

## Projet Mitacs

# Titre : Simulation de la logistique de livraison urbaine à Montréal : rapport d'analyse et d'optimisation

Auteur : Shayan Nejadshamsi

### Section 1 : Résumé

Ce rapport détaille un modèle de simulation développé pour analyser et optimiser la logistique de livraison de colis du dernier kilomètre à Lachine, à Montréal. L'objectif principal est d'évaluer quantitativement sept scénarios de livraison distincts, allant des itinéraires traditionnels en fourgonnette aux nouveaux modèles en étoile utilisant des vélos cargo. L'objectif est d'identifier les stratégies les plus efficaces selon des indicateurs de performance clés : distance totale de déplacement, temps de trajet et consommation de carburant, afin d'éclairer la planification urbaine et les opérations logistiques durables.

La simulation repose sur un framework Python exploitant la bibliothèque OSMnx pour les données réelles du réseau routier montréalais, garantissant ainsi la précision géographique. Une innovation clé réside dans son moteur d'optimisation avancé, qui remplace les heuristiques conventionnelles par un processus en plusieurs étapes conçu pour une efficacité et une évolutivité supérieures :

- **Clustering adaptatif K-means** : les colis sont regroupés géographiquement tout en respectant les contraintes de capacité des véhicules, garantissant des zones de livraison denses et équilibrées.
- **Regroupement de bacs Best Fit Decreasing (BFD)** : ces groupes sont ensuite attribués de manière intelligente à la flotte de véhicules afin de maximiser l'utilisation de la capacité et de minimiser le nombre de véhicules requis.
- **Calcul de distance géodésique** : le modèle utilise des calculs de distance précis et réels pour une précision d'itinéraire améliorée par rapport à de simples approximations de coordonnées.

Le modèle a permis de simuler sept scénarios, incluant des livraisons directes à domicile, une logistique basée sur des plateformes (avec des flottes mutualisées et non mutualisées sur deux plateformes potentielles) et des itinéraires de vélos cargo directs. La simulation a permis d'obtenir des recommandations claires et fondées sur des données :

- **Efficacité de la distance** : Le scénario de livraison en hub (Galeries Lachine, mutualisé) s'est avéré le plus efficace, réduisant la distance totale de déplacement à **455,6 km** par rapport au scénario de référence qui est de 773,4 km.

- **Efficacité temporelle** : Le scénario **de livraison en hub (Galeries Lachine, Mutualisé)** a été le plus rapide, complétant toutes les livraisons en **88,8 heures** .
- **Impact environnemental** : Les scénarios **Direct Cargo Bike** ont offert la solution la plus écologique, éliminant entièrement la consommation de combustibles fossiles ( **0,00 litre** ).

## Section 2 : Introduction

### 2.1 Contexte et énoncé du problème

Le dernier kilomètre de la livraison urbaine représente le segment le plus complexe et le plus coûteux de la chaîne d'approvisionnement. Dans les zones densément peuplées comme Montréal, il contribue de manière significative à la congestion routière, aux inefficacités opérationnelles et aux émissions de gaz à effet de serre. Avec la croissance continue du commerce électronique, la pression sur les réseaux logistiques s'intensifie, nécessitant une transition vers des modèles de livraison plus durables et plus efficaces. Les systèmes traditionnels de livraison par camionnette, gérés par une seule entreprise, s'avèrent de plus en plus inadaptés aux défis urbains modernes.

Cette étude aborde cette question cruciale en développant un modèle de simulation haute fidélité pour analyser les stratégies logistiques alternatives du dernier kilomètre dans l'arrondissement de Lachine. L'objectif principal est d'évaluer quantitativement les compromis entre différents modèles en mesurant leur impact sur trois indicateurs clés de performance :

- **Distance totale parcourue (km)** : un indicateur du coût opérationnel et de l'utilisation du réseau routier.
- **Temps total (heures)** : mesure de l'efficacité du travail et de la rapidité du service.
- **Consommation totale de carburant (litres)** : indicateur direct de l'impact environnemental et de l'empreinte carbone.

### 2.2 Portée et scénarios

La simulation se concentre sur les limites géographiques de Lachine, à Montréal, et modélise les livraisons quotidiennes de colis de quatre grands transporteurs : **Transporteur A, Transporteur B, Transporteur C et Transporteur D, qui disposent tous d'une plateforme logistique dans la zone industrielle de Lachine ou à proximité** . Cela offre davantage d'options que d'habitude : utilisation d'une mini-plateforme pour le cross-docking des camionnettes aux vélos et livraison directe à vélo depuis le dépôt principal. Pour une analyse complète, sept scénarios opérationnels distincts ont été conçus et simulés :

1. **Livraison directe par camionnette (référence)** : chaque entreprise livre ses propres colis directement depuis son dépôt respectif à l'aide d'une flotte de camionnettes.
2. **Plateforme non mutualisée (Galeries Lachine)** : Les colis sont transportés de chaque dépôt vers une plateforme centrale aux Galeries Lachine. Chaque entreprise utilise ensuite sa propre flotte de vélos cargos pour la livraison finale.
3. **Basé sur un pôle, non mutualisé (écoquartier de Lachine Est)** : Identique au scénario 2, mais utilisant un emplacement de pôle proposé dans l'écoquartier de Lachine Est.
4. **Hub mutualisé (Galeries Lachine)** : Les colis sont regroupés au hub des Galeries Lachine et livrés par une flotte partagée de vélos cargos tiers, optimisant ainsi les itinéraires sur les parcelles de toutes les entreprises.
5. **Basé sur un pôle mutualisé (écoquartier de Lachine Est)** : Identique au scénario 4, mais utilisant le pôle de l'écoquartier de Lachine Est.
6. **Vélo cargo direct** : Chaque entreprise livre directement depuis son dépôt en utilisant une flotte de vélos cargo au lieu de fourgonnettes.
7. **Vélo cargo direct avec tunnel** : une variante du scénario 6 qui intègre une amélioration hypothétique de l'infrastructure (un tunnel sous l'autoroute 720) pour analyser son impact sur l'efficacité de l'itinéraire.

