réseau

L'une des principales tâches réalisées lors de la troisième étape du projet est la conversion du réseau EMME en un réseau MATSim fonctionnel. Bien que le réseau basé sur OSM, déjà créé et analysé dans ce rapport, soit plus détaillé que le réseau EMME fourni par le MTMD, ce dernier contient des informations supplémentaires sous forme de restrictions de virage permanentes ou temporaires ainsi que de capacités. Un programme informatique a été développé afin d'automatiser cette conversion des fichiers de formes (« shapefiles ») EMME en un réseau MATSim.

8.2 Restrictions de virage

Le réseau EMME développé encode en détail les restrictions de virage au sein du réseau. La configuration de MATSim a été adaptée afin d'intégrer ces informations relatives aux restrictions de virage. Pour ce faire, MATSim utilise un routage sur un réseau inversé, où le routage s'effectue dans un réseau inversé distinct. Dans ce réseau inversé, les connexions lien-à-lien autorisées sont traitées comme des liens, tandis que les liens d'origine deviennent des nœuds. De plus, le temps de déplacement lien-à-lien est utilisé comme coût de routage en complément du temps de déplacement individuel par lien. Les itinéraires sont d'abord calculés dans le réseau inversé, puis retranscrits dans le réseau original afin de s'intégrer de manière transparente à la structure de modélisation existante.

Le routage lien-à-lien, ou routage inversé, limite le choix des algorithmes de routage, réduisant ainsi les options disponibles pour un routage rapide et augmentant par conséquent le temps

de calcul. Pour prendre en charge le routage basé sur les voies, un fichier de définition des voies a été créé, stockant les correspondances lien-à-voie (indiquant à quel lien appartient une voie) et voie-à-lien (indiquant vers quel lien mène une voie) pour chaque voie. Toutefois, le défi le plus complexe du routage basé sur les voies réside dans l'association automatique du système de transport en commun au réseau tout en préservant les restrictions de virage, car la contribution Pt2MATSim utilisée pour cette cartographie automatisée ne prend pas en charge le routage basé sur les voies.

8.3 Intégration du transport en commun au réseau EMME avec restrictions de virage

Comme discuté précédemment, la contribution pt2MATSim est utilisé pour cartographier automatiquement le système de transport en commun sur le réseau. Dans ce contexte, cartographier signifie associer les arrêts de TC à des liens spécifiques et construire des itinéraires de TC en suivant les liens physiques tout en préservant la séquence d'arrêts fournie dans le fichier GTFS. Essentiellement, ce logiciel trouve des candidats de liens viables pour chaque arrêt de TC, puis essaie toutes les combinaisons possibles de candidats de liens d'arrêt pour créer des itinéraires de TC où le temps de trajet est proche du temps de trajet prévu par l'horaire. Le logiciel ajoute des liens artificiels au système pour maintenir le temps de trajet prévu lorsque de tels itinéraires ne peuvent pas être trouvés. Le logiciel permet de faire varier trois à quatre hyperparamètres, tels que le rayon de recherche autour de l'emplacement d'un arrêt, le nombre de candidats à choisir, l'écart autorisé par rapport au temps de trajet prévu, etc., pour contrôler le nombre de liens artificiels créés. Cependant, si les paramètres ajustés occasionnent une création de liens artificiels trop limitée, la correspondance des liens devient pire et les itinéraires deviennent non parcourables. Une calibration manuelle du système de TC existant pour ces paramètres est présentée dans la section 4.3.

L'intégration de liens supplémentaires du réseau OSM au réseau EMME afin d'améliorer la correspondance du TC est extrêmement complexe. Le premier défi réside dans le fait que ces deux réseaux ne partagent pas la même structure de nœuds, car OSM conserve généralement une géométrie routière plus détaillée en utilisant des nœuds et des chemins. Par conséquent, il est difficile de déterminer de manière algorithmique le nœud approprié auquel connecter les liens supplémentaires provenant d'OSM.

Deuxièmement, le réseau OSM contient de nombreux liens prenant en charge à la fois les modes voiture et TC. Sans une connaissance précise des liens déjà présents dans le réseau EMME et de leur emplacement géométrique exact, l'automatisation de la fusion de ces deux réseaux avec une précision raisonnable devient pratiquement impossible.

Les liens artificiels résolvent le problème des liens manquants dans le réseau EMME en introduisant des connexions artificielles sans modifier le temps de déplacement du réseau routier d'origine. En parallèle, ils garantissent le respect de l'horaire contenu dans la base de données GTFS, assurant ainsi une intégration plus précise du TC.

Les défis liés à l'application de pt2MATSim dans le réseau EMME sont doubles. Premièrement, la contribution pt2MATSim ne tient pas compte des restrictions de virage lors du routage, car le routage de lien à lien ou le routage inversé n'est pas une fonctionnalité par défaut de MATSim. Ainsi, les itinéraires qu'il crée enfreignent les restrictions de virage. Deuxièmement, en raison de la granularité grossière du réseau EMME par rapport au réseau OSM, il n'y a souvent pas de candidats de liens disponibles pour faire correspondre un emplacement d'arrêt de TC. Par conséquent, le nombre de liens artificiels dans le réseau qui intègre le TC est nettement plus élevé que dans le réseau OSM.

Le premier problème est partiellement résolu en modifiant la contribution pt2MATSim. L'algorithme de routage inversé est inséré au lieu de l'algorithme de routage traditionnel lors de la recherche des itinéraires combinant les liens candidats d'arrêts dans un itinéraire de TC. Cependant, le système crée toujours des liens artificiels sans tenir compte des connexions appropriées des voies. Le réseau est post-traité pour assurer que les itinéraires de TC proposés sont correctement connectés via des voies. Le réseau final intégrant le système de transport en commun contient 3 429 restrictions de virage. La fonctionnalité supplémentaire ajoutée à la contribution pt2MATSim lors de l'intégration du réseau de TC sur le réseau EMME, incluant les restrictions de virage, est une contribution importante, et des démarches sont entreprises avec les développeurs pour incorporer cette contribution à l'installation logicielle par défaut.

Le deuxième problème est minimisé en recalibrant manuellement les paramètres pour réduire le nombre de liens artificiels tout en maintenant l'accessibilité des itinéraires. Cependant, le problème n'est pas complètement résolu en raison de la granularité grossière du réseau EMME. Contrairement au réseau existant sans restrictions de virages OSM avec environ 1200 liens artificiels, décrit dans la section 4.3, le réseau EMME possède 20 386 liens artificiels (Figures 28 et 29).



Figure 28 Réseau EMME codé dans MATSim



Figure 29 Réseau EMME converti zoomé avec des liens physiques (noirs) et des liens artificiels (rouges).

9 RÉSEAU OSM AVEC RESTRICTIONS DE VIRAGE

En raison du grand nombre de liens artificiels générés, il est évident que le réseau EMME nécessite des ajouts sous forme de liens plus fins afin d'être adapté à la simulation MATSim. Des liens plus fins sont également nécessaires, car contrairement à EMME, qui attribue la demande de nœud à nœud, MATSim associe les voyageurs à des liens spécifiques. Par conséquent, dans un réseau à la granularité plus grossière comme EMME (par opposition à MATSim), un plus grand nombre de départs et d'arrivées sont concentrés sur les quelques liens résidentiels disponibles, ce qui ne reflète pas fidèlement la réalité. La capacité de ces liens résidentiels reste cependant identique à celle d'EMME ou, dans certains cas, inférieure à celle d'EMME afin d'imiter l'effet des feux de circulation ou des panneaux d'arrêt lors de la conversion vers MATSim.

En conséquence, les voyageurs se retrouvent coincés dans des congestions inutiles au début et à la fin de leur trajet, ce qui augmente considérablement leur temps de parcours. Un réseau avec des restrictions de virage, similaire au réseau EMME généré dans la section 8, a donc été produit à partir des données OSM.

Pour la génération initiale du réseau à partir des données OSM, le module `osmToMATSim` de la contribution `pt2MATSim` est utilisé. Ce logiciel extrait les données nécessaires du réseau physique OSM et génère automatiquement un réseau MATSim de base. `gtfsToMATSim`, un autre module de `pt2MATSim`, convertit ensuite les données du réseau de TC du format GTFS en un fichier d'horaire de TC MATSim qui n'est pas encore intégré à un réseau. Enfin, le programme original `pt2MATSim` intègre le fichier d'horaire de transport en commun au réseau MATSim de base.

Un problème lié à ce processus est que le module `osmToMATSim` n'extrait aucune information sur les restrictions de virage à partir de la base de données OSM. L'approche adoptée consiste à collecter les restrictions de virage disponibles dans la base de données OSM. OSM enregistre des informations sur les voies pour chaque élément `way`, qui représente un lien bidirectionnel dans OSM. Ces voies correspondent à des voies réelles sur la route plutôt qu'à des restrictions de virage. Toutefois, elles constituent une source précieuse d'information

concernant la capacité des différentes paires de virages à une intersection. Ces données sont conservées pour d'éventuelles améliorations futures.

De plus, la base de données OSM contient des variables associées aux restrictions de virage, permettant l'intégration des restrictions à l'aide des informations suivantes : "*From way*", "*To way*", "*Via way*" ou "*Node*". La logique d'extraction des données OSM dans le module *osmToMATSim* a été modifiée afin d'extraire ces informations de restriction disponibles pour des liens de départ candidats spécifiques. Les restrictions de virage sont enregistrées en tant qu'attributs supplémentaires des liens lors de l'extraction du réseau de base à partir de la base de données OSM.

Après la construction du réseau de base, un programme a été développé pour générer automatiquement un fichier de définition des voies à partir des attributs de restriction présents dans les liens candidats. Enfin, un nettoyeur de réseau inversé détecte les boucles potentielles et les parties inaccessibles au sein du réseau inversé avec restrictions de virage, puis génère un réseau OSM de base nettoyé et avec restrictions de virage. La contribution *pt2MATSim* avec restrictions de virage, décrite dans la section 8.3, intègre ensuite le réseau de TC dans le réseau OSM avec restrictions de virage. La Figure 30 montre le réseau OSM final généré après la mise en correspondance du système de transit sur le réseau. La Figure 31 montre un détail de la partie centrale du réseau OSM.



Figure 30 Réseau OSM avec restrictions de virage



Figure 31 Détail de la partie centrale du réseau OSM

Le nombre de liens artificiels dans le réseau OSM final est de 1053, une amélioration substantielle par rapport à la version précédente du réseau et une réduction considérable en comparaison avec les 20 386 liens artificiels du réseau EMME.

Ainsi, la Figure 31 ne montre aucun lien artificiel dans la région sélectionnée (qui aurait été coloriée en rouge comme dans les figures suivantes s'il y en avait). Le nombre de liens et de nœuds pour le réseau OSM final est de 352 832 et 157 072 respectivement, contre 62 314 et 25 341 pour le réseau EMME généré à la section 8.3. Le nombre total de voies générées pour imposer des restrictions est de 11 960, contre 3 429 voies dans le réseau EMME. La Figure 32 souligne la granularité fine du nouveau réseau OSM généré, où le réseau EMME est tracé en noir et le réseau OSM en gris.



Figure 32 Réseau OSM en gris et réseau EMME en noir

Selon ces analyses, le réseau OSM développé est une version plus complète du réseau EMME fourni par le MTMD et du réseau OSM précédemment généré dans le cadre du projet.

10 COMBINAISON DES RÉSEAUX ET GÉNÉRATION DU RÉSEAU FUTUR

La combinaison de réseau signifie essentiellement l'intégration d'un réseau dans un autre. Dans un monde idéal, cette correspondance devrait être une correspondance un-à-un pour des réseaux avec des identifiants de lien différents ou une géométrie de lien légèrement différente et une correspondance un-à-plusieurs entre les liens d'un réseau avec une granularité grossière et un réseau avec une granularité plus fine, où le réseau plus fin est plus fragmenté que le réseau plus grossier. Cependant, dans le cas de la correspondance entre les réseaux OSM et EMME, il s'agit d'une correspondance multiple. Cela est dû à plusieurs éléments. Par exemple, contrairement au réseau OSM, où les géométries sont principalement préservées, le réseau EMME est simplifié au point où la géométrie du lien est compromise pour une connexion plus simple. De plus, les nœuds de début et de fin des liens dans les deux réseaux ne sont pas les mêmes, c'est-à-dire qu'il est possible, par exemple, qu'un lien dans le réseau OSM commence ou se termine au milieu d'un lien du réseau EMME.

Un outil automatique de combinaison de réseau devrait idéalement permettre de basculer entre les réseaux et leurs modèles respectifs et de comparer les sorties du modèle avec la réalité. Un tel outil serait très utile lorsque les informations sur le nombre de liens ou les futures améliorations proposées du réseau sont codées dans l'un des réseaux et doivent être transférées à l'autre pour générer un scénario futur dans le modèle plus fin. Il s'agit précisément de la nature de la tâche consistant à modifier les réseaux 2021 et 2041 à partir des réseaux OSM et EMME ajustés pour MATSim.

Le réseau 2041 est fourni au format de fichier de formes EMME et le réseau 2041 EMME est créé avec les outils développés et décrits à la section 8. Cependant, les deux réseaux devaient être combinés pour incorporer les modifications dans le réseau OSM plus complet et représentatif et avec restrictions de virage qui est généré et décrit à la section 9. Après une revue de la littérature, il ressort qu'un tel outil n'est pas actuellement développé. Par conséquent, des investissements massifs ont été dirigés dans le développement d'un algorithme de combinaison qui peut faire la correspondance entre l'EOD et le réseau OSM. En conclusion, les outils de combinaison de réseaux sont assez complexes et se sont avérés impossibles à développer dans la fenêtre de temps limité de ce projet. Par conséquent, les réseaux ont été combinés manuellement, en ciblant seulement certaines modifications majeures prévues au réseau, pour créer un réseau 2041 OSM et EMME. La Figure 33 montre les changements proposés extraits du réseau EMME 2041 sur le fond du réseau OSM avec restrictions de virage. La Figure 34 montre les changements mis en œuvre dans le réseau OSM 2041.



Figure 33 Changements proposés du réseau EMME 2041



Figure 34 Changements mis en œuvre du réseau EMME 2041 au réseau OSM 2041

En plus des changements de réseau, les améliorations au réseau de TC proposées en 2041 ont été prises en compte, à savoir l'extension de la ligne bleue (5) du métro de Montréal et l'ajout de certaines lignes de bus. Ces données, leurs emplacements d'arrêts et leur horaire provisoire sont fournies au format GTFS et fichier de formes («shapefile»). Plutôt que de perturber la conversion et la correspondance du système de TC d'origine à l'aide de la contribution pt2MATSim modifié, un fichier distinct d'horaire de transport en commun, contenant uniquement les lignes de transport en commun nouvellement modifiées, est créé à l'aide du module gtfsToMATSim de la contribution pt2MATSim. Ensuite, une correspondance manuelle entre ce dernier et le réseau fourni par le fichier de formes est faite. Enfin, les lignes, itinéraires, départs, liens et véhicules de TC MATSim générés dans ce processus sont intégrés aux anciens fichiers de TC et les doublons sont supprimés. À la fin du processus décrit, les réseaux EMME 2041 et OSM 2041 avec des systèmes de réseau et de transport en commun modifiés sont élaborés. La Figure 35 présente les liens supplémentaires, les liens de TC et les arrêts ajoutés au réseau de 2041 pour les nouvelles lignes de TC et les routes planifiées.

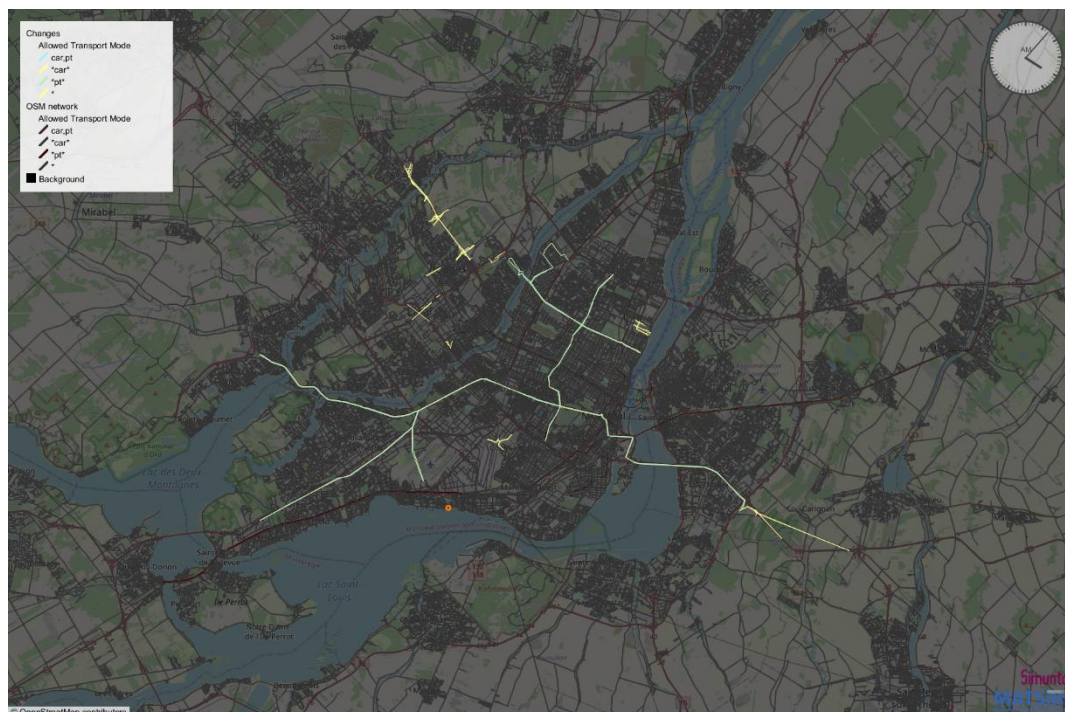


Figure 35 Modifications du réseau en 2041

Le Tableau 3 présente les caractéristiques du réseau pour l'ensemble des réseaux créés aux différentes phases du projet.

Tableau 3 Comparaison des caractéristiques du réseau entre les réseaux OSM et EMME

Réseau	OSM Phase I	OSM Phase III	EMME	EMME 2041	OSM 2041
Nombre de nœuds	123,102	157,072	25,341	25,674	157,535
Nombre de liens	297,186	352,832	62,314	62,937	353,703
Nombre d'arrêts	9,532	20,916	25,707	25,836	21,014
Nombre de lignes de transport en commun	230	781	781	793	793

11 GÉNÉRATION DE LA POPULATION SYNTHÉTIQUE EOD POUR 2018, 2021 ET 2041

Cette section décrit les modifications apportées à la logique de génération d'une population synthétique basée sur l'EOD 2018 effectuée en phase II et décrite à la section 6. Des facteurs de pondération supplémentaires ont été fournis au niveau des ménages, des personnes et des déplacements pour les années 2021 et 2041 du MTMD en octobre 2023. De plus, il a été observé que les déplacements pour lesquels les champs *srdes*, *srori* et *xmtmori*, *ymtmori* et *xmtmdes*, *ymtmdes* sont manquants sont en réalité des déplacements avec une origine ou une destination extérieure, voire les deux. Comme suggéré par le MTMD, les champs utilisés dorénavant sont *xlonori*, *ylatori* et *xlondes*, *ylatdes*, afin d'extraire l'origine et la destination exactes des déplacements. De plus, les déplacements en dehors de l'île n'ont naturellement pas de secteur de recensement (SR) (*srori*, *srdes*, ou *srlog*) qui leur est attribué car les SR sont uniquement définis à l'intérieur de la région métropolitaine de recensement (RMR). Comme le système d'aires de diffusion (AD) est présent partout au Québec (et non seulement dans la RMR dans le cas des SR), la décision est prise de l'utiliser comme système zonal au lieu du système de SR. Comme les AD sont beaucoup plus petites que les SR, ce changement dans le système zonal améliore la précision. Pour les déplacements dont l'origine, la destination ou les deux sont à l'extérieur de la région cartographique sélectionnée, l'aire de diffusion la plus proche de leur origine et/ou de leur destination réelle leur est attribuée. Il est clair qu'il s'agit d'une approximation loin d'être réaliste; cependant, un point de sortie spécifique ne peut pas être attribué sans connaître exactement quelle autoroute ou quel train les personnes ont pris pour voyager à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone d'étude. Cette approximation diminue donc la précision des déplacements ayant comme origine ou destination une région externe au territoire de simulation, ce qui devrait être résolu dans des recherches futures avec des données appropriées sur les déplacements exogènes.

