

**Projet Mitacs Accélération
Rapport final**

Estimation des flux de colis sur un réseau Tram-cargo

Période :

Avril-août 2025

Superviseur :

Dr Ursula Eicker

Stagiaire :

Kian Nejadshamsi

Organisation partenaire :

GRAME

1. Introduction

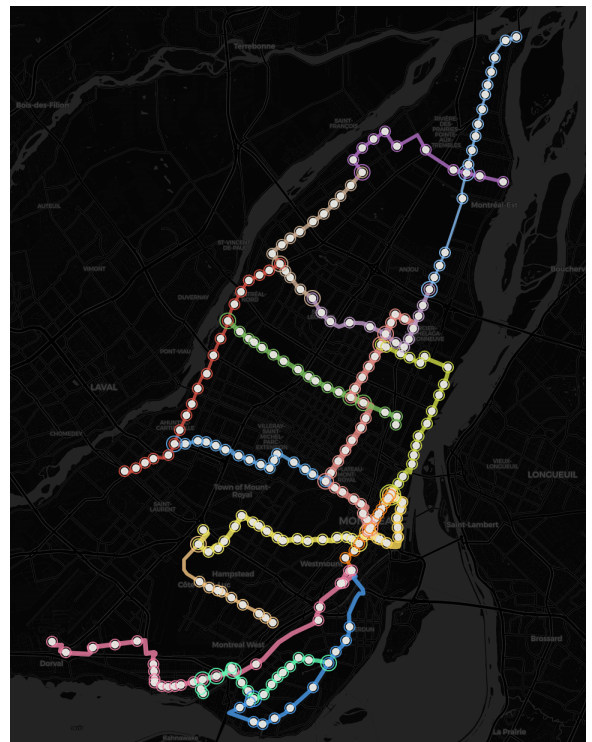
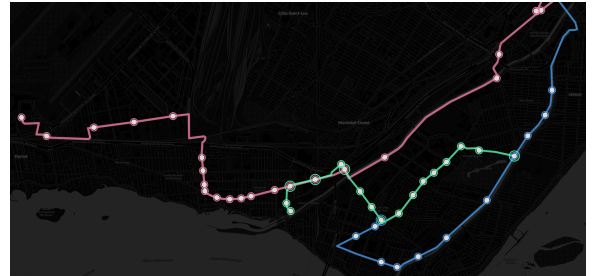
L'infrastructure de transport urbain de Montréal est confrontée à une demande croissante de livraison de colis et à des limites physiques. Il est donc nécessaire d'évaluer si le réseau de tramway proposé, conçu principalement pour les passagers, peut gérer la logistique des colis tout en maintenant une grande fiabilité du service. Cette étude évalue la capacité du réseau de tramway à acheminer les colis lors d'une journée de travail typique simulée à l'aide du cadre MATSim basé sur des agents . Elle modélise une journée représentative selon deux configurations : le Réseau du Grand Sud-Ouest et le Réseau prioritaire de la Ville de Montréal, incluant des scénarios de tramway partagé pour le transport simultané de passagers et de colis.

Les résultats comprennent des tableaux de capacité résiduelle de tramway en équivalents cargo-vélo standardisés, par station, période et direction par scénario partagé ou dédié.

2. Scénarios

Le réseau de tramway de Montréal est représenté selon deux configurations. Le Réseau du Grand Sud-Ouest (Phase 1) comprend cinq lignes et 69 arrêts uniques (10 trajets aller/retour), tandis que le Réseau prioritaire de la Ville de Montréal (Phase 2) comprend 11 lignes et 169 arrêts uniques (22 trajets aller/retour). Tous les tramways circulent en mode bidirectionnel de 6 h à 23 h 59 selon un rythme constant : intervalles de 6 minutes en période de pointe (environ 10 départs/heure) et de 10 minutes en période creuse (environ 6 départs/heure), totalisant 132 départs par direction et par trajet au cours de la journée. Les lignes s'étendent sur environ 10 à 25 arrêts, les corridors de la Phase 1 atteignant jusqu'à 24 arrêts et ceux de la Phase 2 jusqu'à 25, assurant une couverture fréquente et complète des quartiers centraux et en expansion.

Le scénario 1 utilise des tramways partagés passagers-colis en phase 1 : passagers et colis voyagent à bord du même véhicule sur tous les réseaux, conformément à l'horaire existant. Le scénario 2 introduit des tramways dédiés au fret en phase 1 : des véhicules exclusivement réservés au fret sont intercalés entre les lignes régulières. Le scénario 3 déploie des tramways dédiés au fret de la même manière que le scénario 2, mais sur le réseau de la phase 2.



3. Méthodologie

La simulation est utilisée pour capturer les interactions horodatées entre la demande, les itinéraires et la capacité effective. Les méthodes statiques ne peuvent représenter les files d'attente aux arrêts, les arrivées stochastiques ni le retour d'information des interactions de service. MATSim fournit le cadre dynamique, basé sur des agents et fonctionnant toute la journée, nécessaire pour que la capacité et la fiabilité émergent du comportement plutôt que d'hypothèses. L'un des principaux inconvénients de MATSim réside dans ses entrées XML très volumineuses, lentes et fragiles pour les modifications directes. Cette limitation justifie un pipeline qui déplace tous les CRUD lourds et la validation dans des tables rationnelles, puis régénère des entrées propres et déterministes pour la simulation.