## 2.3 Structure du rapport

Ce rapport présente de manière systématique les résultats de la simulation. La section 3 détaille la méthodologie, notamment les sources de données et les principaux algorithmes d'optimisation. La section 4 fournit une analyse détaillée de chacun des sept scénarios. La section 5 présente une analyse comparative des résultats, suivie d'une conclusion avec des recommandations concrètes pour les acteurs de la logistique et de la planification urbaines.

## Section 3 : Méthodologie

Le modèle de simulation a été construit à l'aide d'une méthodologie multicouche, intégrant des données géospatiales réelles à un moteur d'optimisation sophistiqué en plusieurs étapes. Cette section détaille le cadre, les paramètres de données et les algorithmes fondamentaux qui sous-tendent l'analyse.

### 3.1 Cadre et environnement de simulation

Le modèle est développé en Python 3, en utilisant une suite de bibliothèques spécialisées pour l'analyse géospatiale et le traitement des données :

- **OSMnx** : pour télécharger et modéliser le réseau routier réel de Lachine, Montréal, y compris les données sur la longueur des routes, les vitesses et les temps de trajet.
- **NetworkX** : pour les calculs d'itinéraire basés sur des graphiques, comme la recherche du chemin le plus court entre deux points du réseau routier.

- **Pandas** : pour gérer et manipuler toutes les données tabulaires, y compris les listes de colis, les spécifications des véhicules et les emplacements des dépôts.
- **Scikit-learn** : pour implémenter l'algorithme de clustering K-means utilisé dans le regroupement de parcelles.
- **Geopy** : pour calculer des distances géodésiques précises entre des coordonnées géographiques, garantissant un degré de précision plus élevé que les approximations euclidiennes.

### 3.2 Sources de données et paramètres clés

La précision de la simulation repose sur un ensemble complet de données d'entrée dérivées des fichiers fournis :

- **Données géospatiales** : Le réseau routier de Lachine provient directement d'OpenStreetMap via OSMnx . Un second réseau modifié a été créé pour simuler l'impact d'un nouveau tunnel pour le scénario 7.
- **Emplacements opérationnels** : Les coordonnées GPS des dépôts de chacun des quatre transporteurs et des deux emplacements potentiels de hub (Galeries Lachine et Éco-quartier Lachine Est) ont été utilisées comme points d'origine pour les itinéraires de livraison.
- **Données sur les colis** : Les destinations de livraison étaient représentées par 2 000 points géographiques générés aléatoirement à l'intérieur des limites de Lachine, répartis entre les quatre transporteurs selon des parts de marché spécifiées (Transporteur A : 800, Transporteur B : 400, Transporteur C : 600, Transporteur D : 200 ). Cette approximation a été calculée à partir des connaissances sur le nombre exact de colis pour Transporteur A et sur les connaissances sur la part de marché des entreprises de logistique au Canada, comme l'indique le rapport « Parcel Shipping Index 2023 » de Pitney Bowes.
- **Paramètres du véhicule** : Les flottes de véhicules ont été définies par leur type (fourgonnette ou vélo cargo), leur nombre par entreprise, leur capacité de chargement, leur vitesse moyenne (km/h) et leur consommation de carburant (L/km ). Les vélos cargo ont été évalués à zéro. Le temps d'inactivité à chaque point de livraison pour les fourgonnettes et les vélos cargo a été fixé à 2 et 1,5 minutes respectivement.

**HYPOTHÈSE IMPORTANTE** : Dans cette analyse, 25 vélos cargo, chacun d'une capacité de 100 colis, sont considérés pour chaque entreprise (mutualisé  $4 \times 20 = 80$ ). 20 fourgons, chacun d'une capacité de 200 colis, sont considérés pour chaque entreprise.

- **Modélisation du trafic** : un coefficient de trafic horaire a été appliqué à tous les calculs de temps de trajet pour simuler l'impact de la congestion urbaine, avec différents multiplicateurs pour différentes heures de la journée.

### 3.3 Moteur d'optimisation de base

Au cœur de la simulation se trouve un processus d'optimisation en trois étapes conçu pour résoudre efficacement le problème complexe de tournées de véhicules (VRP). Cette approche « Cluster-First, Route-Second » privilégie l'évolutivité et l'efficacité.

### Étape 1 : clustering adaptatif (Cluster-First)

Au lieu d'attribuer les parcelles aux véhicules une par une, celles-ci sont d'abord regroupées en groupes géographiquement denses à l'aide d'un **algorithme adaptatif K-means**. Cette méthode offre deux avantages majeurs par rapport aux approches plus simples :

1. **Dimensionnement adaptatif des clusters** : le nombre optimal de clusters (  $k$  ) n'est pas fixe mais est calculé dynamiquement en fonction du nombre total de colis et de la capacité spécifiée du véhicule, garantissant que le regroupement initial est aligné sur les contraintes de la flotte.
2. **Rééquilibrage en fonction de la capacité** : après le clustering initial, une étape de post-traitement vérifie si un cluster dépasse la capacité du véhicule. Les clusters surdimensionnés sont intelligemment divisés afin de garantir qu'aucun véhicule ne se voit attribuer une charge impossible.

### Étape 2 : Affectation des véhicules (meilleur ajustement en diminuant le remplissage des bacs)

Une fois les groupes formés, ils sont attribués aux véhicules grâce à l'algorithme **BFD (Best Fit Decreasing)**. Cette méthode traite les capacités des véhicules comme des « bacs » et les groupes de colis comme des « articles » à emballer. Les groupes sont triés du plus grand au plus petit, puis attribués au véhicule dont la capacité disponible est la plus adaptée. Cette stratégie est très efficace pour minimiser le gaspillage de capacité et, par conséquent, le nombre total de véhicules nécessaires aux livraisons quotidiennes.