Comme tout le processus de génération de la population synthétique basée sur l'EOD est automatisé, il est possible de simplement sélectionner les facteurs à utiliser pour générer la population EOD pour une année de prédiction spécifique. Le processus de génération de la population synthétique basée sur l'EOD traite séparément la prédiction de la demande et la génération de la population synthétique, contrairement à la chaîne de traitement Eqasim, où les données du recensement sont utilisées pour générer la population synthétique, puis des

chaînes de déplacement sont attribuées aux personnes de manière probabiliste. Comme discuté précédemment, la population EOD nécessite la génération d'agents n'appartenant à aucun ménage et d'agents avec un seul déplacement pour correspondre aux facteurs non uniformes au niveau des ménages, des personnes et des déplacements. Comme les caractéristiques des ménages ne sont pas utilisées dans les populations synthétiques générées, les agents n'appartenant à aucun ménage n'affectent pas le résultat de l'équilibre du modèle MATSim à l'étape actuelle. En revanche, les agents avec un seul déplacement (également appelés personnes à déplacement unique) sont inclus dans les analyses concernant le choix du mode et du trajet comme tous les autres déplacements. En raison du principe de fonctionnement basé sur l'activité de MATSim, ces déplacements modifient légèrement l'équilibre de MATSim.

Le Tableau 4 présente quelques statistiques clés de la population synthétique générée pour les années 2018, 2021 et 2041.

Tableau 4 Détails de la population synthétique EOD

Année	2018	2021	2041
Échelle	1	1	1
Total des ménages générés	1,711,606	1,742,827	1,753,624
Ménages dans les données EOD	1,955,908	2,065,610	2,323,543
Différence en pourcentage	12	16	25
Total des personnes générées	4,807,304 (100%)	4,936,422 (100%)	5,464,490 (100%)
Personnes créées au sein des ménages	3,884,649 (80.8%)	3,947,784 (79.97%)	3,881,139 (71.2%)
Personnes créées sans ménage	656,303 (13.65%)	690,070 (13.97%)	1,215,010 (22.23%)
Personnes créées	4,540,952	4,637,854	5,096,149
Personnes dans les données EOD	4,625,401	4,729,561	5,211,129
Différence en pourcentage (Synthétique – EOD)	1.83	1.94	2.21
Personnes à déplacement unique créées pour gérer les écarts de pondération au niveau des ménages, des personnes et des déplacements	266,352 (5.54%)	298,568 (6.05%)	368,341 (6.74%)
Total des déplacements créés (hors trajets de marche de connexion pour les chaînes discontinues)	9,893,847	10,155,336	11,132,173
Déplacements dans les données EOD	9,891,028	10,153,644	11,130,519
Différence en pourcentage (Synthétique – EOD)	-0.03	-0.02	-0.01
Déplacements de marche de correspondance	404,126 (4.1%)	348,090 (3.4%)	325,507 (2.9%)

Selon le Tableau 4, moins de ménages ont été créés dans le scénario 2041 par rapport aux scénarios 2018 et 2021. Par conséquent, le nombre d'individus sans ménage a augmenté de manière significative dans la population synthétique 2041. Cela est dû à une plus grande

discordance entre les facteurs de pondération des ménages, des personnes et des déplacements dans les facteurs de 2041 par rapport à ceux de 2018 et 2021.

Cependant, comme mentionné précédemment, l'attribution des ménages aux agents n'a aucun impact sur la sortie d'équilibre du modèle MATSim à ce stade. La proportion de personnes à déplacement unique a légèrement augmenté, passant de 5,54% en 2018 à 6,05% en 2021 et 6,74% en 2041, ce qui reste négligeable par rapport au nombre total de déplacements. Par conséquent, l'effet sur la sortie d'équilibre du modèle est négligeable.

Étant donné que les populations synthétiques sont générées directement à partir de l'EOD en utilisant une méthodologie légèrement modifiée décrite dans la section 5, avec un accent plus marqué sur la correspondance du nombre de déplacements, les écarts sur le nombre de déplacements sont négligeables (moins de 0,03%). Environ 3 à 4% des trajets de marche ont été ajoutés pour prendre en compte les déplacements de marche de correspondance en cas de chaînes de déplacements discontinues, qui sont présentes dans les données EOD. Ces ajouts ont un impact minimal sur la convergence de la simulation.

Enfin, il est important de souligner que, comparativement aux résultats de la population synthétique Eqasim présentés précédemment, la population synthétique EOD contient un nombre nettement plus élevé de déplacements en raison de l'inclusion de déplacements exogènes. Les résultats de la simulation utilisant la population EOD et les réseaux avec les restrictions de virage sont discutés dans les sections suivantes.

12 SCÉNARIOS

Cette section présente les résultats de certains des scénarios générés et discutés dans les sections précédentes. Notamment, les résultats de la simulation du réseau OSM avec restrictions de virage pour la population EOD de 2021 et 2041 sont présentés. Il est important de souligner que les scénarios présentés dans cette section n'ont pas été recalibrés; les mêmes ensembles de paramètres calibrés obtenus grâce à la procédure mentionnée à la section 7 sont utilisés. Un calibrage plus élaboré du scénario de base dans le cadre de travaux futurs les rapprochera ultérieurement de la réalité.

12.1 Scénario OSM 2021 avec restrictions de virage

Comme mentionné précédemment, en raison de l'inclusion du calcul du temps de trajet de lien à lien et du routage inverse du réseau, la simulation avec restrictions de virage nécessite plus de temps de calculs et donc un temps de simulation plus long. Les Figure 36 and Figure 37 indiquent le temps requis par itération pour la simulation et la convergence des pointages à l'équilibre pour le scénario OSM 2021.

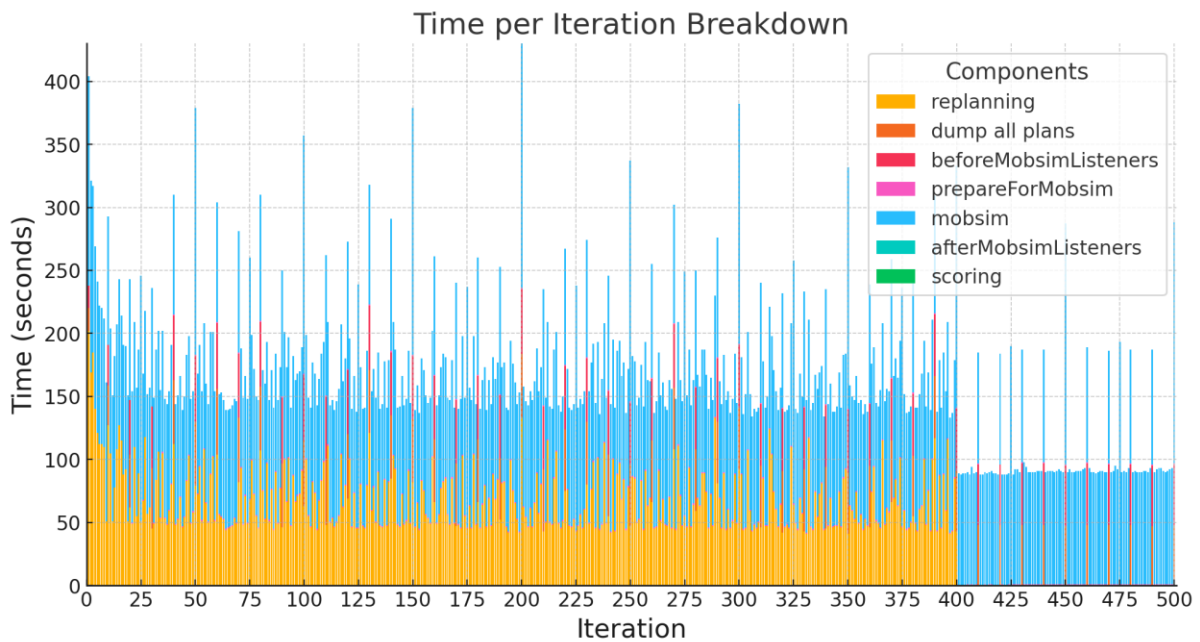


Figure 36 Temps de simulation vs. Itération (scénario OSM 2021 avec restrictions de virage)

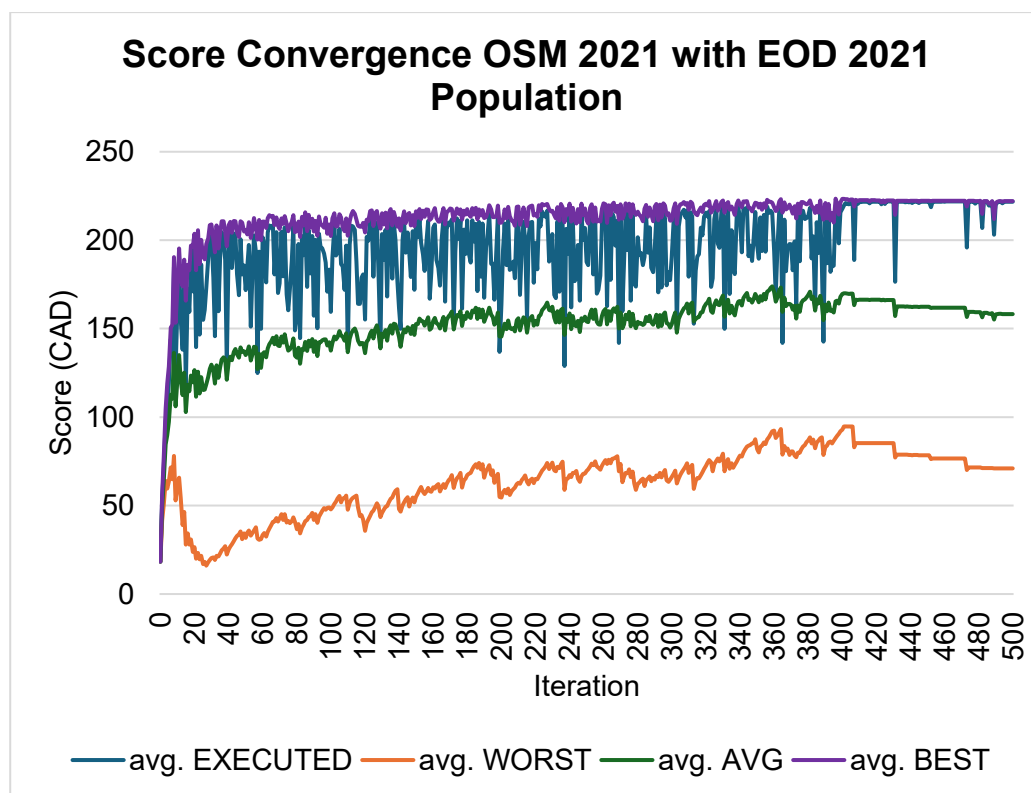


Figure 37 Pointages vs. Itération (scénario OSM 2021 avec restrictions de virage)

Un processeur Ryzen 7900k avec un système de RAM DDR5 de 128 Go a été utilisé pour exécuter cette simulation. Les graphiques montrent clairement une oscillation du pointage tout au long de la simulation, indiquant que la proportion de replanification utilisée était trop élevée, causant trop d'instabilités pour le système. Une proportion de replanification plus faible réduit

généralement l'oscillation du pointage et assure une meilleure convergence. Cependant, avec ce changement, le processus nécessite plus d'itérations. La Figure 38 présente les proportions de modes au fil de la simulation.

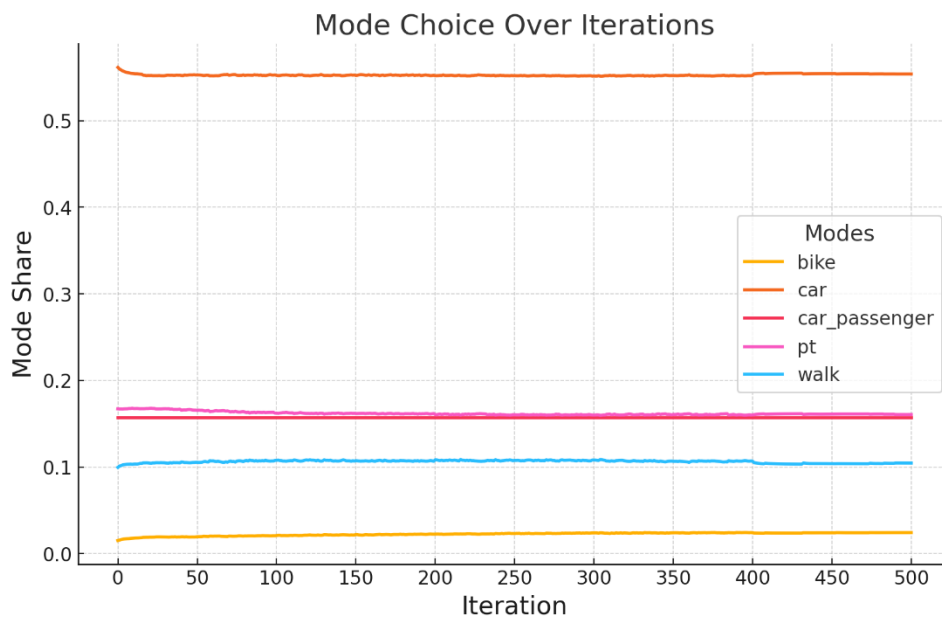


Figure 38 Proportion de mode vs. Itération (scénario OSM 2021 avec restrictions de virage)

Les parts modales présentées à la Figure 38 ont très peu évolué à la fin de la simulation par rapport à la population initiale, qui est basée sur les données EOD (légère augmentation de la part du vélo et diminution de la part du transport en commun). Cela indique une répartition modale à l'équilibre très similaire à celle des données EOD d'origine et, par conséquent, une bonne calibration du choix modal. Les Figure 39 et Figure 40 présentent les comptages de liens simulés par rapport aux comptages réels en PCU pour les heures de pointe et l'AADT. Pour les comptages en heure de pointe et en AADT, les statistiques moyennes de GEH sont respectivement de 2,1439 et 8,27.

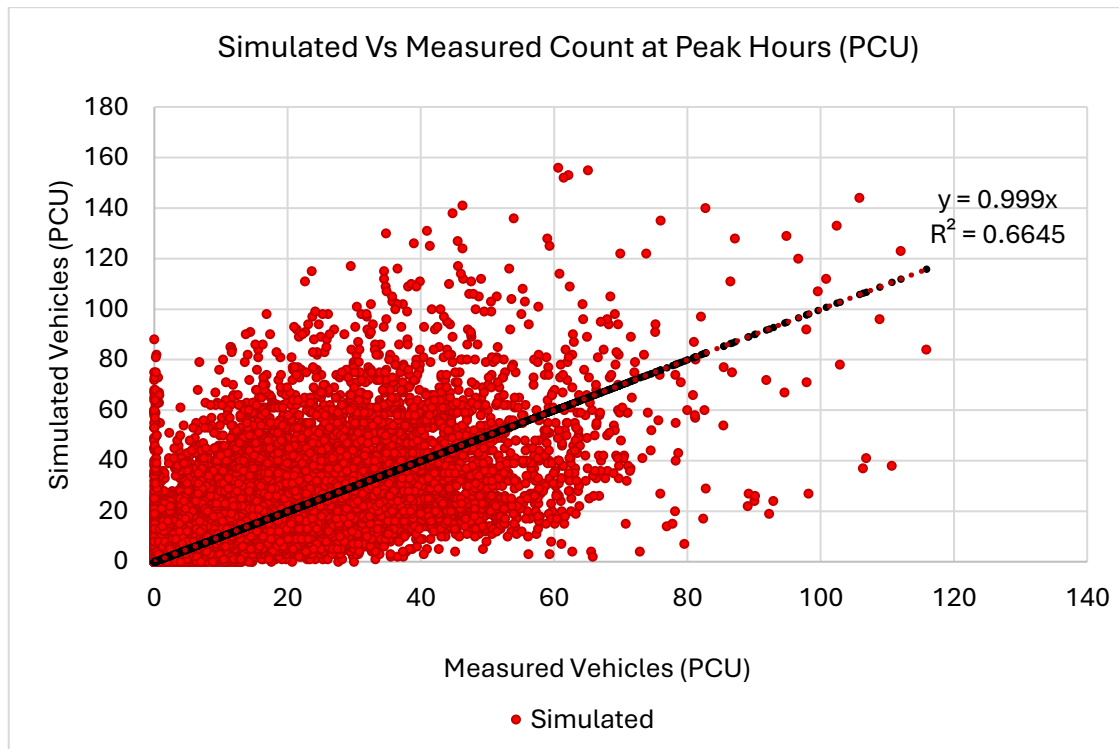


Figure 39 Comptage simulé vs observé en heure de pointe (PCU) pour le réseau OSM 21 avec 5 % de la population EOD

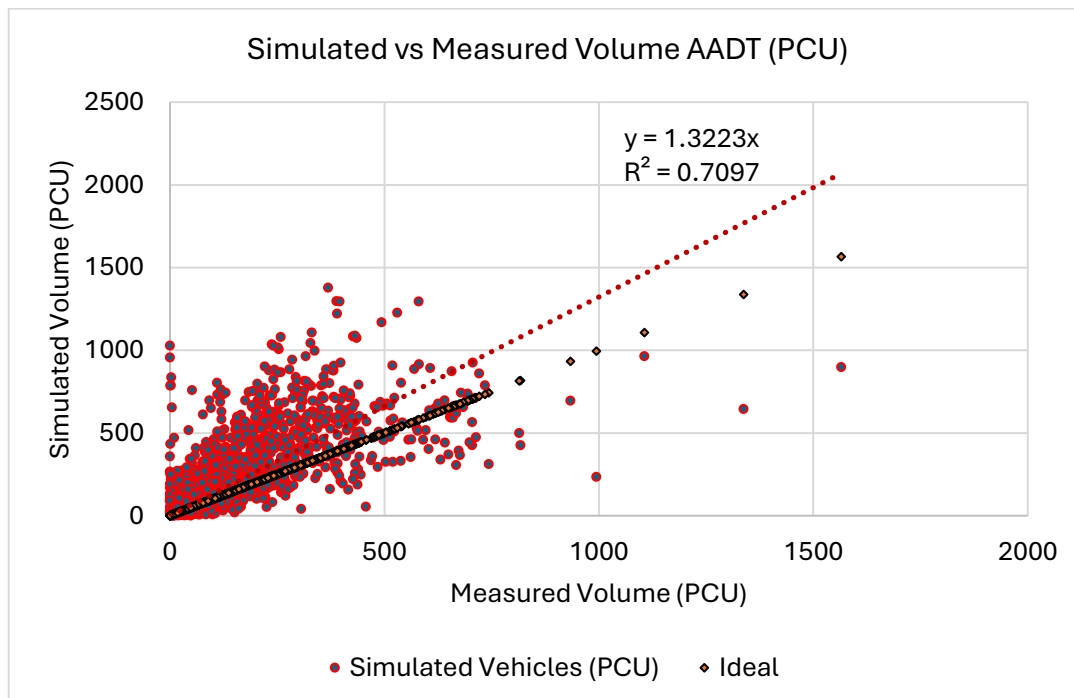


Figure 40 Comptage AADT simulé vs observé (PCU) pour le réseau OSM 21 avec une population EOD de 5 %

Une analyse plus approfondie de l'itération finale, c'est-à-dire la simulation à l'équilibre, montre un pic typique le matin et le soir dans l'utilisation de véhicules particulier et de transport

en commun, comme le montrent les courbes d'arrivée et de départ pour ces deux modes sur les Figure 41 et Figure 42 respectivement.