Les entrées sont d'abord consolidées dans une base de données afin de permettre des diagnostics et des corrections rapides et précis. Le réseau, les transports en commun, les véhicules et les plans de population sont importés dans des tables rationnelles qui reflètent leur structure logique. PostgreSQL a été sélectionné pour sa fiabilité, son indexation et ses outils éprouvés tels que PostGIS . Il ajoute des types de géométrie, des indices spatiaux et des vérifications de proximité et de topologie, essentiels à la cohérence des liens et des arrêts et à l'analyse de la couverture. Ce système détecte les erreurs de manière précoce et précise : références de liens invalides ou manquantes aux arrêts, nœuds orphelins et liens inactifs, incompatibilités mode-lien le long des profils d'itinéraire, séquences d'arrêts non monotones, horaires indéfinis ou incohérents, et intégrité référentielle rompue entre les lignes, les itinéraires, les départs et les véhicules. S'ensuivent une validation et une correction automatisées, directement en SQL et via des vérifications scriptées, afin que la connectivité, les horaires et la cohérence des plans soient respectés avant toute simulation.

Les usines de contrôle qualité reconstruisent ensuite les entrées MATSim canoniques à partir des tables validées. Leur rôle est de vérifier les invariants et de lever les problèmes grâce à des diagnostics explicites avant la simulation. La géométrie des itinéraires est intégrée par le calcul des trajets réalisables d'arrêt à arrêt sur les liaisons autorisées, afin que les mouvements des véhicules et les temps d'arrêt soient clairs. La construction des phases suit une logique claire : produire le planning complet de la phase 2 comme base de référence, avec les installations d'arrêt, des identifiants et des structures d'itinéraire cohérents ; puis dériver de manière déterministe la phase 1 en filtrant sur les lignes et installations du Grand Sud-Ouest, tout en préservant la cohérence. Une fois les plannings fixés, le fichier de population est nettoyé afin de corriger les attributs manquants et les heures indéfinies, et d'aligner les références des installations sur la phase sélectionnée, ce qui élimine une source fréquente d'erreurs d'exécution et préserve la comparabilité entre les scénarios.

L'exécution est configurée pour garantir la crédibilité, la traçabilité et la résilience. La simulation s'étend sur une journée de 24 heures, ce qui permet de signaler les erreurs de planification incomplètes et de les diagnostiquer et de les corriger, plutôt que de les tronquer silencieusement. La planification et la planification des transports en commun sont optimisées pour refléter les habitudes des voyageurs. S'adapter réellement , tandis que les capacités et les définitions des véhicules sont définies au plus près des spécifications réelles et ajustées seulement marginalement pour résoudre les problèmes spécifiques de stabilité ou de fidélité découverts lors de la validation. L'instrumentation enregistre les entrées et sorties des personnes, les départs des installations et l'occupation par véhicule au fil du temps, produisant ainsi un historique des événements vérifiable reliant les tendances de la demande aux performances de service au niveau des départs individuels. Cette conception garantit que toute anomalie peut être reliée à des entrées et une logique spécifiques plutôt que de rester un artefact de boîte noire.

Les résultats sont synthétisés via une étape de post-traitement unique et unifiée afin de préserver la comparabilité entre les phases et entre les conceptions de services partagés et dédiés. Les taux d'occupation observés aux départs sont convertis en capacité résiduelle de colis en équivalents conteneurs standardisés et agrégés par arrêt, ligne, direction et période . Il en résulte un ensemble harmonisé de tables de capacité et de départs qui harmonisent la méthode, les métriques et la résolution temporelle entre les scénarios. Le pipeline global progresse ainsi sans accroc, de l'ingestion des données et du contrôle qualité au niveau de la base de données à la planification intégrée aux itinéraires, en passant par une phase rigoureuse de simulation et de mesure, aboutissant à des synthèses de capacité cohérentes et prêtes à être prises.

4. Prétraitement des entrées

La préparation des données visait à rendre les entrées cohérentes, compactes et prêtes pour la simulation, tout en garantissant la possibilité de vérification des modifications. Les alignements et les arrêts du tramway provenaient d'une carte de planification fournie par JF. Après l'exportation et la conversion au format GeoJSON , un éditeur léger a été créé pour consolider les chaînes de lignes fragmentées, diviser ou rejoindre des segments si nécessaire, affiner les sommets pour une géométrie plus fluide et réduire le bruit des données, et aligner les arrêts en supprimant les arrêts orphelins et en ajoutant des arrêts manquants pour obtenir des alignements. Le résultat est très proche de la proposition : 16 lignes réparties sur deux phases, généralement de 10 à 20 arrêts par ligne, 237 arrêts au total, dont 22 partagés entre les lignes, 3 connexions interlignes conçues et un nombre de sommets réduit à 606 (au lieu de plus de 2 000).