### Étape 3 : Optimisation intra-route (heuristique du plus proche voisin)

Les colis étant désormais attribués à des véhicules spécifiques, l'étape finale consiste à déterminer le trajet le plus efficace pour chaque tournée. Il s'agit d'une version du problème du voyageur de commerce (PVC), résolue ici grâce à une **heuristique du plus proche voisin**, efficace sur le plan informatique. À partir de son origine (dépôt ou plateforme), chaque véhicule se rend au point de livraison non visité le plus proche jusqu'à ce que tous les colis de son affectation aient été livrés. La distance et la durée totales de la tournée de chaque véhicule sont calculées à l'aide de l'algorithme du plus court chemin sur le graphique de rues OSMnx.

## Section 4 : Analyse de scénario et résultats

Cette section présente les résultats détaillés de la simulation pour chacun des sept scénarios de livraison. Chaque analyse décrit le modèle opérationnel et présente les indicateurs de performance clés, notamment la distance totale, le temps, la consommation de carburant et l'utilisation des véhicules.

### 4.1 Scénario 1 : Livraison directe par camionnette (référence)

- **Description** : Ce scénario représente le modèle de livraison traditionnel où chacune des quatre entreprises (Transporteur B, Transporteur D, Transporteur A, Transporteur C) envoie sa propre flotte de fourgonnettes directement depuis son dépôt respectif pour livrer les colis aux clients.
- **Résumé des résultats** :
  - **Distance totale** : 773,4 km
  - **Durée totale** : 115,4 heures
  - **Total carburant** : 12 375,1 litres
- **Analyse** : Le modèle de livraison directe est de loin le moins respectueux de l'environnement, avec une consommation de carburant ahurissante d'environ 13 000 litres. Ce modèle présente également d'importantes inefficacités en termes de densité des itinéraires, car les itinéraires des différentes entreprises se chevauchent souvent, ce qui entraîne des déplacements redondants dans les mêmes quartiers. Par exemple, Transporteur B avait besoin de six camionnettes pour 400 livraisons, tandis que Transporteur D en utilisait deux pour 200, ce qui témoigne d'un manque d'efficacité globale. Pour les camionnettes de livraison, une capacité de chargement de 120 colis a été supposée. Pour les vélos cargo, la capacité de chargement a été fixée à 40 colis. Ces deux hypothèses sont adaptables dans le code.
- Les détails sont les suivants :

=== Scénario d'exécution 1 : Livraison directe ===

Traitement des livraisons Transporteur B...

Affectation multi-tours : 600 colis, capacité totale de 4 000

Un seul tour suffit - en utilisant l'affectation standard

Tour 1 - Fourgon 1 : 200 livraisons, 39,04 km, 10,61 heures

Tour 1 - Fourgon 2 : 200 livraisons, 79,64 km, 11 h 59

Tour 1 - Fourgon 3 : 200 livraisons, 77,76 km, 11 h 55

Traitement des livraisons Transporteur D...

Affectation multi-tours : 200 colis, capacité totale de 4 000

Un seul tour suffit - en utilisant l'affectation standard

Tour 1 - Fourgon 1 : 200 livraisons, 119,48 km, 12 h 55

Traitement des livraisons de Transporteur A...

Affectation multi-tours : 800 colis, capacité totale de 4 000

Un seul tour suffit - en utilisant l'affectation standard

Tour 1 - Fourgon 1 : 200 livraisons, 84,18 km, 11,70 heures

Tour 1 - Fourgon 2 : 200 livraisons, 54,88 km, 10,99 heures

Tour 1 - Fourgon 3 : 182 livraisons, 58,18 km, 10,20 heures

Tour 1 - Fourgon 4 : 183 livraisons, 36,51 km, 9,73 heures

Tour 1 - Van 5 : 35 livraisons, 34,30 km, 2,52 heures

Traitement des livraisons Transporteur C...

Affectation multi-tours : 400 colis, capacité totale de 4 000

Un seul tour suffit - en utilisant l'affectation standard

Tour 1 - Fourgon 1 : 200 livraisons, 63,43 km, 11,20 heures

Tour 1 - Fourgon 2 : 200 livraisons, 126,04 km, 12,71 heures

#### 4.2 Scénario 2 : Basé sur un hub, non mutualisé (Galeries Lachine)

- **Description** : Les colis sont d'abord transportés des dépôts de l'entreprise vers un centre de distribution central aux Galeries Lachine. Chaque entreprise utilise ensuite sa propre flotte de vélos cargos pour effectuer les livraisons du dernier kilomètre.
- **Résumé des résultats** :
  - **Distance totale** : 916,3 km
  - **Durée totale** : 107,2 heures
  - **Total carburant** : 832,2 litres
- **Analyse** : Ce modèle permet une **réduction notable de la consommation de carburant** en remplaçant les déplacements en fourgonnette par des vélos cargo électriques. Cependant, la distance totale a augmenté par rapport à la référence. L'approche non mutualisée implique que les zones de livraison de chaque entreprise se chevauchent, ce qui entraîne la présence de plusieurs vélos cargo de différents transporteurs pour desservir la même zone. Par exemple, Transporteur A a déployé neuf vélos pour ses 800 colis, tandis que Transporteur B en a utilisé sept pour ses 600, ce qui démontre une fragmentation des opérations du dernier kilomètre malgré le partage de la plateforme.

=== Scénario d'exécution 2 : Livraison en hub - Flotte non mutualisée - Galeries Lachine ===

Étape 1 : Déplacement des colis des dépôts vers le hub partagé...

Étape 2 : Chaque entreprise livre ses colis avec ses propres vélos cargo...

Traitement des opérations Transporteur B...