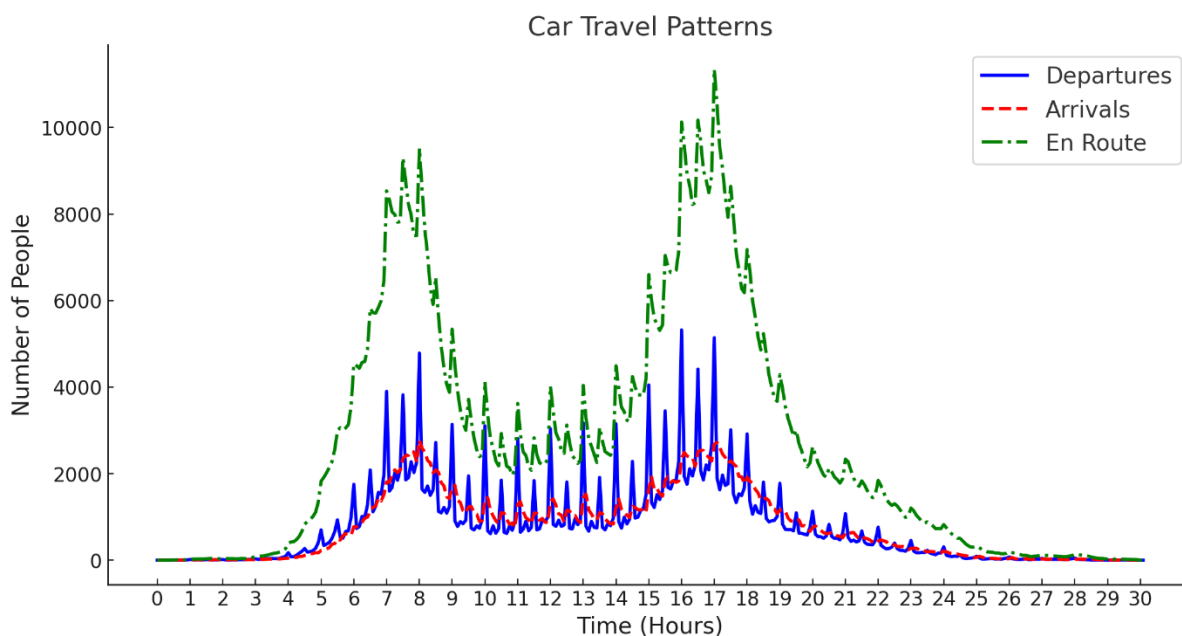


Figure 41 Histogramme des trajets en voiture (Scénario de base OSM 2021 itération 500)

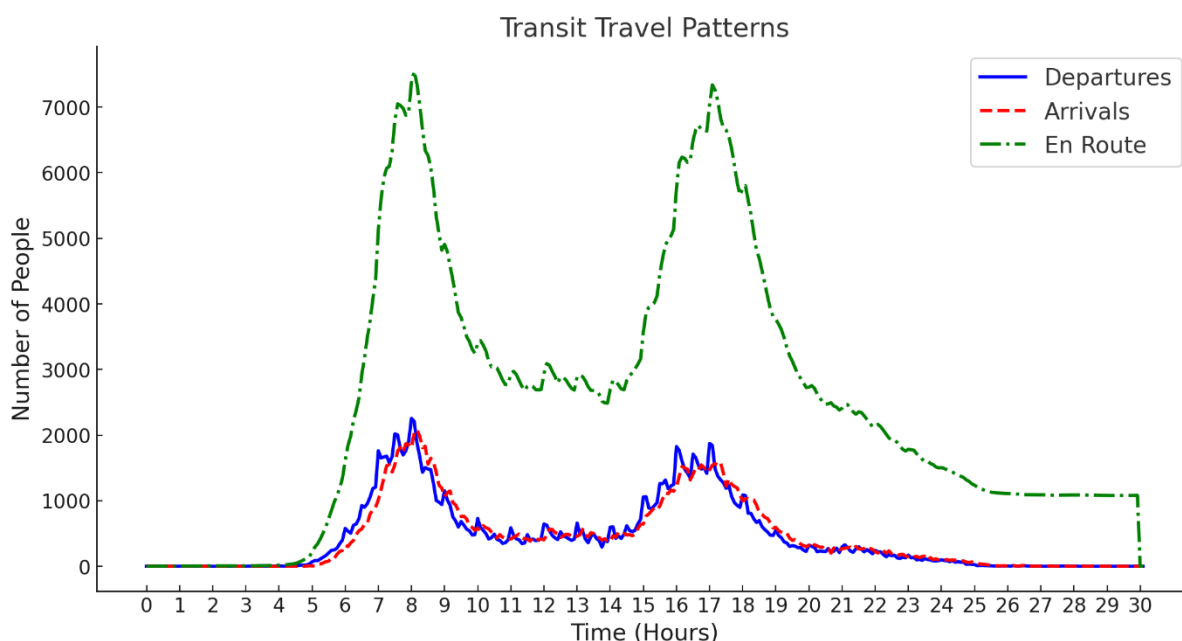


Figure 42 Histogramme des trajets en transit (Scénario de base OSM 2021 itération 500)

Le système de transport en commun présente un léger engorgement, avec environ 1 500 personnes encore sur la route à la fin de la simulation. Afin de mieux comprendre cette problématique, une analyse approfondie des retards aux arrêts de TC a été effectuée sur l'ensemble de la période de simulation. La Figure 43 présente la médiane ainsi que les 5e et 95e percentiles des retards à l'arrivée et au départ aux arrêts. Les résultats indiquent que la

majorité des lignes de transport en commun affichent des retards raisonnables. Cependant, certaines lignes présentent des retards supérieurs à la moyenne (dépassant 20 minutes), ce qui contribue probablement à l'engorgement observé. Ces retards excessifs pourraient être dus à des erreurs de codage affectant certaines lignes, lesquelles feront l'objet d'une analyse approfondie dans les prochaines itérations du modèle.

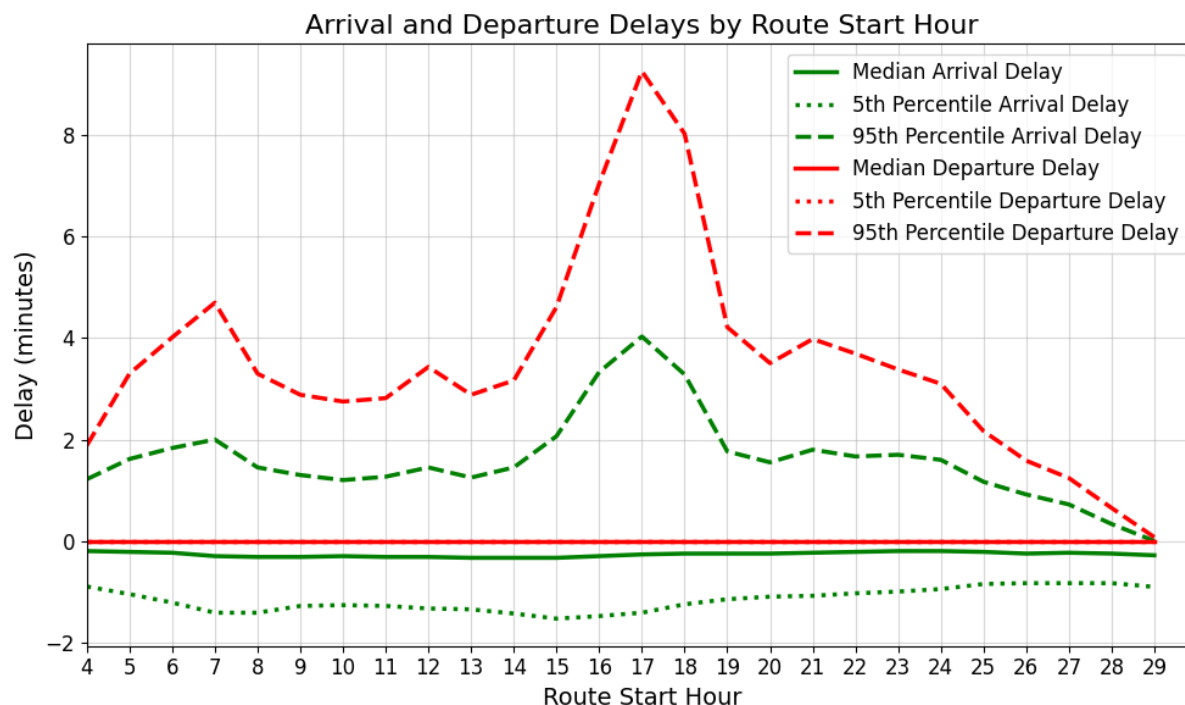


Figure 43 Retard au départ et à l'arrivée en fonction des heures de simulation à l'itération 500 (scénario OSM 21 avec 5 % de la population EOD 21)

Cependant, les deux figures montrent également que certains voyageurs sont bloqués sur les routes à la fin de la simulation. De plus, étant générées directement à partir du clonage de la base de données EOD, les heures de départ des déplacements sont fortement regroupées dans les 15 premières minutes de chaque heure. Cela crée souvent des problèmes, car le nombre de véhicules entrant dans le réseau par des liens spécifiques à un moment donné peut dépasser la capacité du lien résidentiel réduit et créer un blocage local du trafic. Une attribution aléatoire gaussienne de l'heure de départ peut atténuer de tels embouteillages locaux.

Les analyses suivantes constituent une première approche de la collecte et du traitement des données dans MATSim, elles ne sont pas exhaustives. Grâce à son architecture événementielle, MATSim permet une extraction de données détaillée à partir du scénario, facilitant ainsi une analyse comportementale fine des voyageurs individuels et l'étude de dynamiques de mobilité complexes.

MATSim, en tant que modèle basé sur les agents, enregistre chaque événement auquel les agents individuels participent de manière chronologique au format XML dans un fichier appelé fichier d'événements. Des exemples d'événements sont les événements d'entrée et de sortie de lien, les événements de début et de fin d'activité des agents, les événements d'entrée et de sortie de véhicules dans la circulation, les événements de départ et d'arrivée des véhicules dans les équipements, etc. En exploitant ces événements écrits dans l'ordre chronologique, on peut calculer théoriquement toutes les mesures de performance ou de validation qui peuvent être mesurées dans la réalité. Pour démontrer sa capacité, un programme simple a été rédigé pour extraire le flux horaire et le temps de trajet dans tous les liens du réseau en

utilisant ces événements. Ce dernier a été enregistré sous forme de fichier Excel et a été fourni au MTMD pour l'une des simulations plus simples d'une ancienne étude de cas. De plus, les fichiers d'événements de sortie peuvent être utilisés pour visualiser les véhicules dans la circulation et les activités des agents dans le logiciel propriétaire VIA de Simunto.

Le projet initialement prévoyait des scénarios contrastés à agréer avec le MTMD, mais finalement, dans sa réalisation finale, il s'est plus focalisé sur différentes techniques de création de population synthétique pour la simulation. Par conséquent, à titre d'exemple, ci-dessous, nous avons rassemblé des instantanés de congestion provenant de VIA, ainsi que les volumes de trafic pour certains liens névralgiques du réseau de Montréal. De plus, nous avons inclus des statistiques de transfert pour certaines stations de transport en commun du réseau. Ceci donne un aperçu de certaines des analyses que la simulation permet.

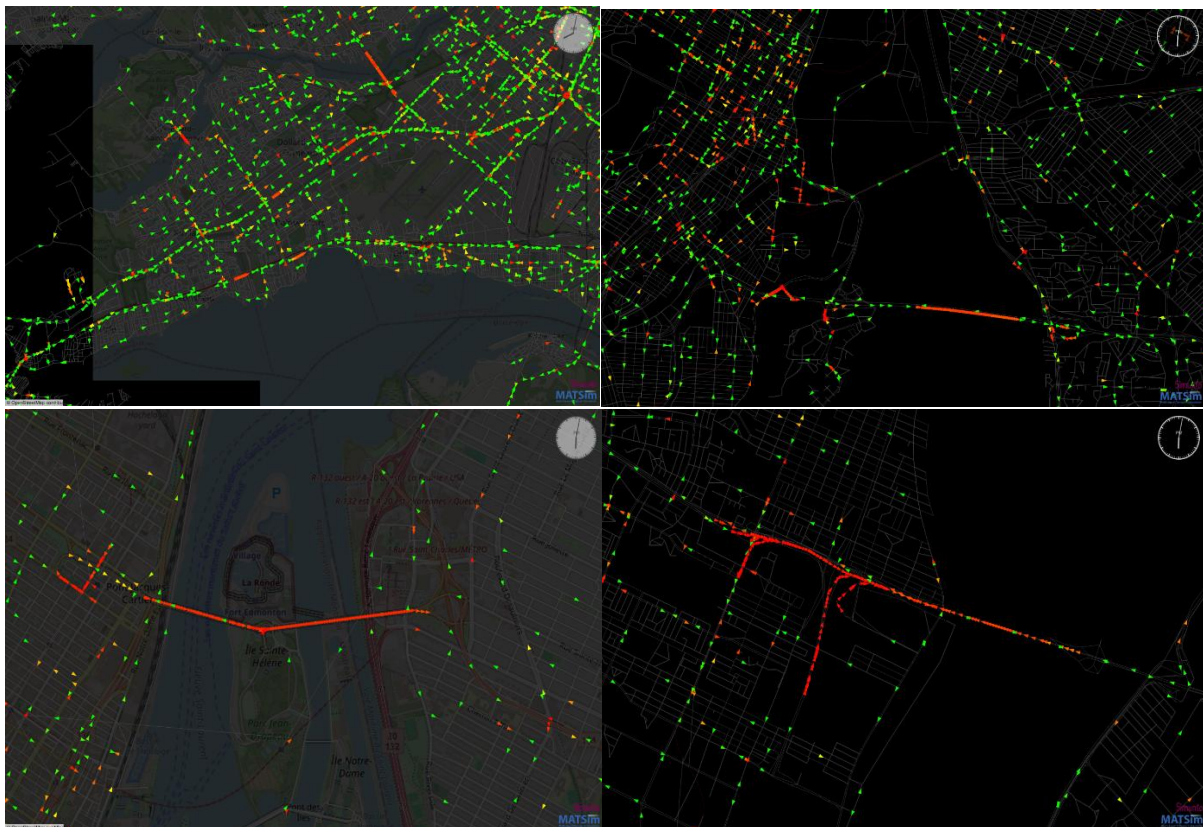


Figure 44 Congestion aux heures de pointe du matin et du soir aux différentes entrées et sorties (réseau OSM 21 restreint aux tournants avec une population EOD 2021 de 5 %)

La Figure 44 présente les principaux liens d'entrée et de sortie de l'Île de Montréal, en mettant en évidence les niveaux de congestion aux heures de pointe du matin et du soir (avec les horaires indiqués sur l'horloge). Les Figure 45 et Figure 46 illustrent respectivement l'évolution horaire du volume de trafic pour les directions d'entrée et de sortie au Pont de l'Île-aux-Tourtes et au Pont Viau.

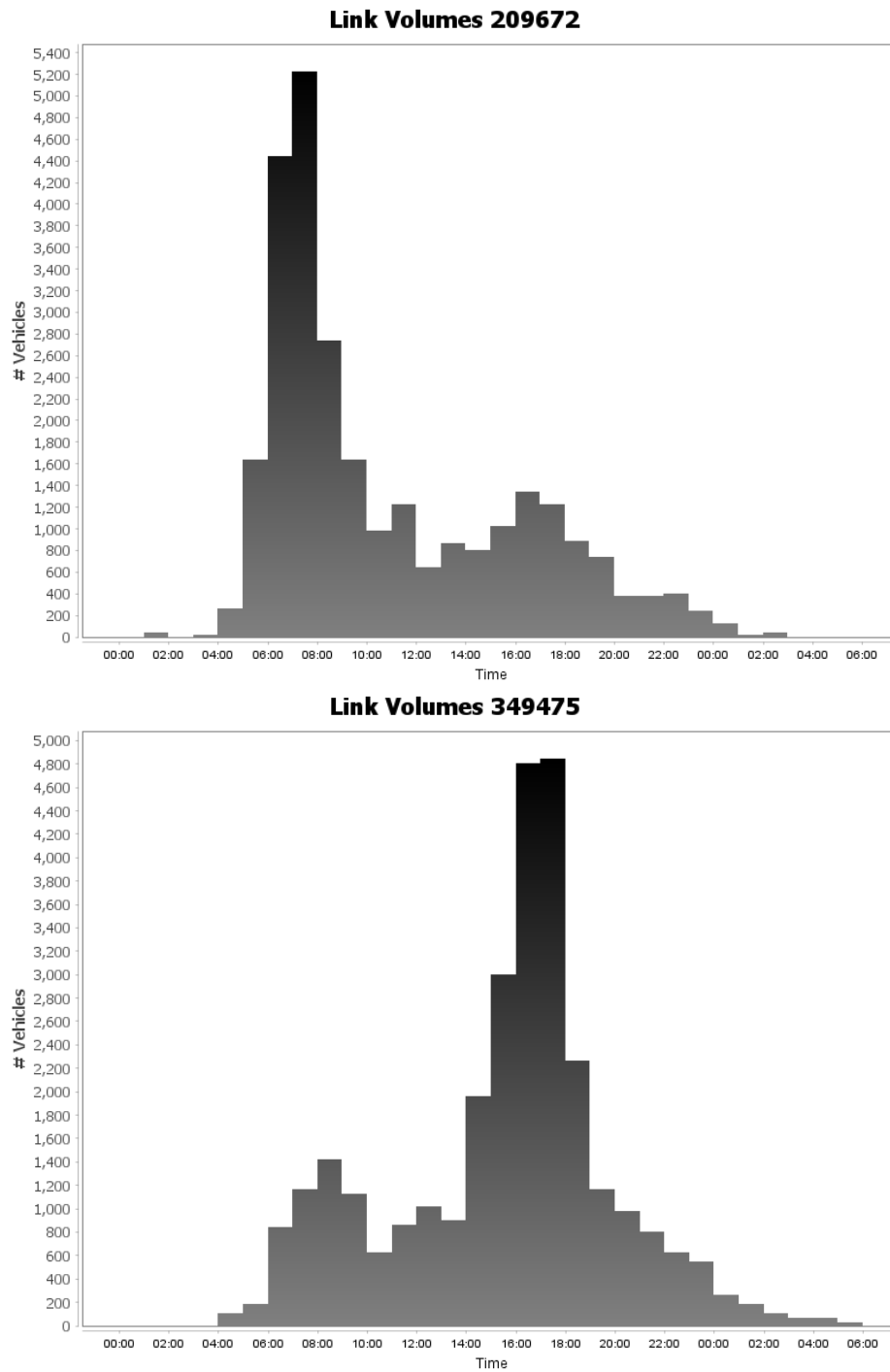


Figure 45 Volume de trafic entrant et sortant de l'Île de Montréal via le Pont de l'Île-aux-Tourtes