Les données de métro et d'autobus ont été préparées à partir du flux GTFS de la STM (2025-03-02 à 2025-08-24) et converties avec pt2matsim, contournant délibérément le mappeur générique, les connecteurs artificiels, les arrêts et la génération de véhicules afin de conserver le

contrôle de la logique spatiale. Des validateurs ciblés ont corrigé le problème courant d'attribution erronée des références de liaisons d'arrêt aux liaisons réseau et ont veillé à ce que les profils d'itinéraire respectent les modes autorisés et la connectivité réelle. La population et le réseau, fournis par un collaborateur de Polytechnique Montréal, ont été alignés sur la zone d'étude en supprimant les plans comportant des activités à l'extérieur de l'île de Montréal et en affinant le réseau lorsque cela était justifié, notamment en supprimant les liaisons artificielles inutiles, en ajoutant des liaisons manquantes et en corrigeant les autorisations de mode.

Au total, plus de 35 scripts Python ciblés ont pris en charge les efforts de nettoyage et de validation, gardant les modifications traçables, transparentes et reproductibles.

5. Application des hypothèses

La population synthétique de l'étude a été configurée conformément à la stratégie de développement urbain du PUM 2050, à partir d'un fichier de population provenant d'un collaborateur de Polytechnique Montréal, puis réduit pour n'inclure que les plans d'agents ayant des activités sur l'île de Montréal. La demande globale d'agents a été ramenée à 77 % des niveaux pré-pandémiques, un facteur dérivé des données de la STM sur la reprise de l'achalandage en 2023. La répartition géospatiale des ménages et des emplois a été établie à partir des cartes officielles d'affectation du sol et d'objectifs quantitatifs de densité nette minimale, la densification étant concentrée sur des zones spécifiques à forte croissance, comme les secteurs de développement axé sur le transport en commun (TOD) (p. ex., le PPU Bois-Franc) et les réaménagements majeurs (p. ex., l'unité 800-1000). Écoquartier Louvain). Afin de garantir des motifs de déplacement réalistes, les chaînes d'activité des agents ont été ancrées à des installations géolocalisées avec précision, notamment le pôle du Cégep Saint-Laurent/Vanier (environ 13 000 étudiants), des pôles commerciaux et des institutions localisées à partir d'adresses civiques issues d'inventaires patrimoniaux. Enfin, les attributs socioéconomiques ont été intégrés à la population en appliquant l'Indice d'équité en milieu de vie (IEMV) aux zones résidentielles afin de permettre une analyse nuancée de l'équité en matière de transport.

Le réseau MATSim s'appuie sur les cartes officielles de la hiérarchie routière de PUM 2050, qui définissent les attributs des liens, tels que la capacité, la vitesse de circulation fluide et les autorisations modales pour les artères, les collectrices et les routes locales. Cette base de référence a été complétée par des infrastructures dédiées au transport actif, dont le Réseau express vélo (REV) quatre saisons, et a intégré des interventions spécifiques comme la piétonnisation de la rue Sainte-Catherine Ouest et le projet de pont pour le mode actif dans le

secteur de l'Entre-Trois-Eaux. Pour le transport de marchandises, le réseau met en œuvre la carte officielle des itinéraires pour camions de la Ville, avec des restrictions horaires, et intègre des règles de conception microéconomiques pour les itinéraires de livraison, comme la subdivision de super-îlots dans les zones commerciales en cours de réaménagement. Enfin, la topologie du réseau a été modifiée pour refléter des projets stratégiques, comme la refonte géométrique du nœud Lionel-Groulx–Atwater et la réaffectation de voies sur des artères comme le boul. Maurice-Duplessis — alors que les capacités des liaisons ont été pénalisées dans les zones sensibles, notamment par des vitesses réduites sur le mont Royal et un débit moindre sur les liaisons identifiées comme vulnérables aux inondations dans les cartes des eaux pluviales.

Le dossier de transport en commun a été conçu comme un système multimodal évolutif reflétant les plans d'expansion par phases du PUM 2050. Cela comprenait non seulement le futur réseau de tramway, mais aussi de nouveaux corridors de transport en commun rapide par bus (TRAB) sur des axes comme Pie-IX et Henri-Bourassa, l'expansion des navettes fluviales de l'ARTM et un échancier dynamique pour le développement du métro. Les principales hypothèses temporelles comprenaient l'activation du prolongement de la ligne bleue du métro en 2031, suivi du prolongement de la ligne orange ouest d'ici 2040. Les intervalles de service et les heures d'exploitation ont été calibrés pour atteindre des objectifs politiques précis, comme assurer un accès en transport en commun de 45 minutes aux zones industrielles pendant les quarts de travail atypiques, tandis que la topologie du réseau intégrait d'importantes rénovations planifiées des infrastructures aux nœuds intermodaux clés comme le pôle Lionel-Groulx.

La configuration MATSim a traduit les règles quantitatives et les objectifs politiques du PUM 2050 en paramètres comportementaux régissant la simulation multi-agents. Les fonctions de notation des agents et les modules de replanification ont été calibrés pour s'aligner sur les objectifs de partage des véhicules (23 % de marche, 15 % de vélo) tout en s'alignant sur les objectifs politiques généraux, notamment la Vision Zéro (zéro accident grave d'ici 2040) et la neutralité carbone. Pour modéliser la désutilité des déplacements, les pénalités de notation liées à la voiture ont été directement influencées par de nombreuses politiques.