Étape 1 - Transporteur B : 3 fourgons utilisés (3 nécessaires), 4,91 km chacun

Étape 2 - Transporteur B Bike 1 : 100 livraisons, 41,53 km

Étape 2 - Transporteur B Bike 2 : 100 livraisons, 62,45 km

Étape 2 - Transporteur B Bike 3 : 100 livraisons, 20,97 km

Étape 2 - Transporteur B Bike 4 : 99 livraisons, 38,08 km

Étape 2 - Transporteur B Bike 5 : 94 livraisons, 35,96 km

Étape 2 - Transporteur B Bike 6 : 80 livraisons, 7,26 km

Étape 2 - Transporteur B Bike 7 : 27 livraisons, 28,36 km

Transporteur B Total Étape 2 : 234,61 km, 30,42 heures

Traitement des opérations Transporteur D...

Étape 1 - Transporteur D : 1 fourgon utilisé (1 nécessaire), 4,83 km chacun

Étape 2 - Transporteur D Bike 1 : 100 livraisons, 41,00 km

Étape 2 - Transporteur D Bike 2 : 100 livraisons, 89,55 km

Transporteur D Total Étape 2 : 130,55 km, 13,81 heures

Traitement des opérations de Transporteur A...

Étape 1 - Transporteur A : 4 fourgonnettes utilisées (4 nécessaires), 6,30 km chacune

Étape 2 - Transporteur A Vélo 1 : 100 livraisons, 28,17 km

Étape 2 - Transporteur A Vélo 2 : 100 livraisons, 43,83 km

Étape 2 - Transporteur A Vélo 3 : 100 livraisons, 30,50 km

Étape 2 - Transporteur A Vélo 4 : 100 livraisons, 40,00 km

Étape 2 - Transporteur A Vélo 5 : 98 livraisons, 17,68 km

Étape 2 - Transporteur A Vélo 6 : 91 livraisons, 29,03 km

Étape 2 - Transporteur A Vélo 7 : 100 livraisons, 73,37 km

Étape 2 - Transporteur A Vélo 8 : 84 livraisons, 18,15 km

Étape 2 - POSTE CANADA Vélo 9 : 27 livraisons, 18,80 km

Transporteur A Total Étape 2 : 299,54 km, 39,63 heures

Traitement des opérations Transporteur C...

Étape 1 - Transporteur C : 2 fourgonnettes utilisées (2 nécessaires), 3,64 km chacune

Étape 2 - Transporteur C Vélo 1 : 100 livraisons, 45,94 km

Étape 2 - Transporteur C Bike 2 : 100 livraisons, 67,79 km

Étape 2 - Transporteur C Bike 3 : 92 livraisons, 49,53 km

Étape 2 - Transporteur C Bike 4 : 71 livraisons, 7,02 km

Étape 2 - Transporteur C Bike 5 : 37 livraisons, 29,35 km

Transporteur C Total Étape 2 : 199,63 km, 23,31 heures

### 4.3 Scénario 3 : Basé sur un pôle, non mutualisé (écoquartier de Lachine Est)

- **Description** : Ce scénario est opérationnellement identique au scénario 2, mais utilise un emplacement de hub différent dans l'écoquartier de Lachine Est.
- **Résumé des résultats** :
  - **Distance totale** : 935,9 km
  - **Durée totale** : 107,3 heures
  - **Total carburant** : 1 110,50 litres
- **Analyse** : Le choix du pôle de Lachine Est se traduit par une performance légèrement inférieure à celle du pôle des Galeries Lachine sur tous les plans. La distance totale a augmenté de 3 % et la consommation de carburant a augmenté de 2 %. Cela indique que le pôle des Galeries Lachine est plus central par rapport aux dépôts et à la distribution globale des colis, ce qui en fait un point de consolidation plus efficace pour la logistique de la phase 1.

=== Scénario d'exécution 3 : Livraison en centre-ville - Flotte non mutualisée - Écoquartier Lachine-Est ===

Étape 1 : Déplacement des colis des dépôts vers le hub partagé...

Transporteur B : 3 fourgons utilisés (3 nécessaires), 6,64 km chacun

Transporteur D : 1 fourgon utilisé (1 nécessaire), 6,57 km chacun

Transporteur A : 4 fourgonnettes utilisées (4 nécessaires), 8,04 km chacune

Transporteur C : 2 fourgonnettes utilisées (2 nécessaires), 5,38 km chacune

Étape 2 : Livraison du hub aux clients...

Transporteur A - Vélo 1 : 100 livraisons, 26,61 km

Transporteur A - Vélo 2 : 100 livraisons, 39,12 km

Transporteur A - Vélo 3 : 100 livraisons, 31,49 km

Transporteur A - Vélo 4 : 100 livraisons, 41,91 km

Transporteur A - Vélo 5 : 98 livraisons, 18,79 km  
 Transporteur A - Vélo 6 : 91 livraisons, 30,78 km  
 Transporteur A - Vélo 7 : 100 livraisons, 71,25 km  
 Transporteur A - Vélo 8 : 84 livraisons, 19,83 km  
 Transporteur A - Vélo 9 : 27 livraisons, 17,76 km  
 Transporteur B - Vélo 1 : 100 livraisons, 42,31 km  
 Transporteur B - Vélo 2 : 100 livraisons, 60,76 km  
 Transporteur B - Vélo 3 : 100 livraisons, 22,65 km  
 Transporteur B - Vélo 4 : 99 livraisons, 38,76 km  
 Transporteur B - Vélo 5 : 94 livraisons, 35,28 km  
 Transporteur B - Vélo 6 : 80 livraisons, 8,94 km  
 Transporteur B - Vélo 7 : 27 livraisons, 26,68 km  
 Transporteur C - Vélo 1 : 100 livraisons, 47,56 km  
 Transporteur C - Vélo 2 : 100 livraisons, 65,87 km  
 Transporteur C - Vélo 3 : 92 livraisons, 50,01 km  
 Transporteur C - Vélo 4 : 71 livraisons, 9,00 km  
 Transporteur C - Vélo 5 : 37 livraisons, 30,71 km  
 Transporteur D - Vélo 1 : 100 livraisons, 42,08 km  
 Transporteur D - Vélo 2 : 100 livraisons, 88,34 km