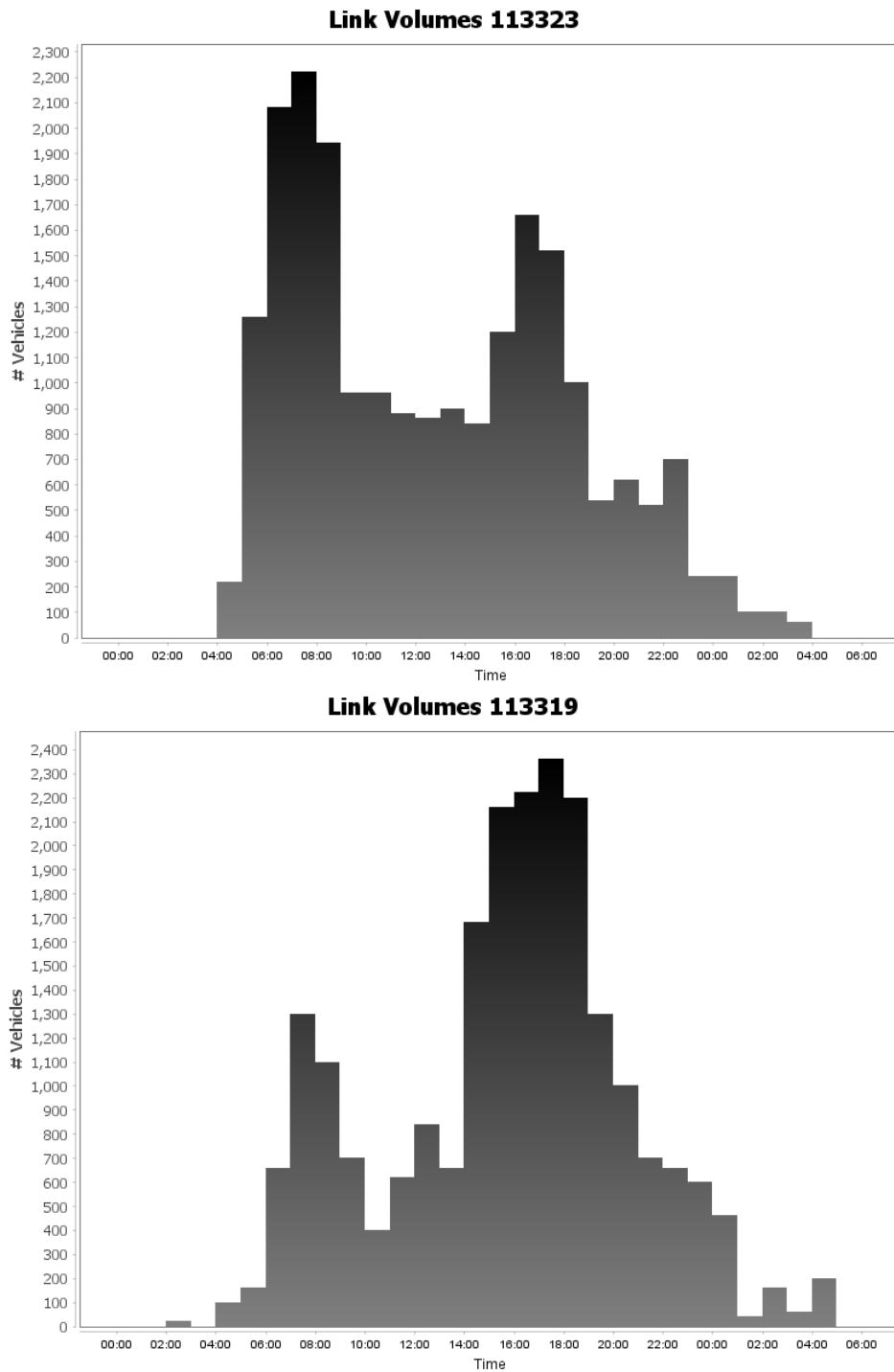


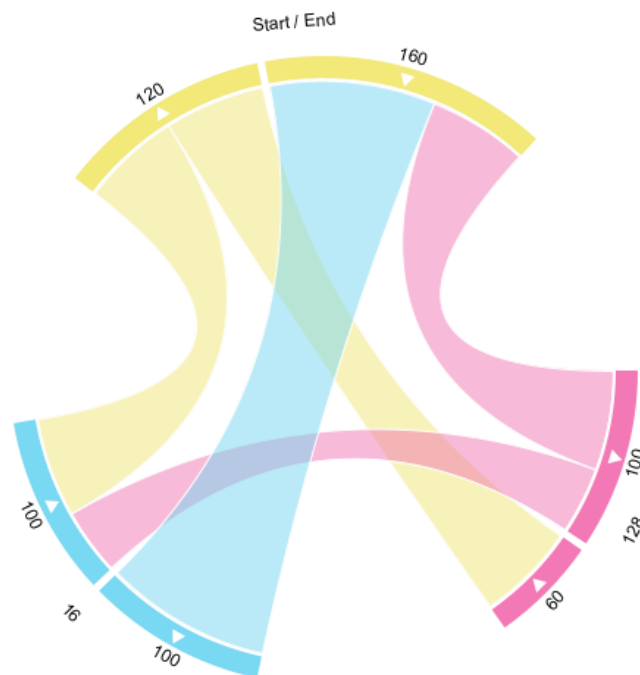
Figure 46 Volume de trafic entrant et sortant de l'Île de Montréal via le Pont Viau

La

Figure 47 représente les correspondances entre différentes lignes de transport en commun aux stations De l'Église et Queen Mary.

Transfers at de l'Église / Sainte-Croix (55699.link:283956)

00:00 – 24:00



Station Snowdon (Queen-Mary / de Westbury) (54074.link:99000)

00:00 – 24:00

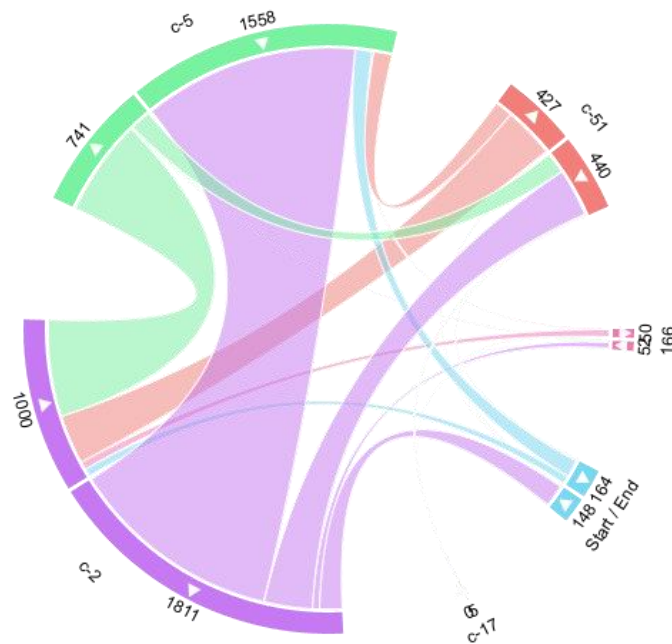


Figure 47 Correspondances à différentes stations

Il doit être mentionné que la modélisation des correspondances peut être affinée davantage. Il serait utile de connaître et donc pouvoir tenir en compte des temps de transfert mesurés sur le terrain, et aussi d'ajouter des réductions d'utilité réalistes (les voyageurs généralement considèrent les correspondances comme très peu désirables), ce qui permettrait finalement un comportement plus réaliste.

L'objectif est d'expliquer comment la demande est chargée dans le réseau sous MATSim. Contrairement à EMME, qui attribue la demande à des nœuds et l'injecte dans le réseau via des liens de connexion, MATSim charge directement la demande sur le lien adjacent au point où la dernière activité de l'agent a eu lieu. Cela est dû au fait que MATSim est un modèle entièrement désagrégé, représentant des agents individuels et des emplacements d'installation.

Si le réseau comporte moins de liens résidentiels que dans la réalité, ou si le trafic de TC et les trajets exogènes sont affectés à des liens résidentiels situés en bordure du réseau, cela peut entraîner une congestion sévère et des goulots d'étranglement. Ce problème est observé dans le réseau converti d'EMME, où les liens résidentiels étaient sous-représentés, ainsi que dans une version antérieure du modèle OSM 2021, où les trajets exogènes et de TC étaient incorrectement affectés aux liens résidentiels situés aux extrémités du réseau. Pour remédier à cela dans le réseau OSM, les trajets exogènes et de TC ont été réaffectés à des installations situées à proximité des autoroutes en bordure de la carte, en veillant à ce qu'ils soient répartis de manière spatialement équilibrée.

Corriger ce problème dans le réseau EMME est plus complexe. Même après avoir ajusté les trajets externes et de transit comme dans le réseau OSM, la faible capacité des liens résidentiels au centre du réseau reste un problème. Si les liens de connexion d'EMME étaient disponibles, ils pourraient être recréés dans MATSim avec une capacité plus élevée, permettant ainsi l'entrée des voyageurs dans le réseau via ces liens sans modifier la structure du réseau physique. Cependant, en l'absence de ces données, la seule option était d'augmenter la capacité des liens résidentiels pour atténuer les goulots d'étranglement. Dans les réseaux EMME 2021 et EMME 2041, la capacité minimale des liens résidentiels a donc été augmentée à 1000. Malgré cet ajustement, des blocages persistent, comme observé dans les résultats d'EMME 2021. Les améliorations futures des scénarios EMME 2021 et 2041 nécessiteront l'intégration de liens de connexion et une affectation plus précise de l'origine de la demande à proximité de ces liens afin d'assurer des entrées et sorties fluides des voyageurs dans le réseau.

En ce qui concerne le système de transport en commun, la capacité des véhicules joue un rôle important dans le temps d'attente et la congestion de l'ensemble du système. Comme les données GTFS ne fournissent pas cette information, une capacité fixe (300 par véhicule de métro, 70 par autobus) a été attribuée par défaut par la contribution pt2MATSim, qui a ensuite été réduite à 5% de sa capacité pour chaque véhicule. Montréal est célèbre pour son système de transport en commun très efficace avec des voitures de métro à grande capacité et des autobus articulés sur de nombreuses lignes pendant les heures de pointe. Ces facteurs devraient théoriquement augmenter la capacité globale du système de transport en commun et réduire le temps d'attente. Cependant, en l'absence des données nécessaires, les paramètres du système de transport en commun ont été maintenus à la valeur par défaut définie par le logiciel pt2MATSim, ce qui pourrait entraîner une réduction des capacités de TC et des agents bloqués dans le système à la fin de la simulation. De plus, des stratégies de replanification qui impliqueraient un plus faible nombre d'agents changeant leurs choix à chaque itération, mais en utilisant un plus grand nombre d'itérations pourraient aider à atteindre une solution d'équilibre meilleure et plus stable, apaisant une partie de la micro-congestion dans le réseau routier et le réseau de TC.

12.2 Scénario OSM 2041 avec restrictions de virage

Cette section présente une analyse similaire à la section 12.1, cette fois pour le scénario OSM 2041. La Figure 48 illustre l'évolution des pointages au fil des itérations de simulation, tandis que la

Figure 49 présente la répartition du temps de calcul par itération tout au long de la simulation.



Figure 48 Scores vs. Itération (scénario OSM 2041 avec restrictions de virage)

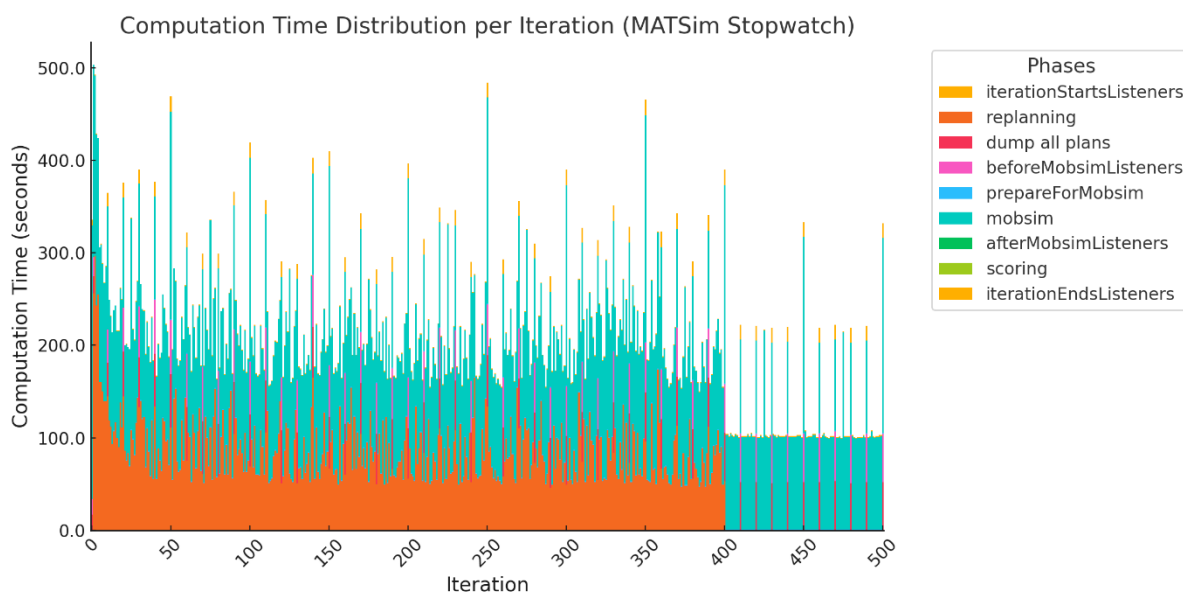


Figure 49 Temps de calcul par itération (OSM 2041, EOD 41 scénario 5%)

Les pointages convergés – meilleur, moyen et exécuté – sont légèrement inférieurs dans le scénario OSM 2041 par rapport au scénario OSM 2021, ce qui suggère une diminution du bien-être social et une congestion accrue. Les calculs ont été effectués sur un PC équipé d'un processeur Ryzen 7900X à 24 cœurs et de 128 Go de mémoire, rendant les temps de calcul rapportés représentatifs de ce système. Comme pour le scénario OSM 2021, la convergence des pointages présente des oscillations, indiquant qu'un taux d'apprentissage réduit permettrait une convergence plus fluide lors des simulations futures. La Figure 50 montre l'évolution de la répartition modale au fil des itérations de simulation.

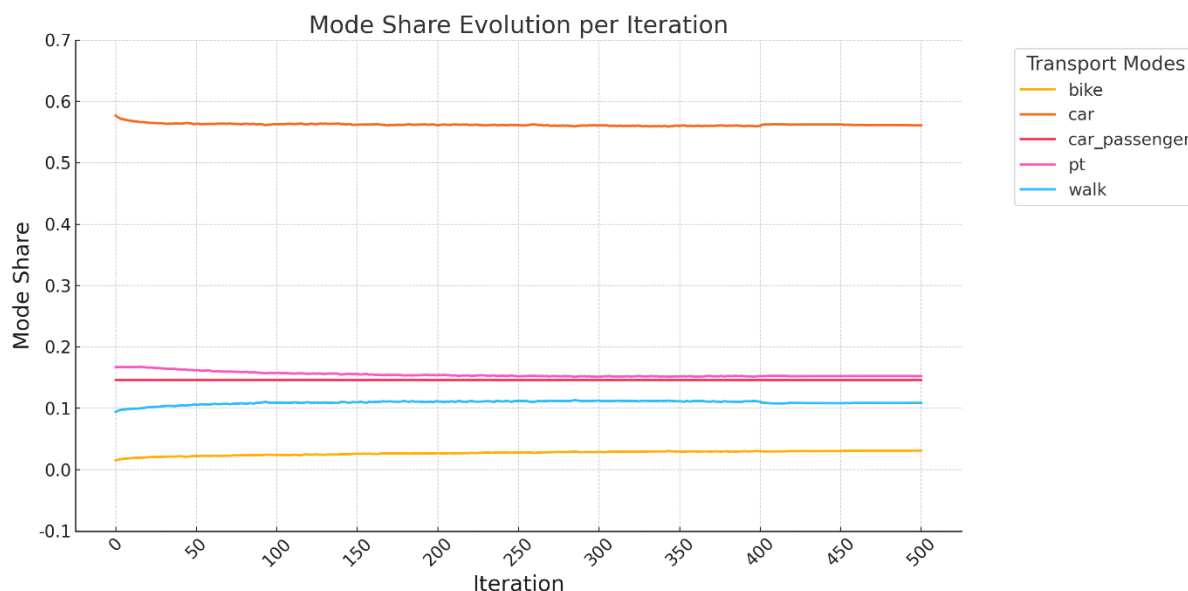


Figure 50 Part modale vs. Itération (scénario OSM 2041 avec restrictions de virage)

Comparé au scénario OSM 2021, la part des modes de déplacement à pied et à vélo a augmenté, tandis que celles des transports en commun et de la voiture ont diminué. Étant donné qu'on n'a pas fait d'hypothèses concernant un changement futur de préférences individuelles, l'explication plus plausible est que le réseau soit plus congestionné. Ceci signifie que les changements dans le réseau prévus d'ici 2041, et implémentés dans la simulation, ne compensent pas l'augmentation de la population.

Les Figure 51 et Figure 52 illustrent le nombre de passagers arrivant, partant et en route pour les modes voiture et transport en commun tout au long de la journée de simulation.

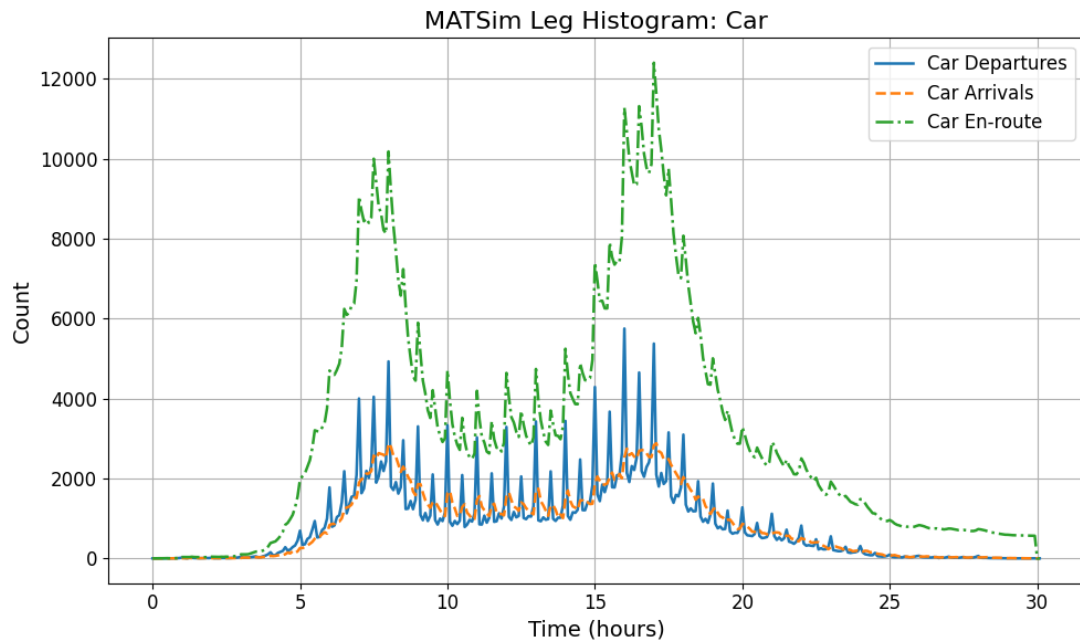


Figure 51 Histogramme des trajets en voiture (Scénario OSM 2041 itération 500)

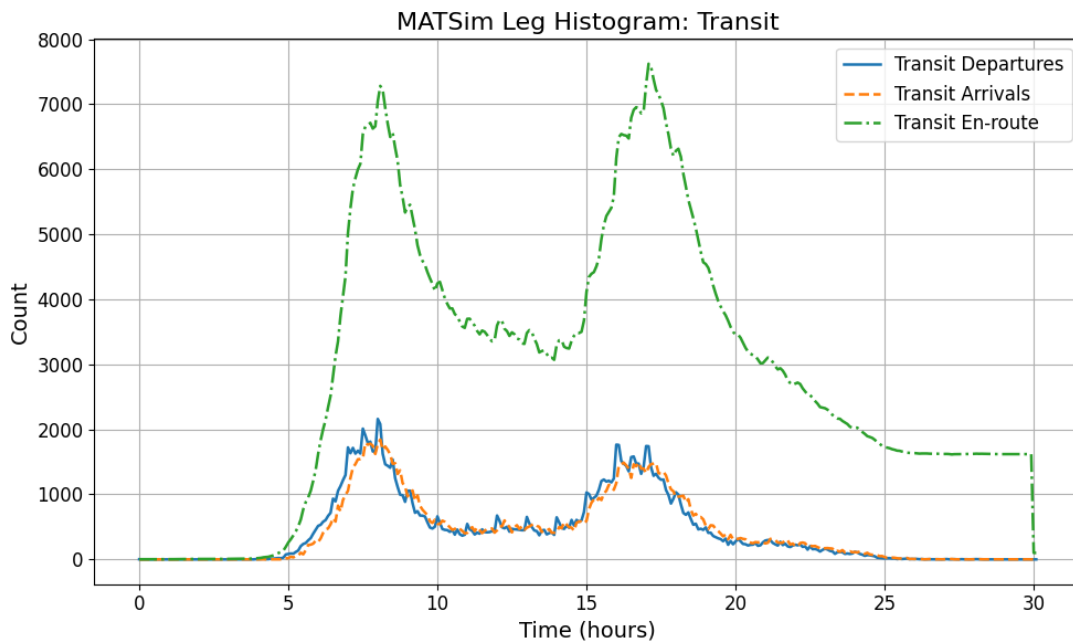


Figure 52 Histogramme des trajets en transport en commun (Scénario OSM 2041 itération 500)

Le trafic automobile subit une légère congestion en fin de journée, avec environ 1 000 voyageurs bloqués sur la route. De manière similaire, il y a une légère congestion dans le réseau de transport en commun aussi, qui laisse près de 1800 passagers immobilisés dans le trafic.