6. Simulation

La configuration est produite par une usine dédiée qui charge le réseau fixe, la population, les véhicules de transport en commun et l'horaire intégré à l'itinéraire, active les transports publics et installe SwissRailRaptor pour un routage tenant compte des horaires et de la capacité. Le contrôleur exécute une journée complète de 24 heures à un pas de 0,5 seconde pendant dix itérations, en écrivant des plans et des événements à chaque itération afin de garantir la vérifiabilité des parcours. Des portes en amont valident l'horaire de transport en commun par rapport au réseau (fail fast avec diagnostics explicites d'itinéraire et de liaison) et assainissent les horaires des plans de population pour éliminer les temps indéfinis. La replanification combine ChangeExpBeta , ReRoute et SubtourModeChoice avec une stratégie personnalisée de trajets

longs vers les transports publics en début d'exécution afin de convertir les longs trajets téléportés en transports publics lorsque cela est possible. L'accès et la sortie sont téléportés avec des paramètres calibrés (marche 1,39 m/s, vélo 4,17 m/s, voiture-passager 8,33 m/s). Les transports publics embarqués suivent l'horaire avec les capacités des véhicules et la cartographie des sous-modes . Les paramètres QSim visent une dynamique stable et des diagnostics clairs : facteur de plafonnement du débit 0,7, facteur de plafonnement du stockage 0,8, temps de blocage 1800 s, intervalles d'écriture par itération définis sur 1 et écrasement activé pour la reproductibilité. La notation favorise légèrement les transports publics et le tramway (constante pt 2,2 ; tramway 3,1 ; métro 3,0), avec une pénalité de transfert et une désutilité d'attente plus légères (utilité du changement de ligne : 0,5 ; attente marginale : 0,3) pour refléter l'intention de la politique tout en préservant le réalisme.

Les simulations ont été exécutées sur Windows 11 Pro (64 bits) avec un processeur AMD Ryzen AI 9 HX 370 (12 cœurs, 24 threads), 64 Go de RAM LPDDR5X à 7 500 MT/s et Java 24.0.2 avec les paramètres JVM par défaut. Une journée complète d'exécution de dix itérations a été réalisée en moins de 120 minutes : la préparation du SSR a pris environ 60 minutes, l'itération 0 en environ 4 minutes lors du routage initial et de la création d'artefacts, l'itération 1 en environ 10 minutes lors d'une replanification plus importante, et les itérations suivantes se sont stabilisées et ont rempli le reste du temps. L'utilisation du processeur était en moyenne de 40 %. L'utilisation de la mémoire est restée bien dans la marge allouée de 50 Go et a oscillé autour de 20 Go. Cette configuration a prouvé l'importance de la vitesse de la RAM par rapport à la vitesse d'horloge du processeur.

6. Post-traitement

Le post-traitement convertit les événements ENTER et EXIT bruts en estimations de capacité des conteneurs de chargement. Tout d'abord, les événements de sortie MATSim sont analysés afin d'extraire les marqueurs de départ des conducteurs et de départ des véhicules. Pour chaque départ, l'algorithme identifie le départ le plus récent du conducteur pour ce véhicule et intègre les embarquements nets jusqu'à l'horodatage du départ, produisant ainsi un instantané d'occupation lié à une ligne, un itinéraire, un terminal et une heure spécifiques. Ces instantanés sont enregistrés au niveau de chaque départ, puis agrégés en tranches horaires par terminal, ligne et itinéraire, accompagnés du nombre de départs horaires pour les mêmes clés afin de suivre le nombre de départs. L'occupation est convertie en capacité de chargement standardisée pour permettre des comparaisons entre scénarios à l'aide d'une formule spécifique. Le processeur utilise une surface au sol explicite avec des paramètres publiés : surface intérieure utilisable de 66,0 m², surface assise fixe de 31,5 m², surface debout par personne de 0,4 m², 70 sièges et une surface d'occupation canonique de 1,62 m². Les taux d'occupation observés sont mis à l'échelle

pour représenter l'échantillon de population complet avec un facteur de 10. La surface libre est calculée selon deux cas limites (place assise en premier, où les passagers utilisent la position assise en premier si disponible, et position debout en premier, où tous préfèrent la position debout à la position assise). Leur moyenne est utilisée pour éviter les hypothèses sur le comportement des passagers ; une surface résiduelle négative est signalée comme irréalisable plutôt que intégrée dans les moyennes. Les résultats sont présentés par départ et sous forme de moyennes horaires par installation, les compartiments sans départ étant distingués par « ND » des compartiments où des départs ont eu lieu, mais tous étaient irréalisables. Pour compléter les résidus du tramway partagé, les intervalles entre les départs sont analysés pour déterminer les fenêtres minimales viables de 60 secondes, et à chaque fenêtre est attribuée une charge utile dédiée nominale égale à la surface utilisable vide divisée par l'empreinte des boîtes, soit environ 21,3 boîtes par emplacement. Le résultat est un ensemble harmonisé de fichiers CSV indiquant l'occupation, le nombre de départs, la capacité résiduelle partagée et le débit dédié maximal potentiel, en distinguant les différents itinéraires et directions.

7. Résultats

Les résultats de la simulation démontrent des différences opérationnelles fondamentales entre les configurations de tramways cargo partagés et dédiés selon les phases du réseau proposées. Cette section présente une analyse détaillée des variations de capacité de fret à l'arrêt 49, point d'échange représentatif du réseau du Grand Sud-Ouest. L'analyse englobe trois scénarios opérationnels distincts, évalués pendant une période de service standard en semaine, de 6 h à 23 h 59.