#### 4.4 Scénario 4 : Hub-based, mutualisé (Galeries Lachine)

- **Description** : Les 2 000 colis des quatre entreprises sont regroupés au centre des Galeries Lachine. Une flotte unique et partagée de vélos cargos est ensuite utilisée pour livrer tous les colis, avec des itinéraires optimisés pour l'ensemble du parc de colis, quel que soit le transporteur initial.
- **Résumé des résultats** :
  - **Distance totale** : 455,6 km
  - **Durée totale** : 74,9 heures
  - **Total carburant** : 832,2 litres
- **Analyse** : Ce scénario s'avère le modèle le plus efficace en termes de distance parcourue, permettant une **réduction de la distance totale parcourue** par rapport au scénario de référence. En mutualisant la flotte du dernier kilomètre, le moteur d'optimisation crée des itinéraires de livraison très denses et géographiquement

compacts, éliminant ainsi les déplacements redondants observés dans les modèles non mutualisés. Le nombre de vélos cargo requis (21) est inférieur au total utilisé dans le scénario non mutualisé (23), ce qui témoigne d'une meilleure utilisation des véhicules. Bien que plus lent que la livraison directe par camionnette, ce scénario offre un équilibre intéressant entre efficacité en termes de distance parcourue et économies de carburant considérables.

=== Scénario d'exécution 4 : Livraison en hub - Flotte mutualisée - Galeries Lachine ===

Étape 1 : Déplacement des colis des dépôts vers le hub partagé...

Transporteur B : 3 fourgons utilisés (3 nécessaires), 4,91 km chacun

Transporteur D : 1 fourgon utilisé (1 nécessaire), 4,83 km chacun

Transporteur A : 4 fourgonnettes utilisées (4 nécessaires), 6,30 km chacune

Transporteur C : 2 fourgonnettes utilisées (2 nécessaires), 3,64 km chacune

Étape 2 : Livraison du hub aux clients...

Vélo 1 : 100 livraisons, 25,15 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 5,76 km

Vélo 3 : 100 livraisons, 33,68 km

Vélo 4 : 100 livraisons, 15,40 km

Vélo 5 : 100 livraisons, 11,92 km

Vélo 6 : 100 livraisons, 11,32 km

Vélo 7 : 100 livraisons, 10,34 km

Vélo 8 : 100 livraisons, 17,50 km

Vélo 9 : 100 livraisons, 24,02 km

Vélo 10 : 100 livraisons, 8,09 km

Vélo 11 : 98 livraisons, 23,01 km

Vélo 12 : 96 livraisons, 7,86 km

Vélo 13 : 96 livraisons, 15,46 km

Vélo 14 : 95 livraisons, 13,53 km

Vélo 15 : 92 livraisons, 13,64 km

Vélo 16 : 92 livraisons, 26,49 km

Vélo 17 : 99 livraisons, 30,19 km

Vélo 18 : 100 livraisons, 47,21 km

Vélo 19 : 97 livraisons, 19,32 km

Vélo 20 : 100 livraisons, 25,10 km

Vélo 21 : 35 livraisons, 18,66 km

#### 4.5 Scénario 5 : Basé sur un pôle, mutualisé (écoquartier de Lachine Est)

- **Description** : Ce scénario est opérationnellement identique au scénario 4, mais utilise le pôle de l'écoquartier de Lachine Est.
- **Résumé des résultats** :
  - **Distance totale** : 479,2 km
  - **Durée totale** : 75,4 heures
  - **Total carburant** : 1110,50 litres
- **Analyse** : À l'instar de la comparaison non mutualisée, le pôle de Lachine Est s'avère un emplacement moins optimal pour un système mutualisé. La distance totale est plus élevée que dans le modèle mutualisé des Galeries Lachine. Cela renforce la conclusion selon laquelle le site des Galeries Lachine offre un avantage stratégique supérieur pour la logistique basée sur un pôle dans cette simulation.

=== Scénario d'exécution 5 : Livraison en centre-ville - Flotte mutualisée - Écoquartier Lachine-Est ===

Étape 1 : Déplacement des colis des dépôts vers le hub partagé...

Transporteur B : 3 fourgons utilisés (3 nécessaires), 6,64 km chacun

Transporteur D : 1 fourgon utilisé (1 nécessaire), 6,57 km chacun

Transporteur A : 4 fourgonnettes utilisées (4 nécessaires), 8,04 km chacune

Transporteur C : 2 fourgonnettes utilisées (2 nécessaires), 5,38 km chacune

Étape 2 : Livraison du hub aux clients...

Vélo 1 : 100 livraisons, 26,69 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 7,44 km

Vélo 3 : 100 livraisons, 32,28 km

Vélo 4 : 100 livraisons, 13,72 km

Vélo 5 : 100 livraisons, 13,67 km

Vélo 6 : 100 livraisons, 12,99 km

Vélo 7 : 100 livraisons, 10,15 km

Vélo 8 : 100 livraisons, 18,20 km

Vélo 9 : 100 livraisons, 25,77 km

Vélo 10 : 100 livraisons, 6,71 km  
 Vélo 11 : 98 livraisons, 24,76 km  
 Vélo 12 : 96 livraisons, 9,53 km  
 Vélo 13 : 96 livraisons, 15,81 km  
 Vélo 14 : 95 livraisons, 14,08 km  
 Vélo 15 : 92 livraisons, 11,96 km  
 Vélo 16 : 92 livraisons, 24,80 km  
 Vélo 17 : 99 livraisons, 28,81 km  
 Vélo 18 : 100 livraisons, 47,76 km  
 Vélo 19 : 97 livraisons, 21,00 km  
 Vélo 20 : 100 livraisons, 26,78 km  
 Vélo 21 : 35 livraisons, 16,89 km