Étant donné que les systèmes de transport en commun, en particulier les bus, partagent les mêmes voies que les véhicules particuliers, un engorgement du réseau routier peut facilement se propager sur le réseau de transport en commun. Cet effet est d'autant plus accentué que les véhicules de transport en commun ont une capacité bien supérieure à celle des voitures, ce qui entraîne un nombre plus important de passagers bloqués.

Afin d'évaluer plus précisément l'ampleur des retards dans le transport en commun, la Figure 53 présente la médiane ainsi que les 5e et 95e percentiles des retards d'arrivée et de départ des véhicules de transport en commun aux arrêts tout au long de la simulation.

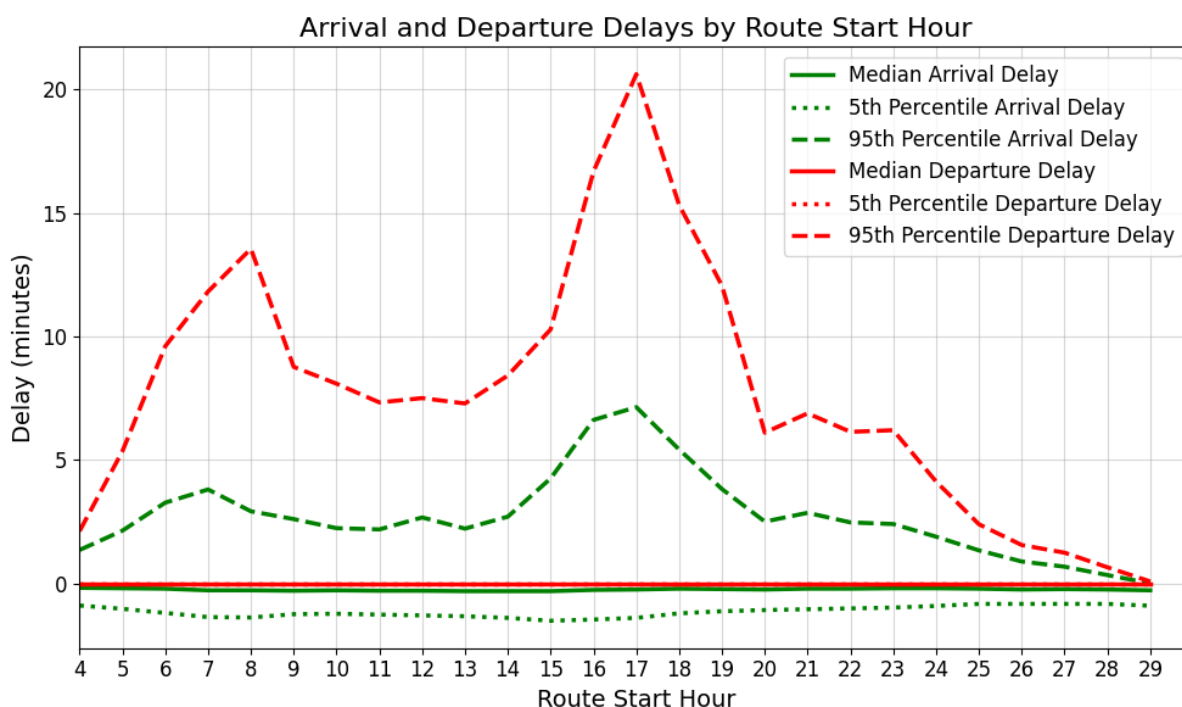


Figure 53 Retard à l'arrivée et au départ Scénario OSM 2041

La Figure 53 montre que, bien que la médiane des retards d'arrivée et de départ reste proche de zéro, les retards au 95e percentile sont nettement plus élevés que dans le scénario OSM 2021, avec un retard de départ maximal atteignant 20 minutes contre 9 minutes. La Figure 54 met en évidence un engorgement du réseau dans le scénario 2041 à deux endroits distincts: l'un près du centre-ville et l'autre à proximité de la nouvelle voie rapide proposée. Ceci constitue probablement la principale cause de la congestion du réseau routier et, dans une certaine mesure, du blocage du réseau de transport en commun.

Une analyse plus approfondie du système de transport en commun suggère d'éventuelles incohérences dans la représentation de certaines lignes, qui seront corrigées et affinées dans les prochaines itérations du modèle.

Comme dans la section 12.1, on montre ici un échantillon des résultats de la simulation, cette fois pour le scénario 2041. Spécifiquement, la figure 54 montre des endroits où des embouteillages se produisent, tandis que les figures 55 et 56 montrent la situation du réseau aux heures de pointe du matin et de l'après-midi, respectivement. La figure 57 montre le volume de trafic sur le pont Champlain dans les deux directions au fil de la journée.



Figure 54 Embouteillage dans le scénario OSM 2041

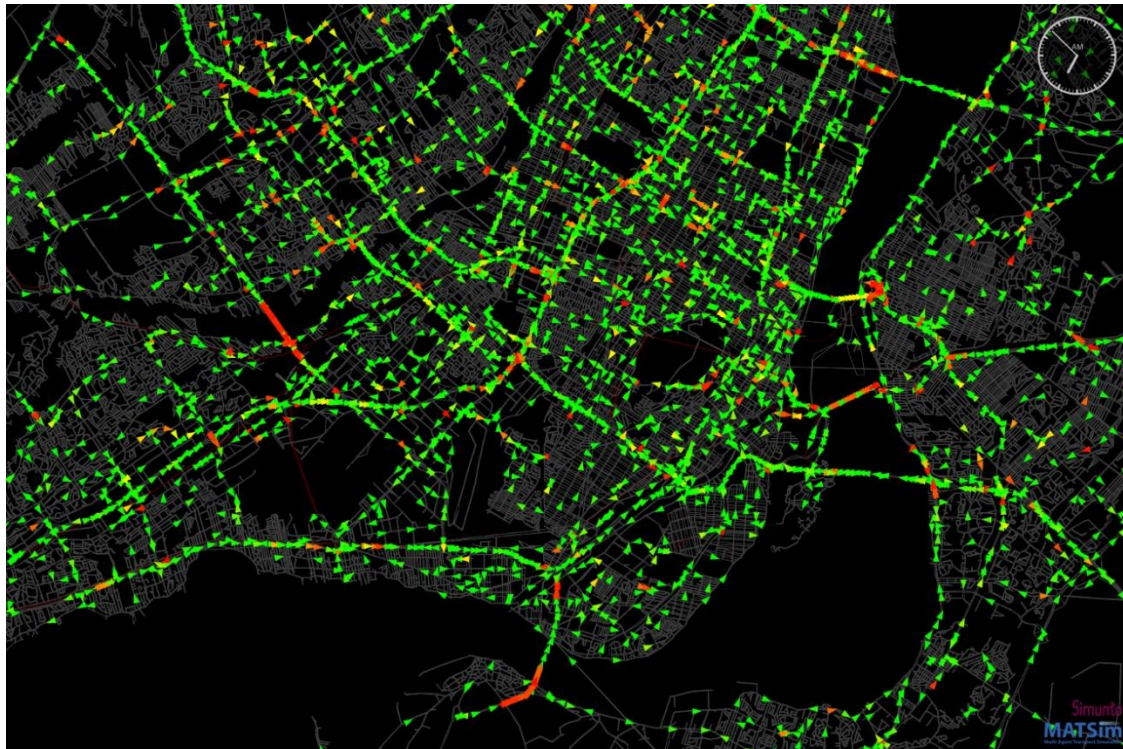


Figure 55 Trafic de pointe du matin en direction de l'île de Montréal



Figure 56 Trafic à l'heure de pointe de l'après-midi vers l'extérieur de l'île de Montréal

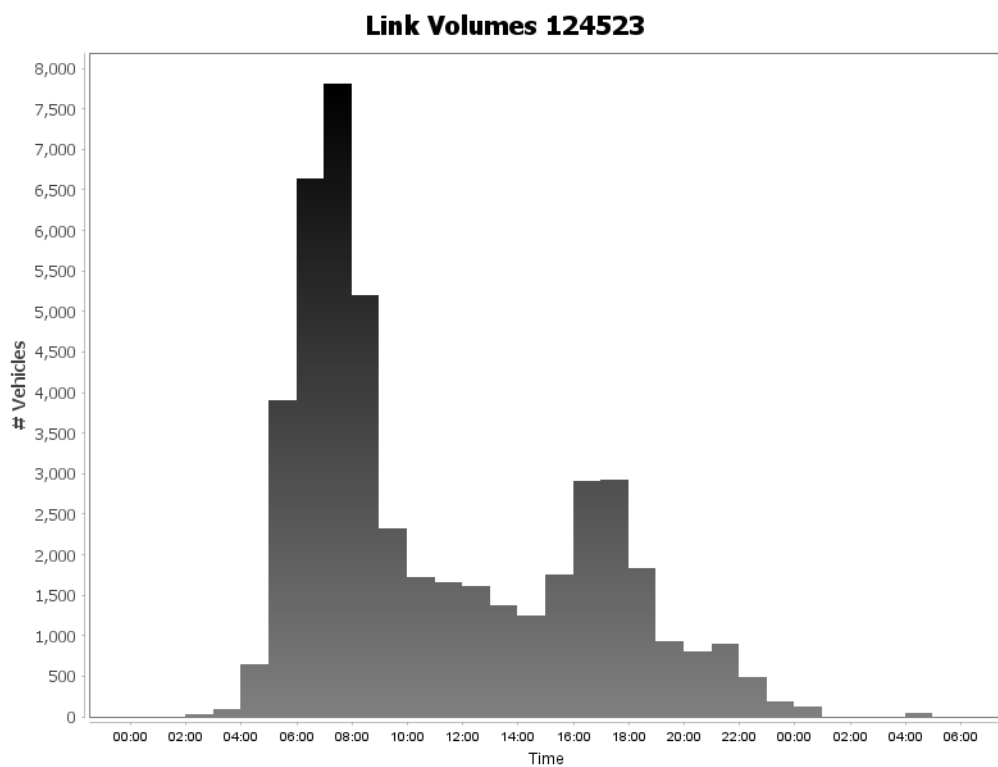
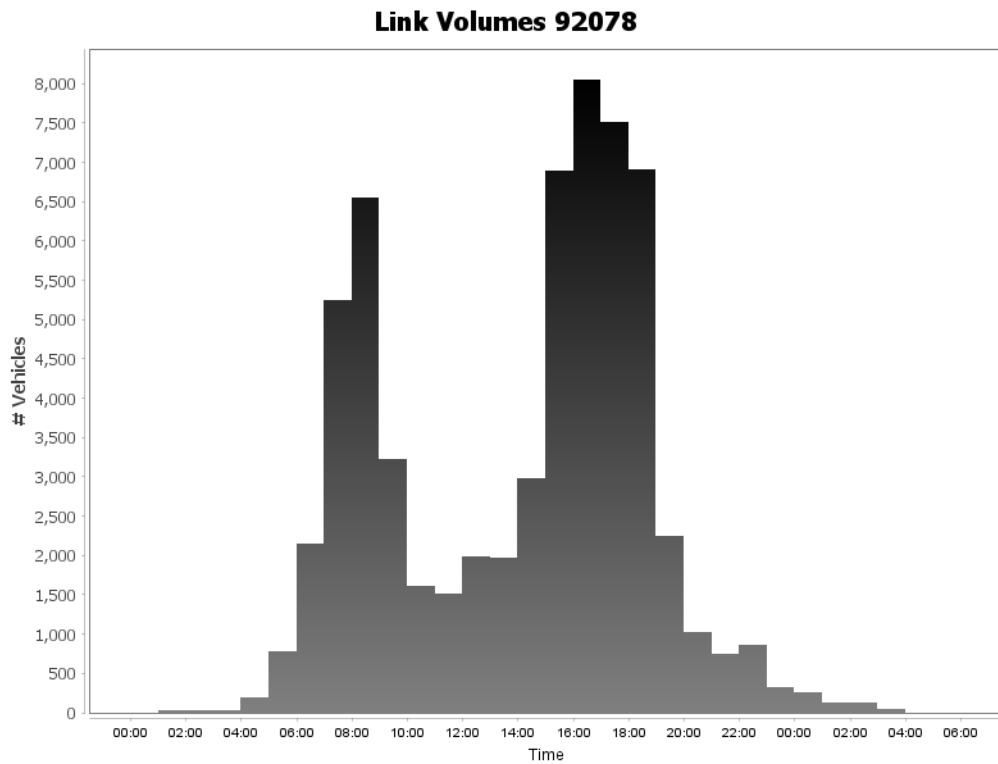


Figure 57 Volume de trafic sur le Pont Samuel-De Champlain

Comme dans le réseau 2041, on a ajouté de liens qui reflètent le projet déjà confirmé, on montre ici certains d'entre eux à titre d'exemple. La figure 58 montre la nouvelle voie rapide in Laval avec son volume, et la figure 59, de nouveaux liens routiers dans la zone de l'aéroport.

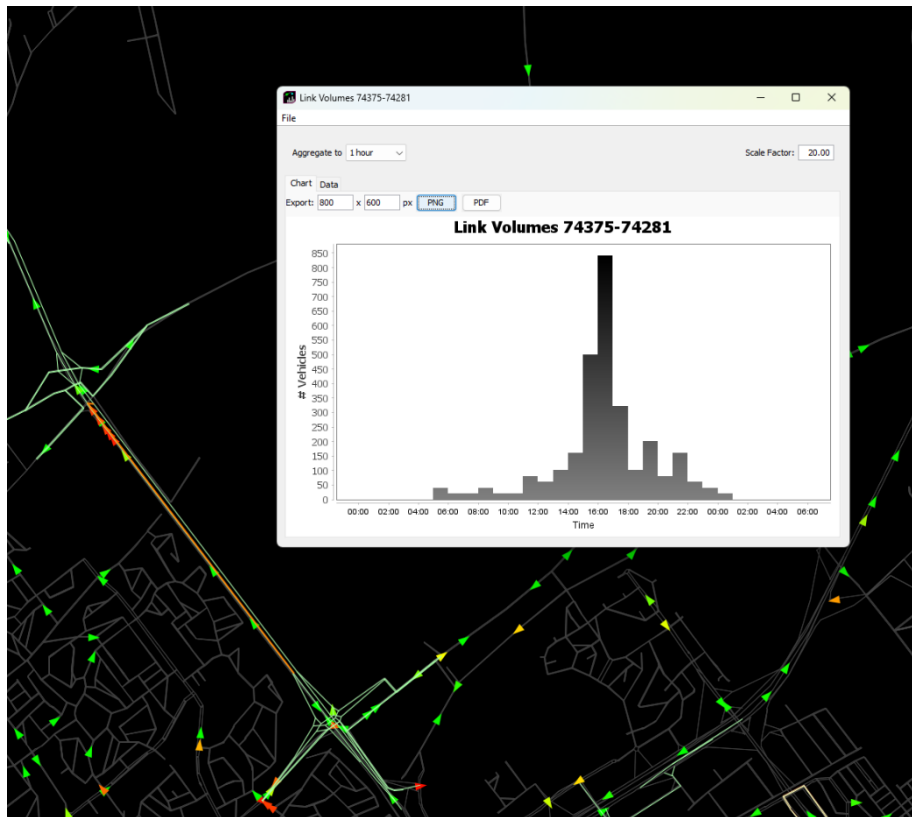


Figure 58 Volume de trafic sur la nouvelle voie rapide proposée à Laval

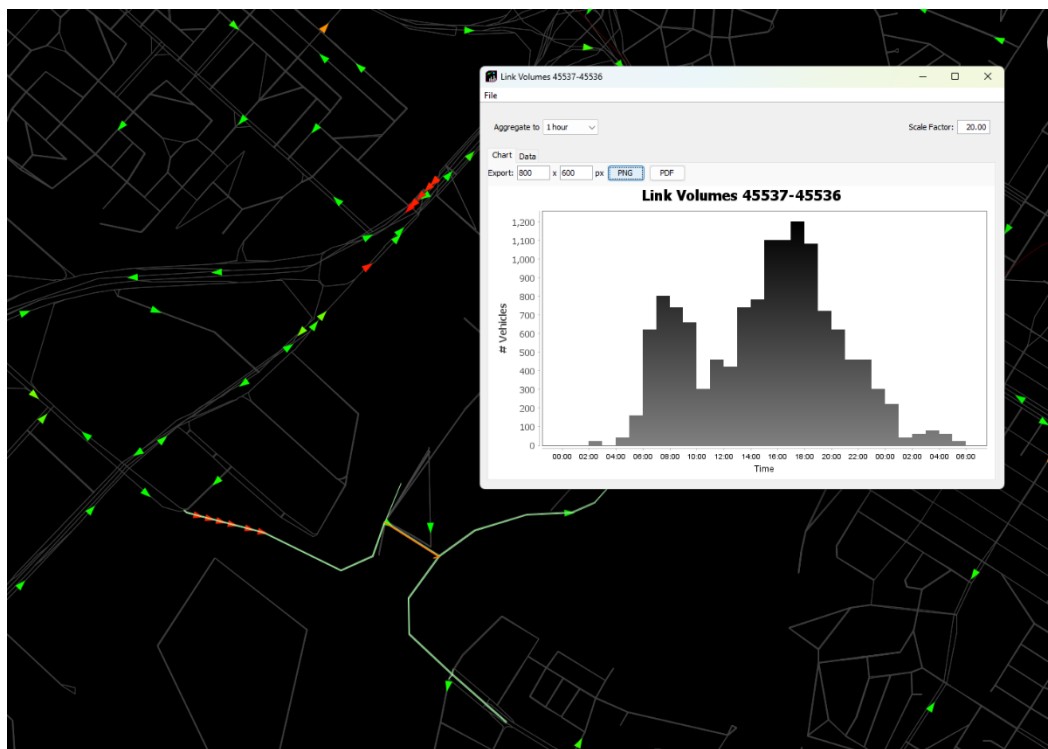
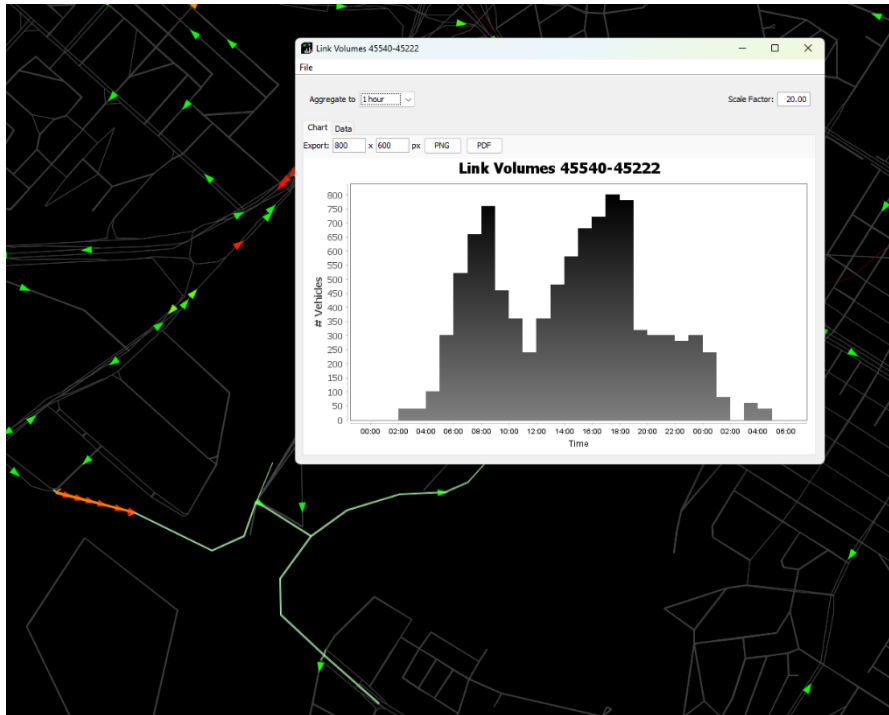
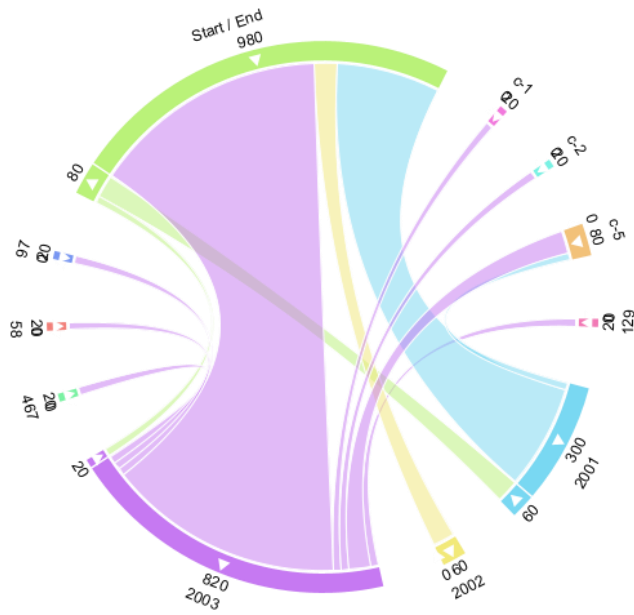