Le tableau 1 présente la capacité horaire de fret à l'arrêt 49, répartie en six colonnes représentant chaque combinaison scénario-sens : Phase 1 partagée (aller/retour), Phase 1 dédiée (aller/retour) et Phase 2 dédiée (aller/retour). Les valeurs indiquent le nombre moyen de conteneurs de fret par heure, le nombre de départs étant indiqué entre parenthèses. Pour les tramways partagés, les valeurs indiquent la capacité résiduelle après occupation des passagers ; pour les tramways dédiés, les valeurs indiquent la capacité totale disponible. Les entrées marquées « ND » indiquent l'absence de départs pendant cette heure. Le tableau couvre la journée de service complet (6 h 00 - 23 h 59) par intervalles d'une heure.

Tableau 1 : Capacité horaire des conteneurs de fret à l'arrêt 49 dans tous les scénarios et directions

Période de temps	Phase 1 partagée - En avant	Phase 1 partagée - Inversée	Phase 1 dédiée - En avant	Phase 1 dédiée - Inversée	Phase 2 dédiée - En avant	Phase 2 dédiée - Inversée
06:00-07:00	16.98 (9)	9.77 (3)	937.04 (44)	447.22 (21)	937.04 (44)	447.22 (21)
07:00-08:00	11.42 (6)	13.12 (9)	1,235.19 (58)	1,192.59 (56)	1,213.89 (57)	1,171.30 (55)
08:00-09:00	11.83 (9)	13.77 (10)	1,128.70 (53)	1,150.00 (54)	1,192.59 (56)	1,213.89 (57)
09:00-10:00	15.12 (6)	17.59 (6)	1,213.89 (57)	1,192.59 (56)	1,192.59 (56)	1,192.59 (56)
10:00-11:00	17.59 (6)	14.82 (5)	1,192.59 (56)	1,235.19 (58)	1,213.89 (57)	1,213.89 (57)
11:00-12:00	11.67 (6)	9.45 (6)	1,235.19 (58)	1,192.59 (56)	1,213.89 (57)	1,213.89 (57)
12:00-13:00	3.60 (6)	17.84 (6)	1,192.59 (56)	1,213.89 (57)	1,192.59 (56)	1,235.19 (58)
13:00-14:00	19.65 (6)	18.83 (6)	1,213.89 (57)	1,235.19 (58)	1,192.59 (56)	1,213.89 (57)
14:00-15:00	9.69 (5)	11.67 (6)	1,213.89 (57)	1,213.89 (57)	1,192.59 (56)	1,235.19 (58)
15:00-16:00	17.59 (4)	21.30 (4)	1,213.89 (57)	1,213.89 (57)	1,213.89 (57)	1,213.89 (57)
16:00-17:00	17.44 (8)	16.56 (7)	1,150.00 (54)	1,213.89 (57)	1,171.30 (55)	1,213.89 (57)
17:00-18:00	13.89 (4)	20.89 (3)	1,235.19 (58)	1,256.48 (59)	1,256.48 (59)	1,235.19 (58)
18:00-19:00	20.06 (1)	20.89 (3)	1,256.48 (59)	1,235.19 (58)	1,256.48 (59)	1,256.48 (59)
19:00-20:00	19.44 (2)	19.07 (5)	1,235.19 (58)	1,235.19 (58)	1,235.19 (58)	1,235.19 (58)

Période de temps	Phase 1 partagée - En avant	Phase 1 partagée - Inversée	Phase 1 dédiée - En avant	Phase 1 dédiée - Inversée	Phase 2 dédiée - En avant	Phase 2 dédiée - Inversée
20:00-21:00	ND (0)	21.30 (2)	1,277.78 (60)	1,277.78 (60)	1,277.78 (60)	1,256.48 (59)
21:00-22:00	ND (0)	ND (0)	1,277.78 (60)	1,277.78 (60)	1,277.78 (60)	1,277.78 (60)
22:00-23:00	21.30 (1)	ND (0)	1,256.48 (59)	1,277.78 (60)	1,256.48 (59)	1,277.78 (60)
23:00-24:00	21.30 (2)	2.78 (1)	702.78 (33)	1,086.11 (51)	702.78 (33)	1,086.11 (51)

Trois conclusions principales ressortent de l'analyse comparative de l'arrêt 49. Premièrement, les services partagés de transport de passagers et de colis sont confrontés à de fortes contraintes de capacité, allant d'un minimum de 3,60 conteneurs de fret (de 12h00 à 13h00) à un maximum de 21,30 conteneurs en heures creuses. La capacité moyenne reste à seulement 15,24 conteneurs pendant les heures d'exploitation. Deuxièmement, les tramways dédiés au fret offrent un débit 60 à 80 fois supérieur, avec un débit de 1 150 à 1 278 conteneurs par heure en service régulier, bien que leur capacité chute à 447 à 703 conteneurs en début de matinée et en fin de soirée. Aux heures de pointe (de 7h00 à 22h00), le nombre de départs est de 54 à 60 par heure, tandis qu'en heures creuses, il est de 20 à 44, ce qui reflète l'ajustement des intervalles de 6 à 10 minutes. Troisièmement, les opérations dédiées des phases 1 et 2 présentent des profils de capacité par arrêt presque identiques avec moins de 2 % de variation, confirmant que l'extension du réseau de 69 à 169 arrêts étend la couverture géographique sans compromettre les performances au niveau des installations.