#### 4.6 Scénario 6 : Vélo cargo direct

- **Description** : Ce scénario remplace l'ensemble de la flotte de fourgons du scénario 1 par des vélos cargo, qui livrent directement des dépôts de l'entreprise aux clients.
- **Résumé des résultats** :
  - **Distance totale** : 926,4 km
  - **Durée totale** : 115,5 heures
  - **Carburant total** : 0,00 litre
- **Analyse** : Le modèle de vélo cargo direct est l'option la plus écologique, éliminant totalement la consommation de combustibles fossiles. Cependant, il est le moins efficace en termes de temps et de distance. Leur vitesse et leur capacité inférieures entraînent des délais de livraison plus longs et des itinéraires plus fragmentés que les modèles à plateforme. La distance totale est supérieure de 19,8 % à celle de référence, ce qui rend ce modèle très exigeant en termes d'exploitation malgré ses avantages écologiques évidents.

=== Scénario d'exécution 6 : Livraison directe par vélo cargo ===

Traitement des livraisons Transporteur B avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 42,33 km  
 Vélo 2 : 100 livraisons, 66,42 km  
 Vélo 3 : 100 livraisons, 25,00 km  
 Vélo 4 : 99 livraisons, 42,52 km

Vélo 5 : 94 livraisons, 39,61 km

Vélo 6 : 80 livraisons, 5,10 km

Vélo 7 : 27 livraisons, 32,33 km

Traitement des livraisons Transporteur D avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 40,91 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 91,25 km

Traitement des livraisons de Transporteur A avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 34,12 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 49,33 km

Vélo 3 : 100 livraisons, 30,33 km

Vélo 4 : 100 livraisons, 37,22 km

Vélo 5 : 98 livraisons, 23,06 km

Vélo 6 : 91 livraisons, 32,34 km

Vélo 7 : 100 livraisons, 74,74 km

Vélo 8 : 84 livraisons, 22,55 km

Vélo 9 : 27 livraisons, 24,94 km

Traitement des livraisons Transporteur C avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 48,56 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 67,22 km

Vélo 3 : 92 livraisons, 54,79 km

Vélo 4 : 71 livraisons, 10,30 km

Vélo 5 : 37 livraisons, 31,46 km

#### 4.7 Scénario 7 : Vélo cargo direct avec tunnel

- **Description** : Ce scénario reproduit le modèle Direct Cargo Bike mais introduit une nouvelle connexion « tunnel » dans le réseau routier pour tester l'impact des améliorations ciblées des infrastructures pour le transport actif.
- **Résumé des résultats** :
  - **Distance totale** : 929,3 km
  - **Durée totale** : 115,7 heures
  - **Carburant total** : 0,00 litre

- **Analyse** : L'introduction du tunnel entraîne une diminution marginale mais mesurable, augmentant la distance totale d'environ 2,9 km et le temps total de 0,2 heure. Cela démontre que des modifications d'infrastructure à petite échelle ne peuvent améliorer l'efficacité et que leur impact est limité.

=== Scénario d'exécution 7 : Livraison directe par vélo cargo - Tunnel ===

Traitement des livraisons Transporteur B avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 42,33 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 66,42 km

Vélo 3 : 100 livraisons, 23,92 km

Vélo 4 : 99 livraisons, 42,40 km

Vélo 5 : 94 livraisons, 39,61 km

Vélo 6 : 80 livraisons, 5,10 km

Vélo 7 : 27 livraisons, 32,33 km

Traitement des livraisons Transporteur D avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 42,92 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 91,25 km

Traitement des livraisons de Transporteur A avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 34,12 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 49,33 km

Vélo 3 : 100 livraisons, 30,63 km

Vélo 4 : 100 livraisons, 37,22 km

Vélo 5 : 98 livraisons, 23,06 km

Vélo 6 : 91 livraisons, 32,34 km

Vélo 7 : 100 livraisons, 74,74 km

Vélo 8 : 84 livraisons, 22,55 km

Vélo 9 : 27 livraisons, 24,94 km

Traitement des livraisons Transporteur C avec des vélos cargo...

Vélo 1 : 100 livraisons, 48,56 km

Vélo 2 : 100 livraisons, 67,22 km

Vélo 3 : 92 livraisons, 54,79 km

Vélo 4 : 71 livraisons, 10,30 km

Vélo 5 : 37 livraisons, 33,23 km

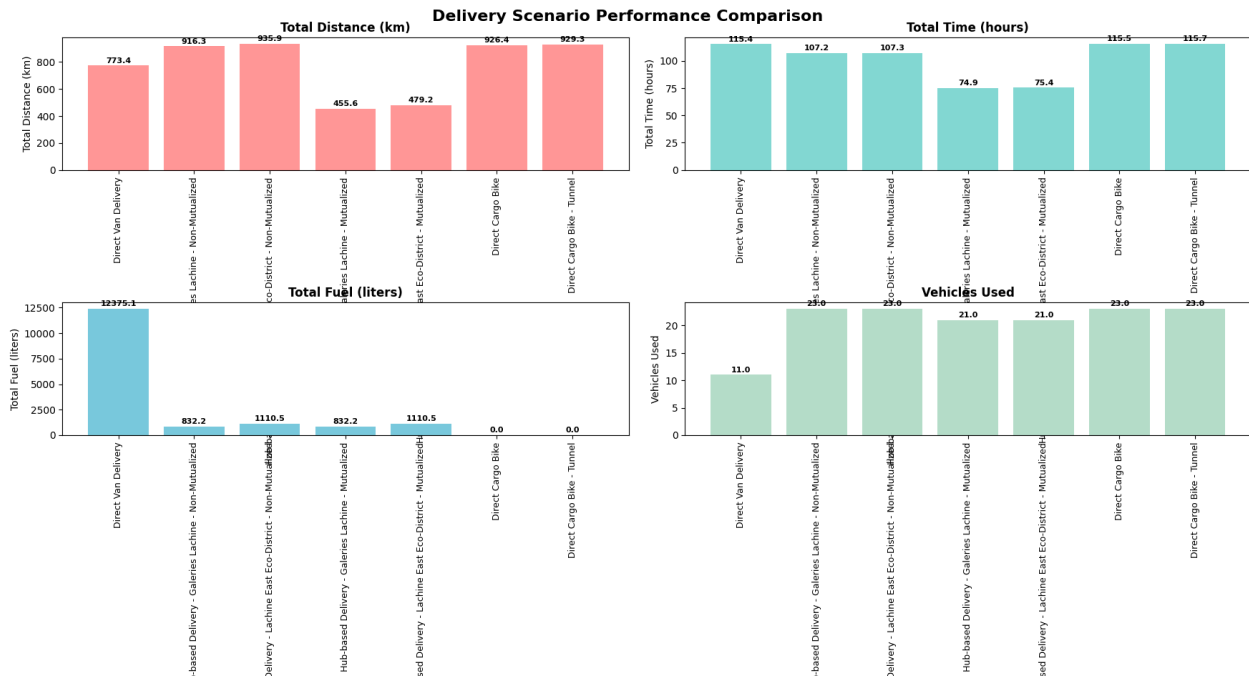
## Section 5 : Analyse comparative et discussion