Figure 59 Volume de trafic dans le nouveau segment de route proposé

Les résultats relatifs à la gare du Ruisseau sur la ligne REM des Deux Montagnes, et le nouveau terminus Panama à Longueuil sont illustrés à la Figure 60, suivis par l'achalandage d'une nouvelle ligne de bus à Montréal Nord dans la Figure 61.

Transfers at GARE DU RUISSEAU (124)

00:00 – 24:00



Transfers at TERM. STAT. PANAMA (37625)

00:00 – 24:00

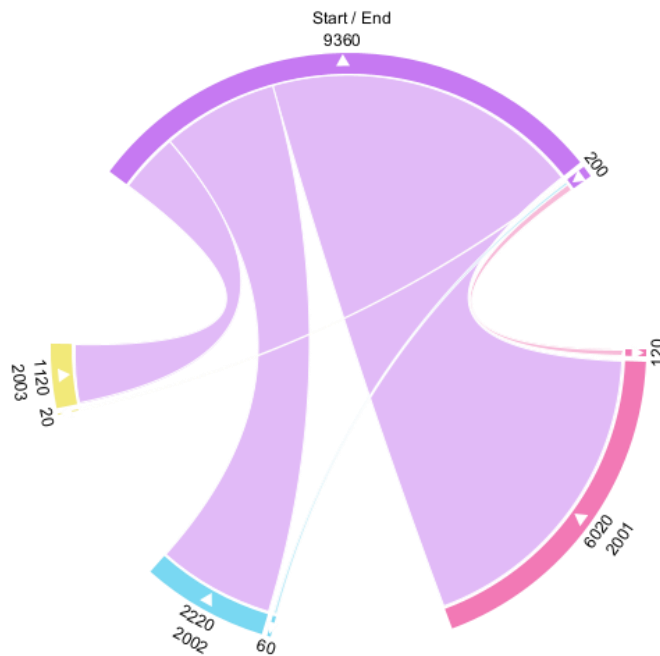
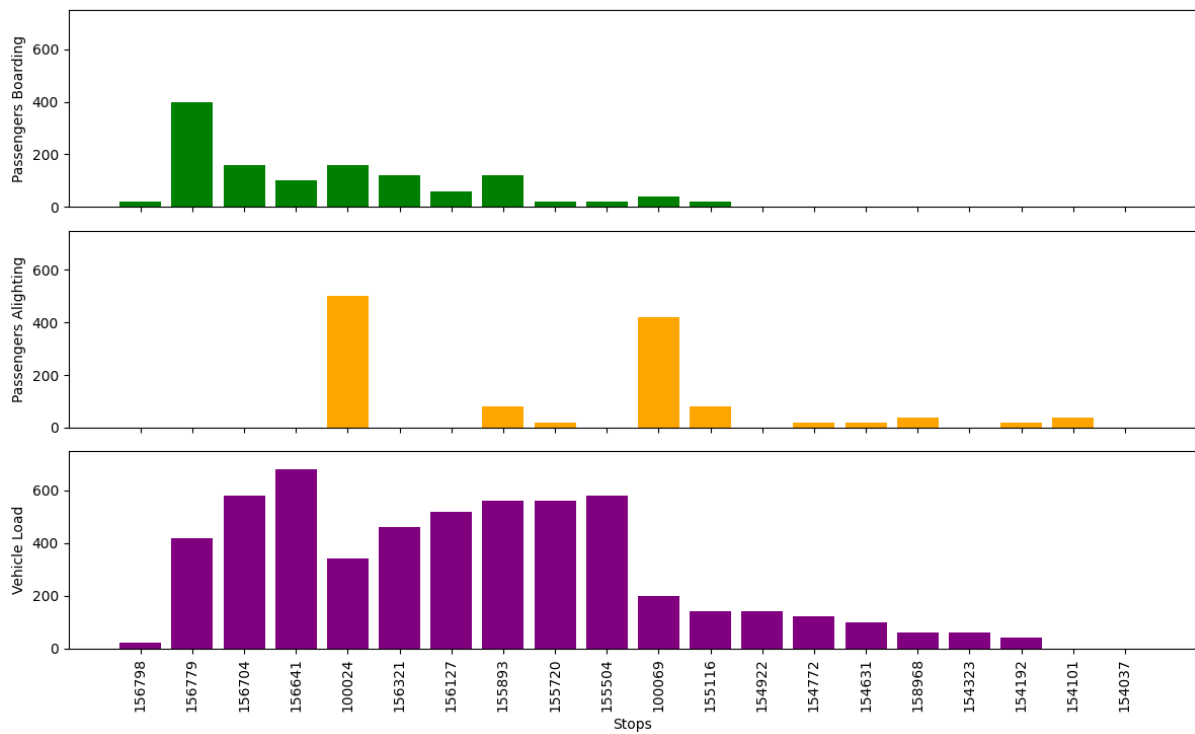
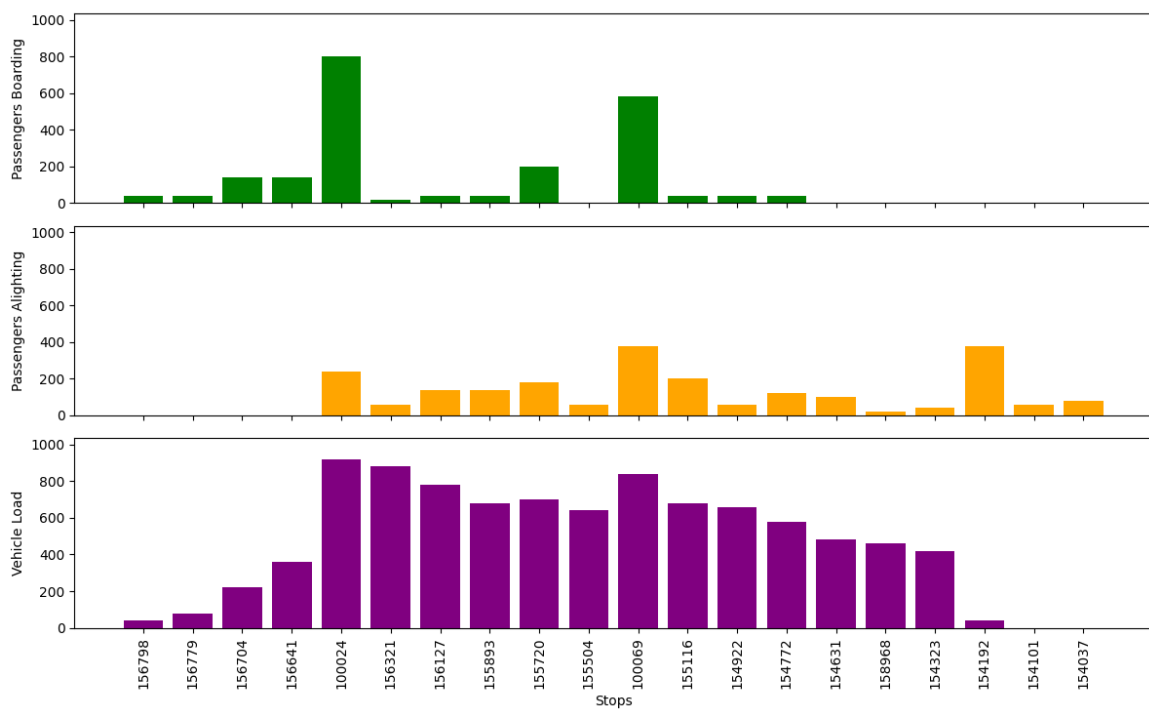


Figure 60 Statistiques de transfert de la route 2001

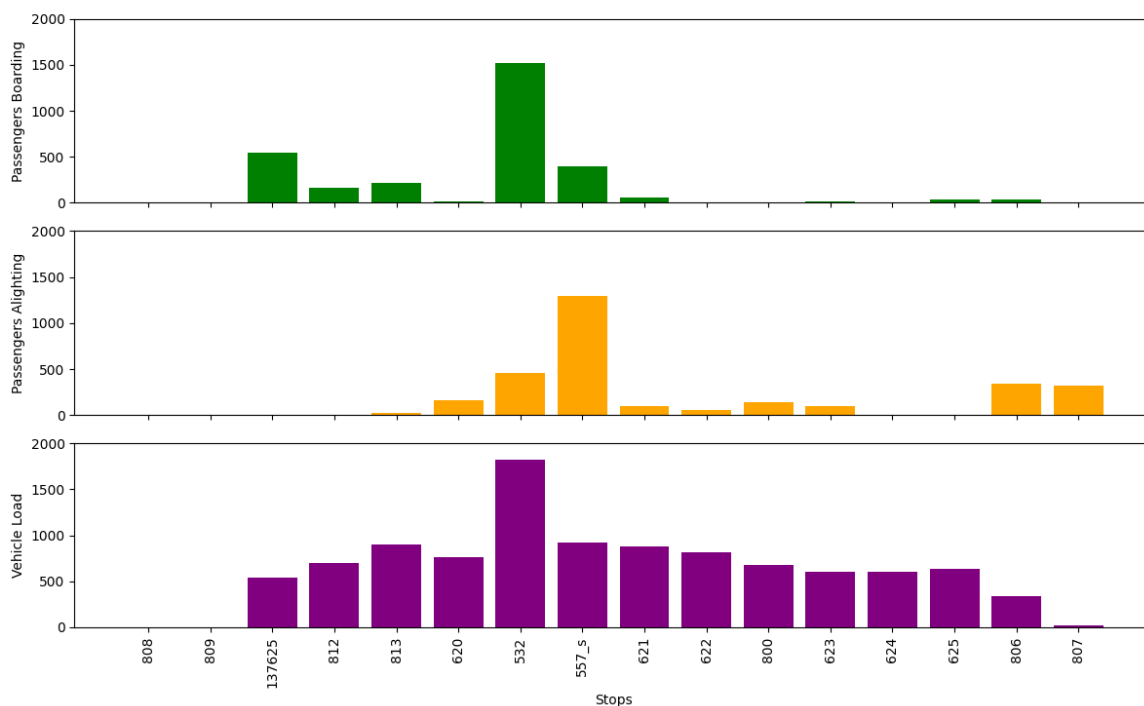
Transit Passenger Flow Analysis (Morning Peak (6.30am - 10 am) for transit line 10439)



Transit Passenger Flow Analysis (Afternoon Peak (5 pm - 8 pm) for transit line 10439)



Transit Passenger Flow Analysis (Morning Peak (6.30am - 10 am) for transit line 12003)



Transit Passenger Flow Analysis (Afternoon Peak (5 pm - 8 pm) for transit line 12003)

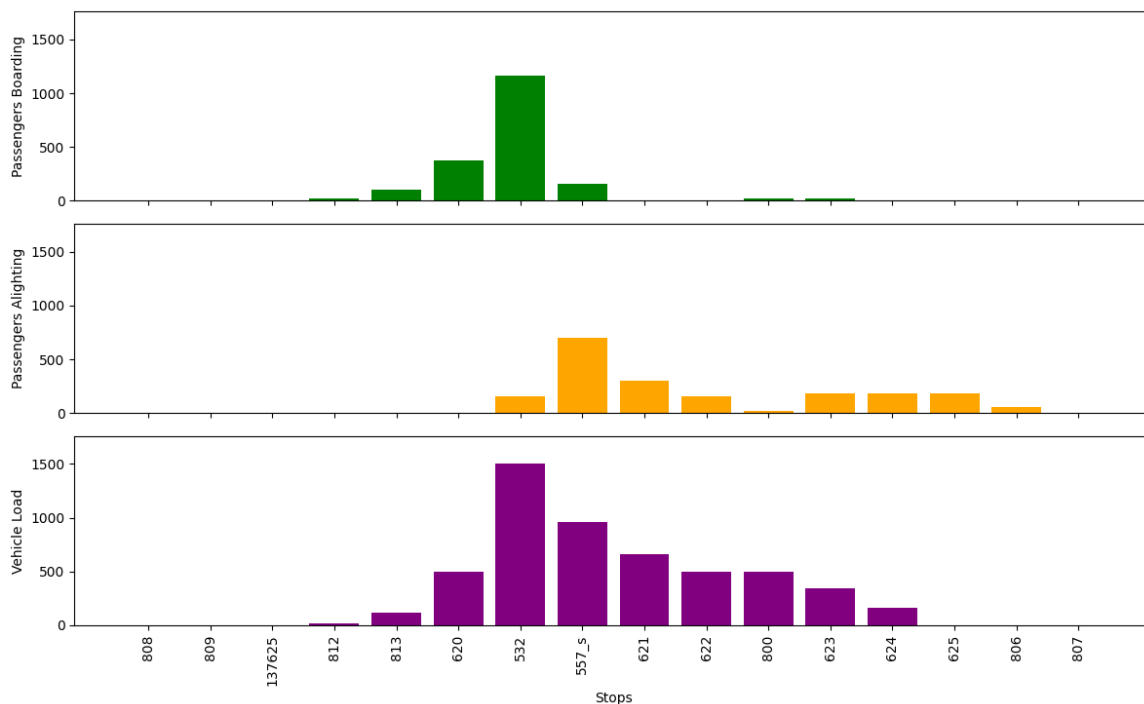


Figure 61 Embarquement, débarquement et chargement des véhicules aux heures de pointe du matin et de l'après-midi (lignes 10439 et 12003)

12.3 Scénario EMME 2021 avec restrictions de virage

Le réseau EMME comporte moins de liens résidentiels que dans la réalité, ce qui favorise le modèle statique d'EMME. Dans EMME, la demande est chargée aux centroides de zone, puis acheminée via des liens de connexion vers le réseau réel. De plus, EMME étant un modèle

statique, il utilise fréquemment la méthode d'affectation du trafic SOLA, qui n'est pas contrainte par la capacité et s'appuie généralement sur des fonctions de retard volumétrique pour estimer les temps de trajet. Afin de tenir compte des feux de circulation, EMME réduit la capacité et la vitesse des liens, ce qui n'entrave pas la convergence vers l'équilibre utilisateur.

À l'inverse, MATSim, en tant que modèle entièrement désagrégé, attribue directement les agents aux liens adjacents aux installations où ils exercent leurs activités. En raison du nombre limité de liens résidentiels dans le réseau EMME, un plus grand nombre d'installations sont associées à ces liens qu'en réalité, ce qui entraîne une concentration des départs d'agents. Ces liens, étant courts et dotés d'une faible capacité de stockage et de débit, se congestionnent rapidement, provoquant un effet de refoulement sur les liens environnants, un phénomène absent dans EMME. Une fois que ce refoulement atteint les autoroutes, la congestion se propage rapidement dans l'ensemble du réseau, entraînant un blocage sévère qui empêche les agents d'exécuter leurs plans quotidiens. Par conséquent, les agents ne parviennent pas à générer des pointages fiables pour leurs plans, ce qui perturbe le processus de convergence. La Figure 62 illustre ce scénario.



Figure 62: Blocage du scénario EMME

Ce phénomène a également été observé dans les scénarios OSM 2021 et OSM 2041, où le trafic externe et de transit était incorrectement attribué aux liens résidentiels situés en périphérie du réseau. Le problème a été résolu en réattribuant ces trajets à des installations situées à proximité des autoroutes, garantissant ainsi une répartition spatiale plus homogène. Cela a permis d'éviter une entrée soudaine et massive d'agents susceptible de saturer même les liens autoroutiers.

Cependant, dans le réseau EMME, l'encombrement apparaît au centre du réseau plutôt qu'en périphérie, ce qui complique sa résolution sans modification du réseau lui-même. La meilleure solution consisterait à obtenir les liens de connexion d'EMME, à leur attribuer une capacité et une longueur élevées, puis à les utiliser comme points d'injection de la demande. Cependant,

en l'absence de ces données, une approche alternative a été testée en augmentant la capacité minimale des liens résidentiels à 1 000 véhicules par heure. Cette modification a permis d'atténuer partiellement le blocage, mais le système n'a pas entièrement convergé vers un équilibre.

Malgré ces défis, nous présentons ci-dessous les résultats obtenus.

La Figure 63 illustre la convergence des scores au fil des itérations de simulation pour le scénario EMME 2021.