Ces résultats au niveau des arrêts définissent des limites opérationnelles claires. Pour comprendre les tendances à l'échelle du réseau, le tableau 2 examine l'ensemble du corridor de la ligne 11, en agrégeant les sens de circulation aller et retour afin de révéler la répartition de la capacité entre tous les arrêts pendant les périodes d'exploitation clés.

Tableau 2 : Profil de capacité du corridor de la ligne 11 aux heures de pointe (arrêts sélectionnés)

Arrêter la fonction	Scénario	07h00-08h00	12h00-13h00	17h00-18h00	moyenne quotidienne
tram_p1_arrêt_26	Phase 1 partagée	15.9 (15)	8.5 (12)	21.3 (12)	16.8
	Phase 1 dédiée	1,150.0 (108)	1,192.6 (110)	1,213.9 (114)	1,185.5
	Phase 2 dédiée	1,139.4 (107)	1,192.6 (110)	1,213.9 (114)	1,181.9
tram_p1_arrêt_27	Phase 1 partagée	14.3 (15)	9.2 (12)	19.8 (12)	15.2
	Phase 1 dédiée	1,171.3 (108)	1,213.9 (110)	1,235.2 (114)	1,206.8
	Phase 2 dédiée	1,171.3 (108)	1,213.9 (110)	1,235.2 (114)	1,206.8
tram_p1_arrêt_41	Phase 1 partagée	12.5 (15)	10.7 (12)	19.2 (12)	14.9
	Phase 1 dédiée	1,192.6 (108)	1,203.2 (110)	1,245.8 (114)	1,213.9
	Phase 2 dédiée	1,192.6 (108)	1,203.2 (110)	1,245.8 (114)	1,213.9
tram_p1_arrêt_49	Phase 1 partagée	12.3 (15)	10.7 (12)	17.4 (7)	14.8
	Phase 1 dédiée	1,213.9 (114)	1,203.2 (113)	1,245.8 (117)	1,221.0
	Phase 2 dédiée	1,192.6 (112)	1,213.9 (114)	1,245.8 (117)	1,217.4
tram_p1_arrêt_50	Phase 1 partagée	16.4 (15)	11.3 (12)	20.1 (12)	16.2
	Phase 1 dédiée	1,150.0 (108)	1,192.6 (110)	1,213.9 (114)	1,185.5
	Phase 2 dédiée	1,150.0 (108)	1,192.6 (110)	1,213.9 (114)	1,185.5

Le tableau 2 révèle des schémas de capacité cohérents sur l'ensemble du corridor de la ligne 11. Les services partagés présentent de fortes contraintes à tous les arrêts, la capacité en milieu de journée chutant à 8,5-11,3 boîtes, contre 17,4-21,3 boîtes en soirée. Les tramways dédiés au fret maintiennent une capacité stable de 1 150-1 246 boîtes à tous les arrêts, avec une variation minimale entre les phases 1 et 2 (moins de 1 % de différence). Le nombre de départs (indiqué entre parenthèses) confirme une fréquence de service uniforme sur l'ensemble du corridor, les services dédiés assurant environ 108-117 départs aux heures de pointe, contre 7-15 pour les services partagés.

Analyse des performances à l'échelle du système

L'analyse à l'échelle de la ligne démontre une prestation de service uniforme sur la ligne 11, mais des variations de performance importantes apparaissent lors de l'examen des profils d'utilisation des passagers sur l'ensemble du réseau. Les tableaux 3 et 4 présentent les extrêmes de performance à l'échelle du système, basés sur le nombre total de passagers (volumes combinés d'embarquements et de débarquements), afin d'identifier les priorités opérationnelles et les opportunités d'allocation de capacité pour les trois scénarios.

Tableau 3 : Les cinq principaux arrêts selon le nombre total de passagers

Phase 1 partagée	Phase 1 dédiée	Phase 2 dédiée
tram_p1_stop_0 (1,586)	tram_p1_stop_0 (1,586)	tram_p1_stop_0 (1,636)
tram_p1_stop_52 (1,509)	tram_p1_stop_52 (1,509)	tram_p1_stop_52 (1,532)
tram_p1_stop_28 (1,432)	tram_p1_stop_28 (1,432)	tram_p1_stop_28 (1,377)
tram_p1_stop_31 (1,311)	tram_p1_stop_31 (1,311)	tram_p1_stop_31 (1,333)
tram_p1_stop_64 (1,229)	tram_p1_stop_64 (1,229)	tram_p1_stop_64 (1,220)

Les installations à fort trafic affichent une stabilité remarquable dans toutes les configurations opérationnelles. Les arrêts 0 et 52 traitent plus de 1 500 mouvements de passagers par jour, ce qui en fait des points d'ancrage principaux du système. La cohérence entre les opérations partagées et dédiées de la phase 1 confirme que la mise en œuvre du service de fret préserve les tendances actuelles de la demande de passagers sans effets de déplacement. L'extension du réseau de la phase 2 entraîne des ajustements de volume modestes : l'arrêt 0 augmente à 1 636 mouvements tandis que l'arrêt 28 diminue à 1 377, ce qui indique une redistribution de la demande à mesure que le système passe de 69 à 169 installations.