Cette section synthétise les résultats des sept scénarios afin de tirer des conclusions générales sur l'efficacité des différentes stratégies de livraison du dernier kilomètre. L'analyse met en évidence les compromis cruciaux entre efficacité, rapidité et impact environnemental, et souligne le potentiel transformateur de la mutualisation logistique. Le tableau comparatif des différents scénarios est le suivant :

DELIVERY SCENARIO COMPARISON RESULTS								
Detailed Comparison:								
Vehicles Available	Total Rounds	Parcels Delivered	Parcels Undelivered	Scenario	Total Distance (km)	Total Time (hours)	Total Fuel (liters)	Vehicles Used
80	4	2000	0	Direct Van Delivery	773.44	115.36	12375.09	11
80	1	0	0	Hub-based Delivery - Galeries Lachine - Non-Mutualized	916.35	107.17	832.25	23
80	1	0	0	Hub-based Delivery - Lachine East Eco-District - Non-Mutualized	935.88	107.32	1110.49	23
80	1	0	0	Hub-based Delivery - Galeries Lachine - Mutualized	455.65	74.92	832.25	21
80	1	0	0	Hub-based Delivery - Lachine East Eco-District - Mutualized	479.21	75.35	1110.49	21
80	1	0	0	Direct Cargo Bike	926.44	115.50	0.00	23
80	1	0	0	Direct Cargo Bike - Tunnel	929.32	115.71	0.00	23

### 5.1 Performances selon les indicateurs clés

Les résultats de la simulation, résumés dans les figures ci-dessous, révèlent une hiérarchie claire des performances pour chaque indicateur clé.



RECOMMANDATIONS

- **Idéal pour l'efficacité à distance** : Livraison en hub - Galeries Lachine - Mutualisé
- **Meilleur pour l'efficacité du temps** : Livraison en hub - Galeries Lachine - Mutualisé
- **Meilleur pour l'impact environnemental** : vélo cargo direct
- **Idéal pour l'utilisation des véhicules** : Livraison en hub - Galeries Lachine - Non mutualisé

Analyse d'impact environnemental :

- Livraison en hub - Galeries Lachine - Non mutualisé : réduction de carburant de 93,3 %, réduction de distance de -18,5 %
- Livraison en hub - Écoquartier Lachine Est - Non mutualisé : réduction de carburant de 91,0 %, réduction de distance de -21,0 %
- Livraison en hub - Galeries Lachine - Mutualisée : réduction de carburant de 93,3 %, réduction de distance de 41,1 %
- Livraison en hub - Écoquartier Lachine Est - Mutualisé : réduction de carburant de 91,0 %, réduction de distance de 38,0 %
- Vélo cargo direct : réduction de 100,0 % de la consommation de carburant, réduction de 19,8 % de la distance parcourue
- Vélo cargo direct - Tunnel : réduction de 100,0 % de la consommation de carburant, réduction de 20,2 % de la distance

## Section 6 : Analyse des coûts

Bien que le modèle de simulation se concentre sur les indicateurs opérationnels, ces résultats servent d'entrées directes pour une analyse complète des coûts. Cette section traduit les données de performance (distance, temps, carburant et nombre de véhicules) en une évaluation qualitative des coûts financiers, environnementaux et stratégiques associés à chaque scénario. Aucune valeur monétaire absolue n'est attribuée ; les scénarios sont évalués les uns par rapport aux autres selon six catégories de coûts critiques.

### 6.1 Coûts d'investissement

*Cette catégorie comprend les dépenses initiales ponctuelles nécessaires pour permettre chaque scénario.*

- **Livraison directe par camionnette (faible)** : ce scénario suppose des flottes de camionnettes préexistantes, nécessitant un investissement minimal en capital.
- **Scénarios basés sur un hub (élevé)** : Les coûts comprennent la location d'un entrepôt central (hub) et l'achat d'une grande flotte de vélos cargo pour la livraison de l'étape 2. Ce coût est élevé pour les modèles mutualisés et non mutualisés.
- **Vélo cargo direct (modéré)** : Nécessite un investissement important dans une flotte complète de vélos cargo et l'installation d'infrastructures de recharge (les coûts sont faibles) dans le dépôt de chaque entreprise.