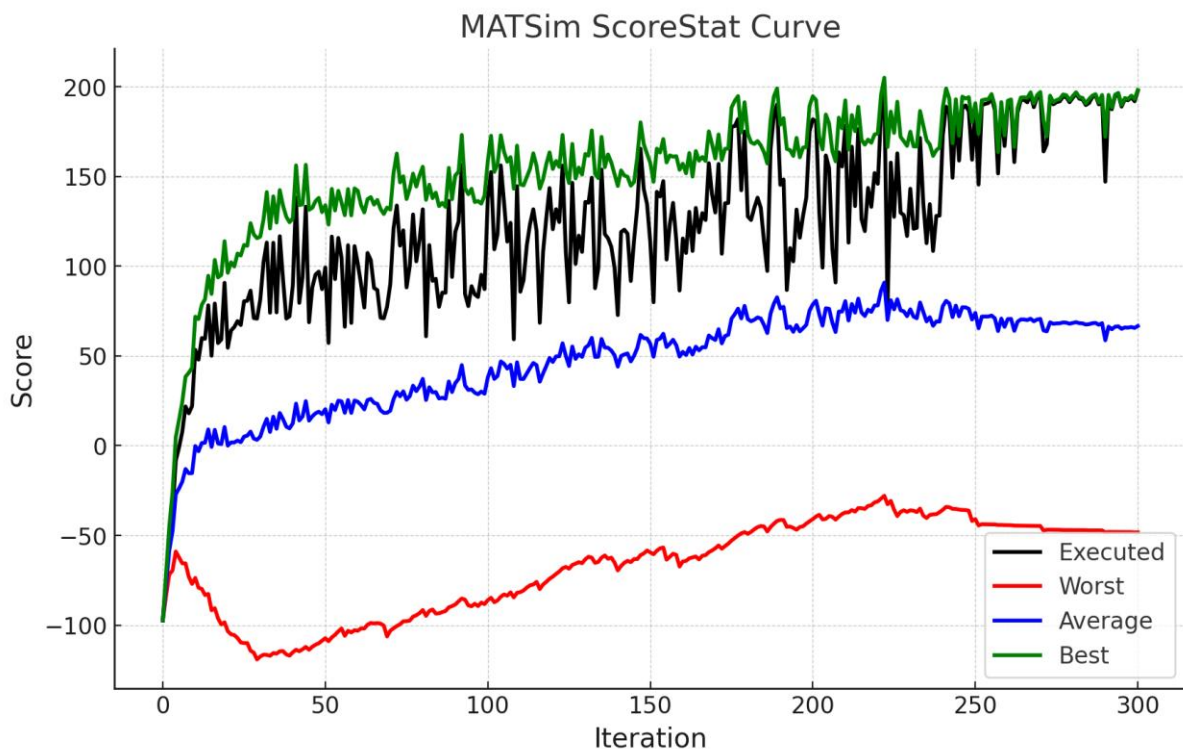


Figure 63 Convergence du pointage au fil des itérations - Scénario EMME 2021

Les résultats indiquent que la simulation poursuivait encore son amélioration à la fin des 300 itérations, suggérant qu'un meilleur équilibre pourrait être atteint avec des itérations supplémentaires dans les futures exécutions du modèle. Il est à noter que les pointages exécuté et maximal sont considérablement plus bas dans le réseau EMME par rapport au réseau OSM, mettant en évidence une congestion plus marquée dans le scénario EMME 2021. Les simulations ont été effectuées sur un processeur Ryzen 5600 (6 cœurs, 12 threads) avec 64 Go de mémoire, tandis que les scénarios OSM ont été exécutés sur un système plus puissant doté d'un processeur 24 cœurs 7900X et de 128 Go de mémoire.

Malgré cette différence matérielle, les temps de calcul restent comparables, comme le montre la Figure 64, indiquant que le scénario EMME est moins exigeant en termes de ressources informatiques que le scénario OSM.

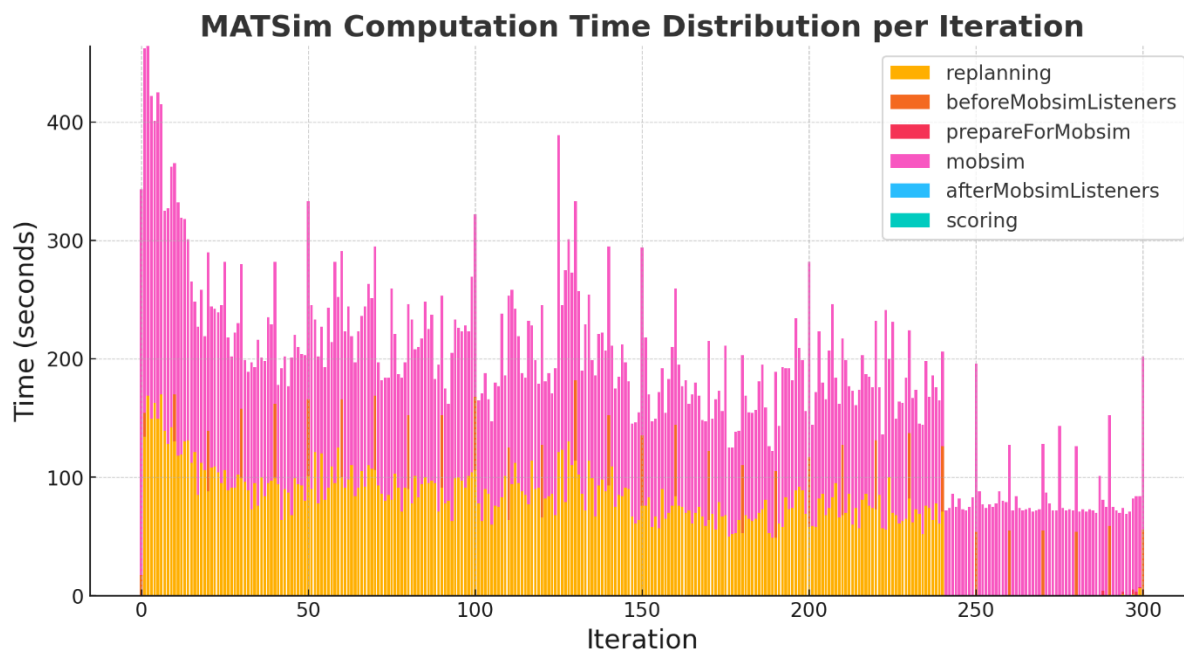


Figure 64 Distribution du temps de calcul pour le scénario EMME 2021

La Figure 65 présente l'évolution du partage modal au cours des itérations de simulation. Comparé au scénario OSM, le scénario EMME affiche un glissement beaucoup plus marqué vers les modes actifs tels que le vélo et la marche. Ces modes étant téléportés (pas simulé physiquement) dans le modèle, ils constituent une alternative efficace pour contourner la congestion, ce qui les rend plus attractifs dans le réseau EMME.

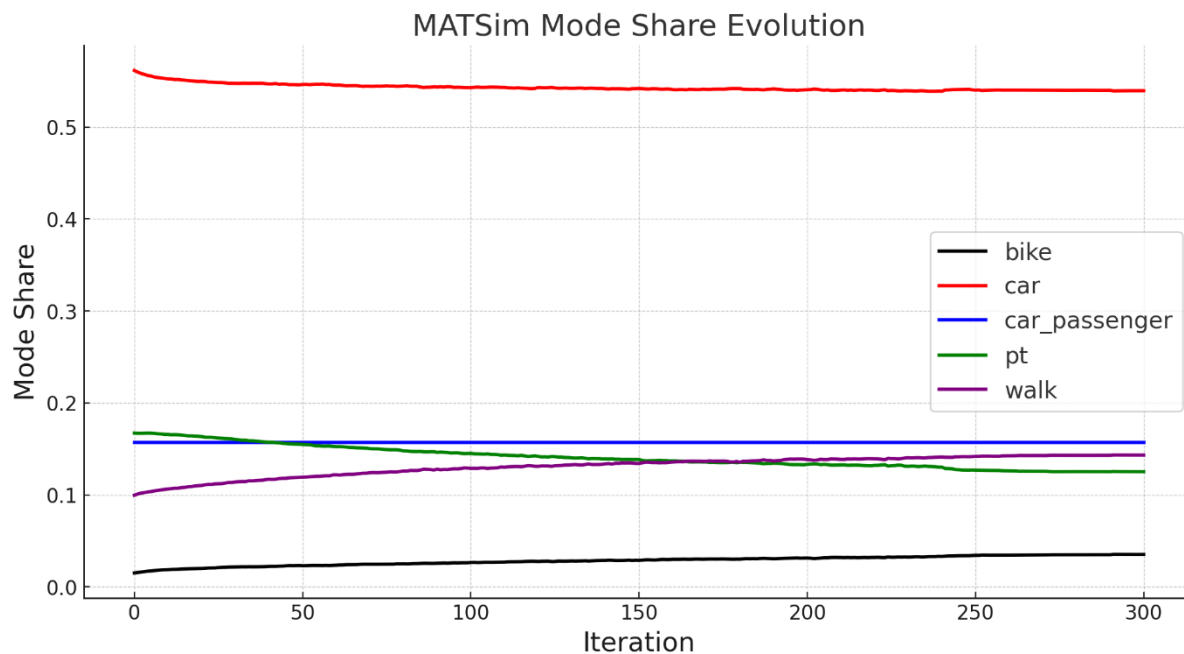


Figure 65 Répartition modale dans l'EMME Scénario 2021

Les Figure 66 et Figure 67 présentent les comptages des voyageurs à l'arrivée, au départ et en cours de trajet pour les modes voiture et transport en commun, respectivement.

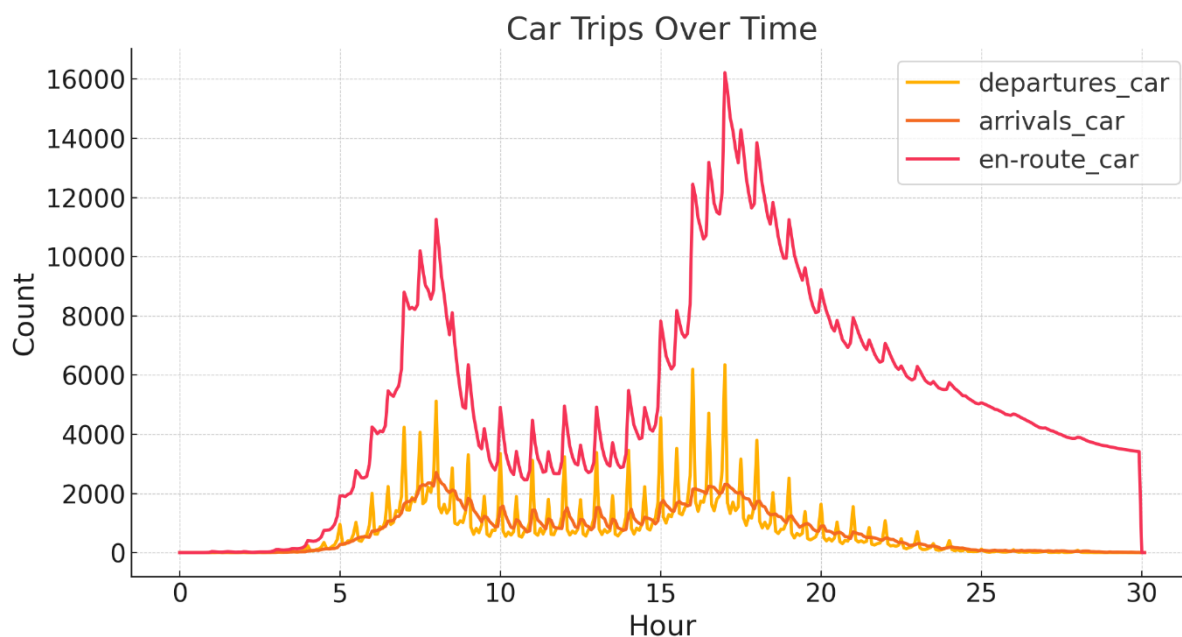


Figure 66 Histogramme des trajets en voiture (scénario EMME 2021, itération 300)

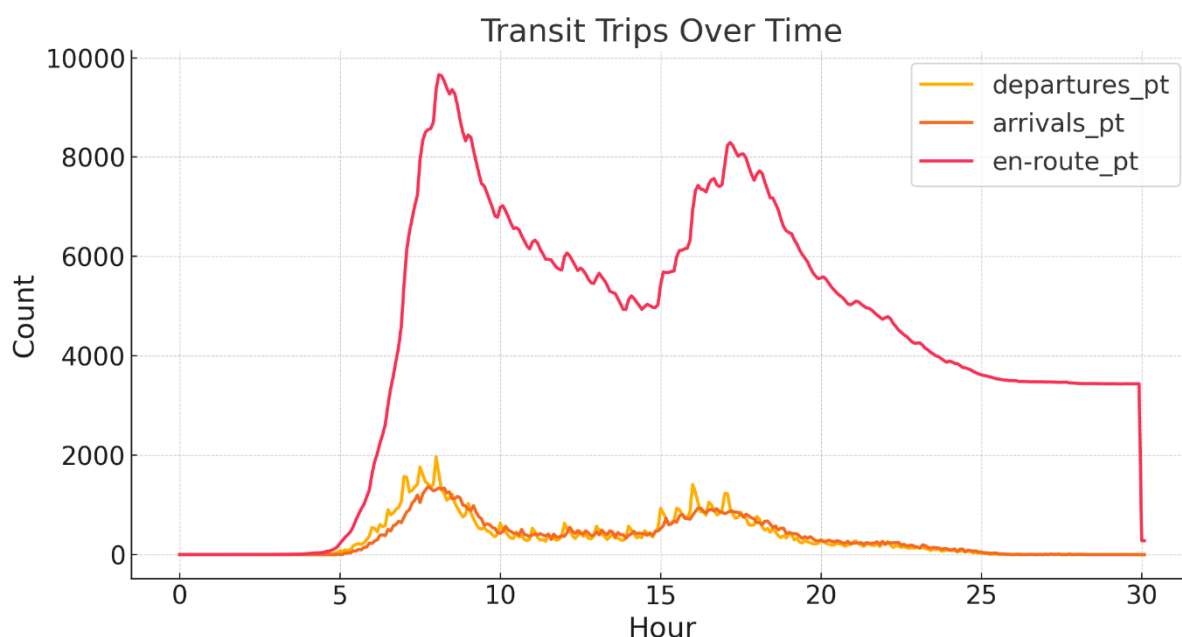


Figure 67 Histogramme des trajets en transport en commun (scénario EMME 2021, itération 300)

Les deux graphiques révèlent une situation de congestion totale, où un grand nombre de voyageurs restent bloqués sur la route à la fin de la simulation. Cette condition compromet la validité de toute analyse supplémentaire. Pour cette raison, aucun résultat additionnel n'est présenté pour ce scénario.

La Figure 68 illustre les principales zones de congestion issues de la dernière itération du scénario EMME 2021.

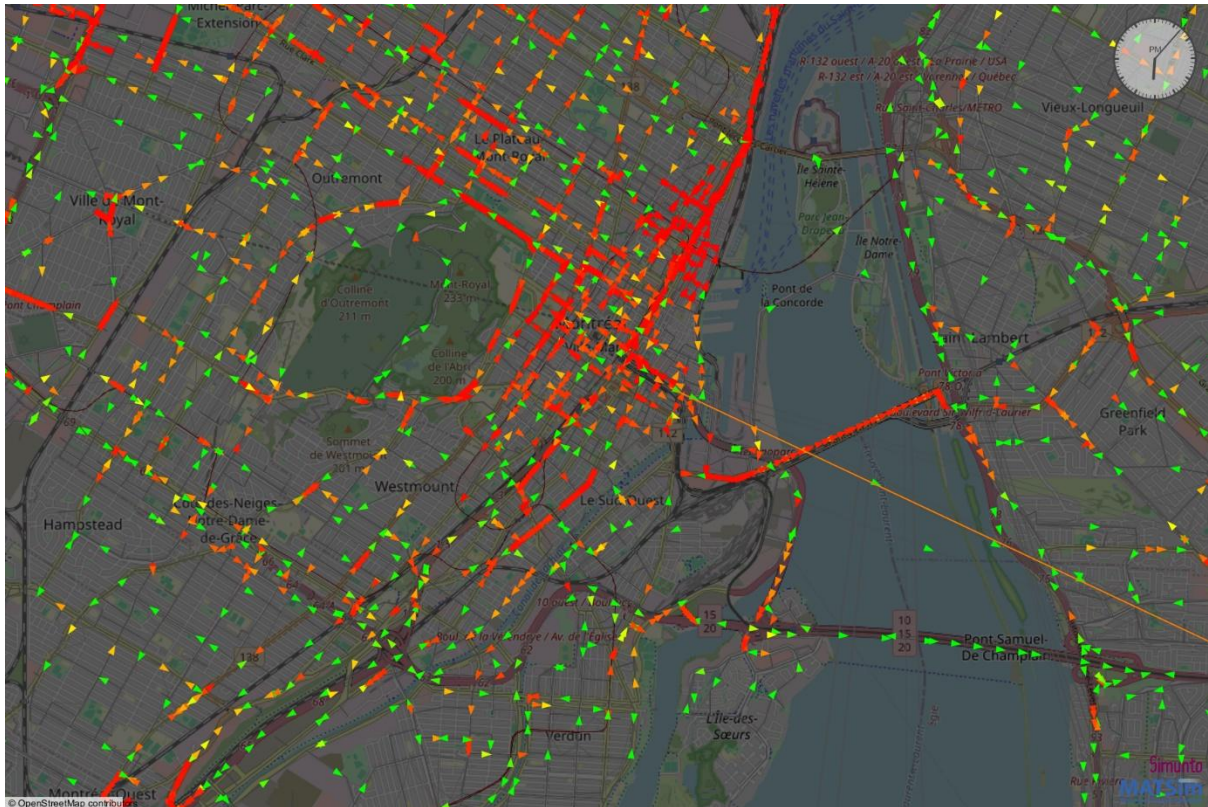
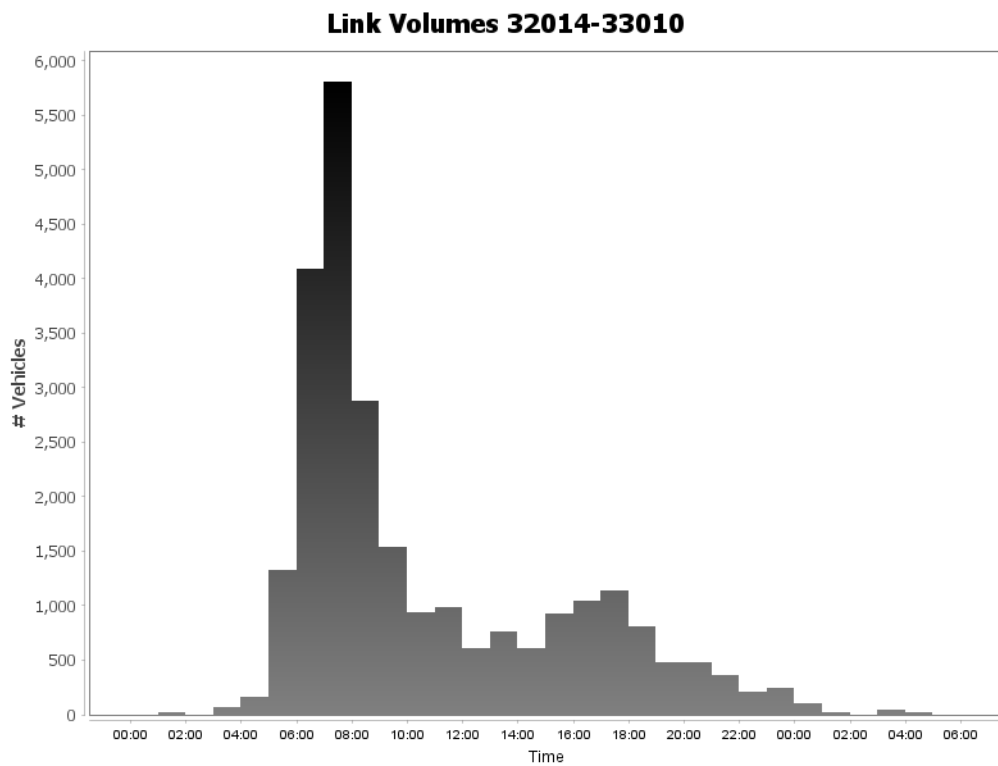


Figure 68 Congestion aux heures de pointe du soir près du centre-ville - restriction des virages Scénario EMME 2021