Tableau 4 : Cinq derniers arrêts selon le nombre total de mouvements de passagers

Phase 1 partagée	Phase 1 dédiée	Phase 2 dédiée
tram_p1_stop_53 (13)	tram_p1_stop_53 (13)	tram_p1_stop_53 (15)
tram_p1_stop_10 (22)	tram_p1_stop_10 (22)	tram_p1_stop_10 (16)
tram_p1_stop_40 (28)	tram_p1_stop_40 (28)	tram_p1_stop_40 (36)
tram_p1_stop_39 (39)	tram_p1_stop_39 (39)	tram_p1_stop_39 (42)
tram_p1_stop_20 (45)	tram_p1_stop_20 (45)	tram_p1_stop_20 (44)

Les installations à faible utilisation offrent des opportunités opérationnelles distinctes. L'arrêt 53 traite 13 à 15 mouvements de passagers par jour, soit moins de 1 % du volume des principales installations de correspondance. Ces arrêts périphériques conservent un nombre de passagers quasiment identique entre les opérations partagées et dédiées de la Phase 1, ce qui démontre que l'introduction du service de fret a un impact négligeable sur la demande existante, déjà faible. L'écart de 122 fois entre les installations les plus performantes et les moins performantes révèle une forte concentration de la demande, favorisant une segmentation naturelle pour des stratégies de service différenciées.

Ce gradient de performance prononcé établit des paramètres critiques pour l'optimisation du service de fret. Les installations à fort trafic telles que l'arrêt 0 et l'arrêt 52 subissent de fortes contraintes de capacité en exploitation partagée, comme le montre l'analyse de l'arrêt 49, où la capacité de fret résiduelle s'élevait en moyenne à 15,24 conteneurs pendant les heures d'exploitation. Ces installations congestionnées nécessitent des tramways dédiés au fret pour contourner les goulots d'étranglement et maintenir la fiabilité du service. Les arrêts à faible trafic, notamment l'arrêt 53 et l'arrêt 10, conservent une capacité inutilisée substantielle pendant les périodes de service, ce qui indique une capacité suffisante pour les opérations combinées de transport de passagers et de colis sans dégradation des performances. Les données étayent un cadre opérationnel hybride dans lequel les services de fret dédiés se concentrent sur les itinéraires à forte demande, tandis que les services partagés utilisent efficacement la capacité disponible aux emplacements périphériques avec une interférence minimale avec les passagers.

Mesures de performance du réseau

Les indicateurs opérationnels à l'échelle du système confirment la faisabilité des services intégrés de transport de passagers et de colis, tout en révélant des compromis fondamentaux en termes de capacité selon les stratégies de mise en œuvre. Le tableau 5 synthétise les indicateurs clés de performance de 19 940 départs observés dans les configurations de la phase 1 et de 68 363 départs dans le réseau étendu de la phase 2, pendant la période de service simulée en semaine.

Tableau 5 : Performances comparatives du réseau selon les scénarios

Indicateur de performance	Phase 1 partagée	Phase 1 dédiée	Phase 2 dédiée
Mesures de l'offre			
Départs observés	19,940	19,940	68,363
Progression moyenne (secondes)	32.6	32.6	29.5

Indicateur de performance	Phase 1 partagée	Phase 1 dédiée	Phase 2 dédiée
Durée du service (heures)	18.0	18.0	18.0
Couverture de l'itinéraire	10 routes	10 routes	32 routes
Opérations			
Véhicules-kilomètres	17,294	17,294	52,045
Heures de véhicule	1,219	1,219	4,196
Demande de passagers			
Utilisateurs uniques	9,288	9,288	61,080
Nombre total de voyages	11,424	11,424	73,800
Temps d'attente moyen (secondes)	284.2	284.2	283.6
95e percentile d'attente (secondes)	582	582	562
Nombre total d'embarquements	270,132	270,132	1,828,284
Capacité de chargement			
Cases résiduelles par départ	305.2	N/A	N/A
Départs de fret dédiés	N/A	127,822	468,381
Équivalents de boîtes totales dédiées	N/A	2,722,135	9,974,781
Débit dédié aux heures de pointe (boîtes)	N/A	188,281	636,759

Indicateur de performance	de	Phase 1 partagée	Phase 1 dédiée	Phase 2 dédiée
Partage dédié de midi (10h00-18h00)		N/A	54.5%	50.5%
Événements de surcapacité		0	0	39

Les opérations de la première phase démontrent une stabilité totale entre les configurations partagées et dédiées. Les deux scénarios maintiennent des niveaux de service passagers identiques, avec 774 utilisateurs uniques générant 952 voyages répartis sur 19 940 départs. Le temps d'attente moyen des passagers reste constant à 284,2 secondes, avec un temps d'attente au 95e percentile de 582 secondes, confirmant que l'introduction d'un service de fret dédié n'entraîne aucune dégradation de l'expérience passagers. La configuration partagée atteint 305,2 conteneurs de fret résiduels par départ après prise en compte de l'occupation des passagers, tandis que la configuration dédiée offre 2,72 millions d'équivalents conteneurs au total pour 127 822 départs dédiés au fret.

L'expansion de la phase deux produit des effets d'échelle proportionnels sur l'ensemble des dimensions opérationnelles. La croissance du réseau, passant de 10 à 32 lignes, porte le nombre de départs observés à 68 363, supportant 5 090 usagers uniques et 6 150 trajets au total. Cette multiplication par 3,4 de la fréquence de service se traduit par une augmentation de la fréquentation par 6,6, témoignant d'une amélioration des effets réseau et des avantages en termes de connectivité. Le nombre de véhicules-kilomètres atteint 52 045, tout en maintenant une efficacité opérationnelle de 0,76 kilomètre par départ, identique à celle de la phase un. L'intervalle moyen s'améliore à 29,5 secondes, améliorant la fréquence de service sans compromettre la fiabilité.

Le débit de fret démontre l'impact transformateur des services dédiés. Les opérations dédiées de la Phase 1 ont atteint 188 281 conteneurs aux heures de pointe du soir (15 h 00-16 h 00), soit une multiplication par 60 de la capacité résiduelle en configuration partagée. Les services dédiés de la Phase 2 sont portés à 636 759 conteneurs aux heures de pointe sur l'ensemble du réseau étendu, maintenant une efficacité constante par départ à 21,3 conteneurs. La répartition en milieu de journée reste équilibrée : 54,5 % du fret de la Phase 1 et 50,5 % du fret de la Phase 2 circule entre 10 h 00 et 18 h 00, ce qui correspond aux habitudes de livraison commerciales et évite les pics de trafic du matin et du soir.

Les indicateurs de fiabilité du système valident la robustesse opérationnelle de toutes les configurations. Les scénarios de la phase 1 ne connaissent aucun événement de surcapacité sur 19 940 départs, tandis que la phase 2 n'enregistre que 39 événements sur 68 363 départs, soit une

part de surcapacité inférieure à 0,1 %. Ces dépassements de capacité minimes, concentrés dans les gares d'interconnexion à fort trafic en période de pointe, représentent moins d'un départ par heure sur l'ensemble du réseau et confirment une capacité de véhicules suffisante pour le transport de passagers et de fret.

L'analyse de performance établit trois conclusions essentielles pour la planification de la mise en œuvre. Les services de fret dédiés offrent des améliorations de capacité considérables sans impact sur le service voyageur, comme le démontrent les 2,72 millions d'équivalents-conteneurs obtenus lors de la première phase, tout en maintenant des temps d'attente et des volumes d'embarquement identiques. L'extension du réseau de la première à la deuxième phase produit une croissance ultra-linéaire de la fréquentation, avec une multiplication par 3,4 du service générant une multiplication par 6,6 du nombre de passagers, validant ainsi les avantages de l'effet réseau d'une couverture complète. Enfin, les taux de surcapacité négligeables et la stabilité des distributions des temps d'attente dans tous les scénarios confirment que l'infrastructure de tramway proposée possède une capacité inhérente suffisante pour soutenir des opérations intégrées de transport voyageurs-colis sans nécessiter d'extension de flotte ni de modifications de l'infrastructure.

En conclusion, cette étude démontre que MATSim, avec le flux de travail SwissRailRaptor, est stable, auditable et prêt pour l'évaluation des politiques. Les exécutions couvrent une journée complète sur 10 itérations, les événements et les plans étant capturés à chaque itération. Des portes de validation protègent le planning pour l'intégrité du réseau et corrigent les temps de planification indéfinis avant la simulation. La standardisation de la configuration et des portes entre les scénarios préserve désormais la comparabilité. Archivez les artefacts par scénario avec des hachages de fichiers pour sécuriser la provenance. Corrigez les embarquements et les débarquements en utilisant uniquement les touches ENTER et EXIT. Alignez la mise à l'échelle équivalente des conteneurs de fret sur les sorties résiduelles et dédiées avant la publication.

Concernant le réseau de tramway, les résultats appuient un déploiement immédiat assorti de mesures de protection ciblées et d'une évaluation par étapes. Sur le Réseau prioritaire de la Ville de Montréal, les tramways dédiés au transport de marchandises transportent 9 974 781 équivalents-bennes, l'activité étant concentrée entre 10 h et 18 h. Sur le Réseau du Grand Sud-Ouest, les tramways partagés pour le transport de passagers et de colis fonctionnent à pleine capacité, avec un résidu moyen de 305 212 équivalents-bennes par départ. Des tramways dédiés au transport de marchandises sur le Réseau du Grand Sud-Ouest sont réalisables à des débits totaux inférieurs, et les opérations partagées devraient maintenir des plafonds résiduels par départ. Ensuite, il convient d'évaluer la sensibilité à l'intervalle de 6 à 10 minutes et l'adaptation de la demande de colis à la capacité résiduelle. Étendre l'instrumentation pour saisir l'embarquement de colis dans le scénario partagé et estimer les flux de marchandises réalisés par

ligne et par arrêt. Prioriser les affectations dédiées aux lignes de tramway affichant le débit le plus élevé observé sur le Réseau prioritaire de la Ville de Montréal.

8. Annexe



Figure 1 : Entrées de passagers en gare en une journée



Figure 2 : Sorties de gare des passagers en une journée