Link Volumes 33004-32005

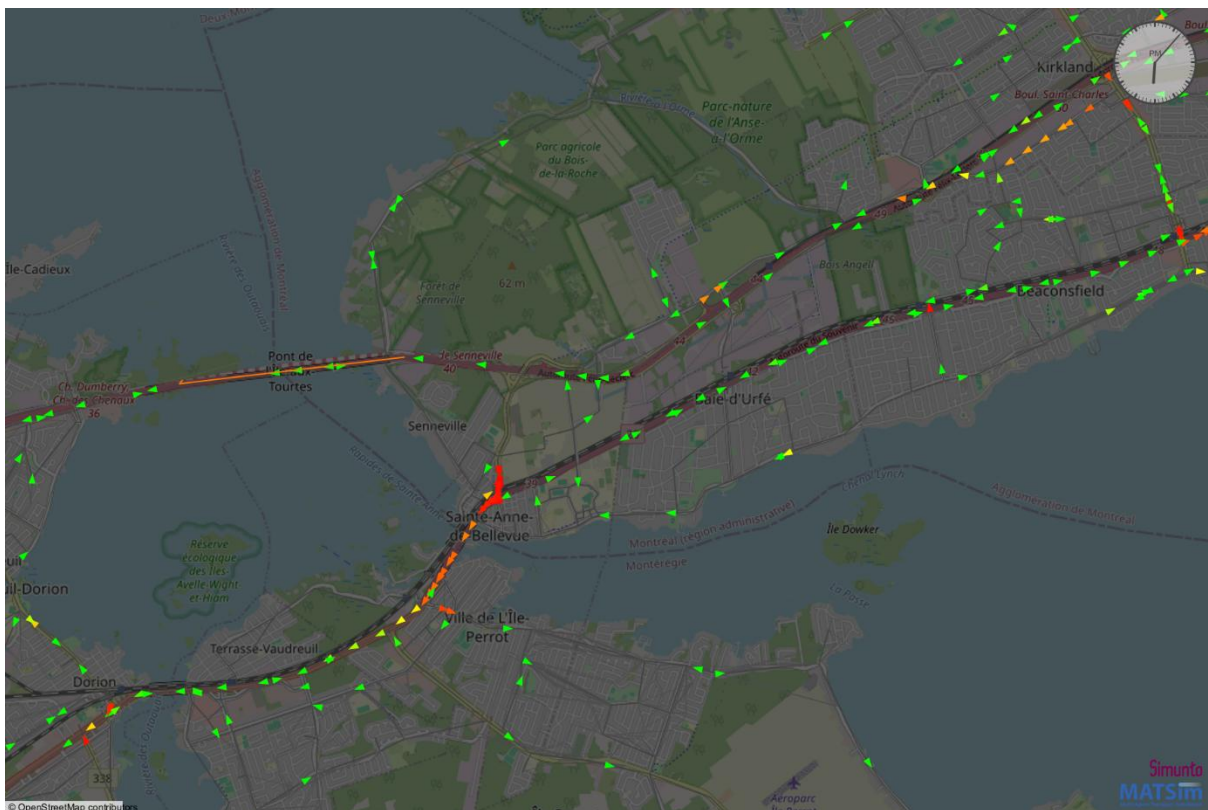
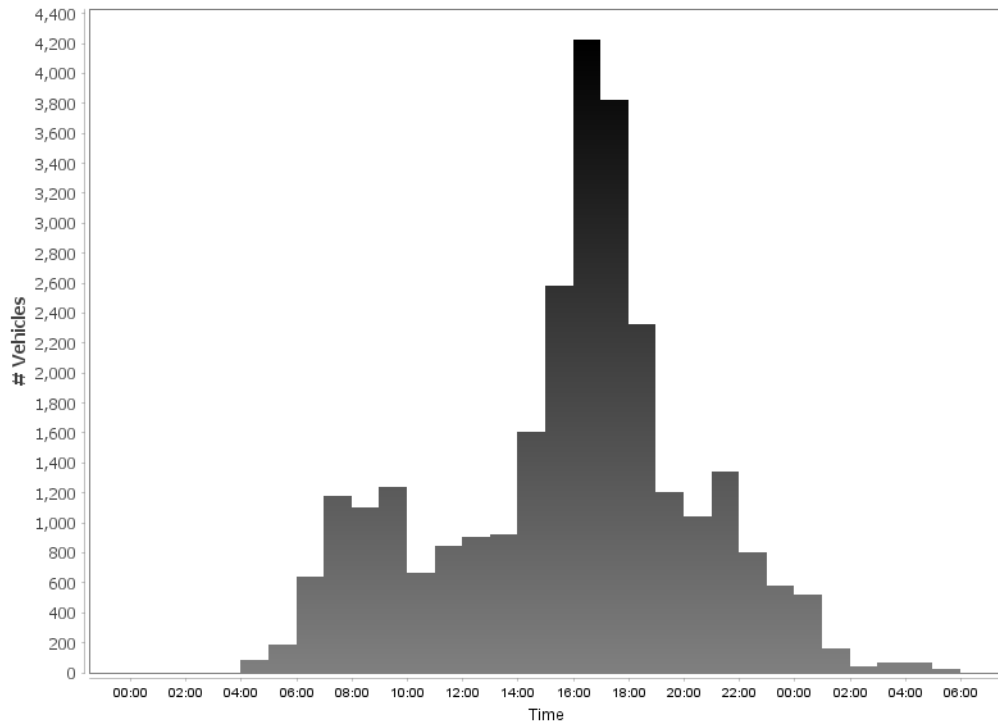


Figure 69 Volumes de trafic et congestion sur le Pont de l'Île-aux-Tourtes

13 SYNTHÈSE DES ÉTAPES DU PROJET

Les principaux objectifs du projet de recherche étaient :

- Soutenir les nouveaux besoins de modélisation du MTMD et permettre l'évaluation systématique des solutions innovantes grâce à l'approche de modélisation basée multi-agents (notamment la mobilité partagée, les nouveaux modèles d'affaires tels que Uber et Lyft, le télétravail, les services intégrés de mobilité);
- Expérimenter cette méthodologie pour la rendre complètement prête pour son utilisation pratique dans un contexte québécois.

Dans ce cadre général, les objectifs spécifiques du projet de recherche étaient :

- Appliquer le modèle MATSim pour une région métropolitaine du Québec;
- Calibrer et valider le modèle sur la base de données observées (comme les comptages de circulation);
- Réaliser une étude de cas « tendancielle » visant à déterminer les écarts entre la nouvelle approche et celle courante (en termes de résultats) ;
- Réaliser des études de cas « contrastées » liées à la mobilité innovante, visant notamment l'appropriation de la méthode de simulation par la DMST, l'évaluation de l'ampleur des efforts impliqués dans le développement et l'entretien d'un tel modèle;
- Identifier les limites et les avantages d'un tel modèle appliqué à une région métropolitaine du Québec, afin d'évaluer l'adéquation entre les résultats fournis par le modèle et les nouveaux besoins de modélisation du MTQ.

Certains objectifs, en accord avec le MTMD, ont été modifiés pendant la réalisation. Spécifiquement, les études de cas contrastées n'ont pas été réalisées, tandis que la génération d'une population synthétique exclusivement basée sur l'EOD a été réalisée.

Le projet a été structuré en trois phases principales :

1. **Phase I** : Développement d'un modèle de base MATSim, incluant les réseaux de transport et une population synthétique, suivi d'une calibration et d'une validation initiales.
2. **Phase II** : Amélioration de la logique de modélisation, des réseaux de transport et des techniques de calibration pour affiner la précision des simulations.
3. **Phase III** : Génération de scénarios de réseaux 2021 et 2041 basés sur les données OpenStreetMap (OSM) et EMME, intégration des améliorations des réseaux de transport en commun et routier et exécution des simulations.

14 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le projet a développé plusieurs scénarios dans un modèle de micro-simulation du trafic basé sur des agents et les activités pour la grande région de Montréal. Le projet a été mené à bien en trois phases.

La phase I a permis de rassembler les jeux de données nécessaires et la préparation de la chaîne de traitement Eqasim pour la génération de population synthétique. Cette étape a inclus la génération d'une population synthétique et des ménages. Dans cette étape, les données EOD (individuelles) et les données du recensement (marginales) ont été utilisées pour créer des ménages synthétiques et des agents synthétiques avec les caractéristiques socio-économiques appartenant à ces ménages. Ensuite, des chaînes d'activités ont été

attribuées de manière probabiliste aux agents synthétiques à partir des données EOD, en fonction de leur emplacement et de leurs caractéristiques socio-économiques. En même temps, des données d'information sur les bâtiments (évaluation des rôles) et des données de recensement ont été utilisées pour créer des installations synthétiques pour différentes activités dans différentes zones. Enfin, en fonction des zones et des types d'activités, chaque activité s'est vue attribuer une localisation synthétique, générant un ensemble complet de patrons d'activités synthétiques, de ménages et de localisations pour la simulation MATSim.

La chaîne de traitement pt2MATSim a ensuite été mise en place pour générer le réseau multimodal pour la ville de Montréal. Deux sources de données ont été utilisées : la base de données OSM et les données GTFS pour le système de transport en commun de la Société de transport de Montréal (STM), la Société de transport de Laval (STL), le Réseau de transport de Longueuil (RTL), Exo et VIA Rail. Une validation préliminaire sur la population synthétique a été effectuée et rapportée, et un modèle de simulation fonctionnel a été généré. Enfin, une calibration manuelle a été effectuée sur le modèle développé en faisant correspondre la répartition modale des trajets, générant ainsi un scénario calibré et fonctionnel à la fin de la phase I du projet.

Dans la phase II du projet, la logique de modélisation a été améliorée en introduisant une logique de replanification temporelle, l'évaluation des activités et une mise à l'échelle appropriée des infrastructures routières et de transport en commun. La chaîne de traitement pt2MATSim a ensuite été calibrée manuellement pour réduire le nombre de liens artificiels générés lors de l'intégration du système de transport en commun sur le réseau physique. Le système de transport en commun a également été ajusté en améliorant la ressemblance aux capacités réelles et en assurant une meilleure cohérence de la simulation par rapport à l'horaire officiel (issu des données GTFS). La réalisation la plus importante de la phase II a été la calibration automatisée du modèle à l'aide d'un algorithme d'optimisation de la région de confiance basé sur un métamodèle hybride. Ce processus a intégré les données ouvertes sur les virages de plusieurs intersections, et ce, sur une base horaire. Ces données ont été transposées sur les liens correspondants à l'intérieur de la simulation. Enfin, un modèle de trafic statique simplifié a été généré et associé à un homologue polynomial pour créer un métamodèle hybride.

Ce métamodèle hybride a ensuite été ajusté dans un cadre d'optimisation de la région de confiance pour obtenir une calibration automatisée du scénario MATSim développé. Dans ce processus, les paramètres comportementaux de MATSim ont été calibrés pour réduire l'écart entre les volumes simulés sur les liens et les comptages observés. L'optimisation avancée par métamodèle a réduit l'erreur de 17,83 % lors de la calibration, améliorant significativement la précision du modèle. Ce processus a généré un ensemble de paramètres comportementaux qui ont été utilisés tout au long des phases II et III, c'est-à-dire pour le reste du projet.

En plus de la calibration, la population synthétique basée sur l'EOD a été proposée dans la phase II. Ce processus de génération de population synthétique utilise les facteurs de pondération fournis dans les données d'EOD en les extrapolant à l'échelle souhaitée, de manière complètement énumérée. Cela a permis de dissocier la génération de la demande et la phase de génération de la population synthétique de la chaîne de traitement Eqasim, permettant au modélisateur de choisir la logique pour générer les facteurs de pondération dans l'ensemble de données d'EOD. De plus, ce processus de génération d'une population synthétique est rapide et, comme il n'a pas eu comme objectif d'intégrer deux ensembles de données distincts (recensement et EOD 2018), la population synthétique générée fait correspondre étroitement l'origine et la destination des déplacements synthétiques aux données EOD. Une validation de base pour la population synthétique basée sur l'EOD a été fournie dans la phase II du projet.

Enfin, dans la phase III du projet, le réseau EMME, qui incluait des informations sur les restrictions de virage, a été modifié et analysé. Un code automatisé a été développé pour générer un réseau MATSim à partir du fichier de format EMME (« shapefile ») et des données de restrictions de virage. C'est également la première fois que des restrictions de virage via des voies spécifiques ont été introduites dans MATSim. Le concept de voies existait déjà dans MATSim, mais elles n'étaient pas activées par défaut. Une analyse a démontré toutefois que la chaîne de traitement pt2MATSim de génération de réseaux multimodaux à partir de données OSM et GTFS ne prenait pas en compte les restrictions de virage. Ainsi, une variante du logiciel pt2MATSim a été développée pour prendre en compte les restrictions de virage lors de l'intégration du système de transport en commun sur le réseau physique. La mise en œuvre dans MATSim de l'affectation en tenant compte du nombre de voies dans les différentes sections du réseau routier a nécessité des modifications majeures dans la modélisation, la simulation et la logique d'affectation du modèle de trafic développé. Cependant, après la génération du réseau EMME, il a été possible de constater que le réseau présentait une granularité trop grossière pour les besoins du modèle. Il a nécessité plus de liens locaux dans les régions résidentielles pour y faire passer les véhicules de transport en commun. Sans ces derniers, le logiciel pt2MATSim crée des milliers de liens artificiels, diminuant considérablement la qualité globale du réseau. De plus, MATSim a libéré des véhicules sur le lien pour effectuer un trajet. En raison de la capacité et de la vitesse à écoulement libre faibles du réseau EMME, combinées à ses liens résidentiels moins nombreux, le réseau routier se sature très rapidement en raison de la décharge soudaine de véhicules pendant les heures de pointe, créant un système de circulation très congestionné.

Pour résoudre ce problème, le module osmToMATSim a été modifié à l'intérieur de la chaîne de traitement pt2MATSim pour obtenir des données de restrictions de virage lors de la génération du réseau multimodal MATSim à partir de OSM. La génération de codes a permis de convertir automatiquement les données de restrictions de virage en un fichier de définition de voies, créant ainsi un réseau OSM avec restriction de virage. Dans ce processus, la calibration pt2MATSim a permis de réduire à 1 087 le nombre de liens artificiels. Les modifications au réseau et au transport en commun planifiées pour l'année 2041 ont ensuite été implantées manuellement dans le réseau OSM et dans l'horaire de transport en commun pour générer le réseau multimodal 2041 avec restriction de virages.

Parallèlement, des informations additionnelles ont permis d'affiner la logique de création de population synthétique EOD pour la faire correspondre plus fidèlement à la réalité. De plus, le MTMD a fourni les demandes prévues sous forme de facteurs de pondération pour les années 2021 et 2041. Ces facteurs de pondération prévisionnels et la chaîne de traitement automatisée de génération de population synthétique EOD créée lors de la phase II ont été utilisés pour créer la population synthétique EOD pour les années 2021 et 2041. Enfin, les scénarios OSM avec restriction de virage de 2021 et 2041 ont été exécutés et les résultats ont été présentés. Cela a conclu la phase III du projet et a marqué, entre autres, l'achèvement de la cible 2 du projet.

En conclusion, MATSim est un modèle de grande envergure avec de nombreuses fonctionnalités. Dans les trois phases du projet, ce modèle a été configuré au meilleur des capacités de l'équipe, des informations et des données disponibles. Le modèle développé crée une base solide pour des études d'optimisation des politiques et de prise de décision que la plupart des autres modèles de trafic sont incapables de sonder. Par rapport à sa formulation initiale, le projet, en accord avec le MTMD, a pris un chemin différent concernant deux aspects. D'un côté, la population générée dans le projet précédent, le R661.2, n'a pas été utilisée. À la place, une nouvelle méthodologie basée directement sur l'EOD, décrite ci-dessus, et plus en détail dans les chapitres du rapport, a été développée. Cette méthodologie est un livrable important du projet, car ce processus de génération de population est plus rapide que l'autre (Eqasim), et offre une bonne flexibilité au modélisateur. Il faut noter cependant que la chaîne de traitement Eqasim, bien que moins flexible, crée généralement une population synthétique

plus cohérente, c'est-à-dire sans personnes qui auraient un seul trajet, sans personnes non attribués à un ménage et sans déplacements non attribués à une personne.

L'autre différence avec le plan initial est qu'aucun scénario correspondant à des nouveaux modes ou services de transport n'a été simulé. À la place, un scénario tendanciel 2041 qui inclut les projets prévus d'extension du réseau routier et de transport en commun a été généré et simulé. Comme des objectifs spécifiques d'analyses de scénarios n'avaient pas été donnés, les analyses présentes sont plutôt à titre d'exemple et restent relativement génériques. Dans le scénario 2041, on a néanmoins pu observer que les individus ont une tendance accrue à l'intermodalité, probablement grâce à une meilleure accessibilité des transports en commun. Cependant, il semblerait que les développements du transport en commun, ne sont pas suffisant pour compenser la population accrue par rapport à l'état actuel, et donc des zones de congestion persistent, et des interventions ciblées sur les infrastructures, au-delà de celles prévues, seraient éventuellement à envisager. Cette hypothèse est d'ailleurs corroborée aussi par la part modale plus grande de la mobilité douce.

Recommandations

Sur la base des résultats du projet, si le MTMD souhaitait poursuivre ses travaux avec MATSim, une suite du projet devrait idéalement s'intéresser aux points suivants :

- Poursuivre le travail avec le réseau OSM avec restrictions de virages en raison de sa supériorité sur le réseau EMME en termes de granularité et de géométrie. Il est recommandé que tout projet routier futur soit intégré au réseau OSM avec restrictions de virage ainsi que sur le réseau EMME.
- Apporter des corrections majeures de capacité et de vitesse pour le réseau EMME afin de le rendre utilisable dans la modélisation dynamique du trafic.
- Calibrer le scénario de base OSM avec restrictions de virage.
- Tout travail futur devrait se concentrer sur l'affinement du modèle comportemental avant de l'utiliser pour des prévisions futures dans des études de transport. Ceci implique le développement ultérieur des techniques de calibration pour s'adapter dynamiquement aux variations réelles des transports.
- Améliorer la représentation du système de transport en commun en modifiant les capacités des véhicules à partir de données réelles et en favorisant un comportement de transfert de lignes réaliste, en incorporant des temps de transfert réalistes et des pénalités pour les transferts, aussi calculées à partir de données réelles.
- Réduire le temps de calcul des simulations. À cet effet, il est possible d'envisager la réduction du taux d'innovation des plans d'activités et d'augmenter le nombre d'itérations au même temps. Avec un nombre adéquat d'expériences de ce genre, il devrait être possible d'atteindre de solutions d'équilibre au moins équivalentes à celle obtenue pour les différents scénarios, avec un temps de calcul réduit.
- Concentrer les études futures sur des problèmes spécifiques, tels que des changements majeurs dans le système de transport en commun ou de véhicules, etc. Parmi les thématiques suggérées, il y a la poursuite du raffinement de l'intégration multimodale de MATSim, en particulier pour les modes de transport actifs et l'extension de l'applicabilité du modèle pour évaluer les solutions de mobilité émergentes. MATSim est déjà en mesure de simuler plusieurs solutions innovantes que d'autres modèles ne peuvent pas simuler, y compris les véhicules autonomes et le transport à la demande dynamique. D'ailleurs, il serait aussi important de mieux représenter des aspects de la

mobilité urbaine qui ne sont pas couramment très détaillés dans la simulation, comme le stationnement.

15 RÉFÉRENCES

Charypar, D. & Nagel, K. (2005), 'Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms', *Transportation* **32**(4), 369–397.

Conn, A. R., Scheinberg, K. & Vicente, L. N. (2009), *Introduction to derivative-free optimization*, SIAM.

Open Government Portal (2022), 'Counts of vehicles, cyclists and pedestrians at intersections equipped with traffic lights - counts of vehicles, cyclists and pedestrians (2020-2022)'. 2022-11-08.

URL: <https://open.canada.ca/data/en/dataset/584de76b-13b9-47ea-af12-0c37b8eb5de5>

Patwary, A. U. Z., Huang, W. & Lo, H. K. (2021), 'Metamodel-based calibration of large-scale multimodal microscopic traffic simulation', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **124**, 102859.

Poletti, F. (2016), 'Public transit mapping on multi-modal networks in matsim', *Master, IVT, ETH Zurich*.

URL: <https://github.com/matsim-org/pt2matsim>