### 6.2 Coûts opérationnels / variables

*Il s'agit de coûts récurrents directement liés au volume de livraison, principalement liés au carburant, à la main-d'œuvre (temps) et à l'entretien du véhicule (distance).*

- **Livraison directe par camionnette (très élevé)** : Ce scénario présente des coûts de main-d'œuvre très élevés en raison de la durée totale (115 heures) et le **coût du carburant le plus élevé** (12 375 litres). Les coûts d'entretien sont modérés.
- **Basé sur un hub, non mutualisé (élevé)** : Ces deux scénarios présentent des coûts de main-d'œuvre élevés (107 heures chacun) et des coûts de maintenance importants en raison de l'importance de la flotte combinée et de la distance totale importante (916 et 935 km). Les coûts de carburant sont faibles à modérés, ne s'appliquant qu'à l'étape du premier kilomètre (832 et 1 110 litres).
- **Basé sur un hub, mutualisé (modéré)** : Ces scénarios représentent les **modèles les plus efficaces sur le plan opérationnel**. Ils présentent les distances totales les plus courtes (455 et 479 km), ce qui se traduit par les coûts de maintenance par parcelle les plus faibles. Les coûts de main-d'œuvre sont modérés (74 et 75 heures) et les coûts de carburant sont faibles à modérés (832 et 1 110 litres).

- **Vélo cargo direct (élevé)** : Ces scénarios entraînent des coûts de main-d'œuvre très élevés (115 heures chacun) en raison de leur longue durée. Ils n'entraînent **aucun coût de carburant** (hors coûts d'électricité), mais des coûts d'entretien modérés sont attendus en raison des longues distances parcourues par une flotte importante de vélos.

### 6.3 Coûts fixes / frais généraux

*Cette catégorie comprend les coûts qui ne dépendent pas de l'activité, tels que l'assurance du véhicule, l'immatriculation et les salaires fixes.*

- **Livraison directe par camionnette (modérée)** : Avec seulement 11 camionnettes au total dans toutes les entreprises, ce scénario présente des coûts fixes modérés liés à la propriété et à l'assurance du véhicule.
- **Scénarios basés sur un hub (élevé)** : Ces scénarios nécessitent des flottes importantes et combinées (23 véhicules pour les scénarios non mutualisés et 21 véhicules pour les scénarios mutualisés), ce qui entraîne des coûts fixes élevés pour l'assurance, l'immatriculation et les contrats d'entretien des véhicules. Le hub lui-même engendre également un coût fixe important sous forme de loyers ou de mensualités hypothécaires.
- **Vélo cargo direct (faible)** : nécessite une grande flotte de 23 vélos cargo, ce qui entraîne des coûts fixes de véhicule inférieurs à ceux du modèle fourgon uniquement.

### 6.4 Coûts environnementaux / externes

*Ces coûts représentent l'impact sociétal de chaque scénario, comme la pollution, les émissions de carbone, la congestion et le bruit.*

- **Livraison directe par camionnette (très élevé)** : Il s'agit du scénario le moins performant sur le plan environnemental, avec une consommation massive de carburant se traduisant directement par des émissions élevées de CO<sub>2</sub> et de polluants atmosphériques. La flotte de camionnettes contribue également de manière significative à la congestion du trafic urbain.
- **Scénarios basés sur les hubs (modérés)** : Les modèles de hubs mutualisés et non mutualisés offrent une réduction considérable des coûts environnementaux par rapport au modèle de référence, grâce à l'électrification du dernier kilomètre. Le **modèle mutualisé est supérieur**, car sa distance totale plus courte réduit encore davantage la congestion.
- **Vélo cargo direct (faible)** : C'est le grand gagnant, avec zéro émission directe. Les vélos cargo contribuent également beaucoup moins aux embouteillages et à la pollution sonore que les fourgonnettes.

### 6.5 Coûts cachés / liés aux risques

Il s'agit de coûts potentiels futurs liés à la complexité opérationnelle, à la réglementation et aux risques du marché.

- **Livraison directe en camionnette (risque élevé) :** Le risque réglementaire est le plus élevé, notamment en raison des futures taxes carbone, des zones à faibles émissions et de la volatilité des prix du carburant. Cette activité comporte également un risque pour la réputation de l'entreprise sur un marché de plus en plus soucieux de l'environnement.
- **Scénarios basés sur des plateformes (risque modéré) :** Le principal risque réside dans la complexité opérationnelle. La gestion d'un système logistique en deux étapes exige une coordination sophistiquée. Le modèle mutualisé ajoute un **risque de collaboration**, nécessitant des accords de confiance et de partage de données entre entreprises concurrentes.
- **Vélo cargo direct (risque modéré) :** Risques liés à l'évolutivité et aux conditions météorologiques. Une flotte exclusivement composée de vélos peut être confrontée à des volumes importants en haute saison, à des colis surdimensionnés et à des conditions météorologiques défavorables, ce qui peut impacter la fiabilité du service.

**Tableau récapitulatif de l'analyse des coûts**

Scénario	Coûts d'investissement	Coûts opérationnels	Coûts fixes	Coûts environnementaux	Coûts liés aux risques
1. Livraison directe par camionnette	Faible	Très élevé	Modéré	Très élevé	Haut
2. Basé sur un hub, non mutualisé (galeries)	Haut	Haut	Haut	Modéré	Modéré
3. Basé sur un hub, non mutualisé (Lachine Est)	Haut	Haut	Haut	Modéré	Modéré
4. Basé sur un hub, mutualisé (galeries)	Haut	Modéré	Haut	Modéré	Modéré-élevé
5. Basé sur un hub, mutualisé (Lachine Est)	Haut	Modéré	Haut	Modéré	Modéré-élevé
6. Vélo cargo direct	Modéré	Haut	Faible	Faible	Modéré
7. Vélo cargo direct - Tunnel	Modéré	Haut	Faible	Faible	Modéré

## Section 7 : Conclusion et recommandations

### 7.1 Conclusion

Cette étude de simulation fournit une évaluation complète et fondée sur des données de sept modèles distincts de livraison du dernier kilomètre pour Lachine, à Montréal. L'analyse confirme qu'une transition stratégique des systèmes de livraison traditionnels, cloisonnés et basés sur des fourgonnettes, vers des modèles collaboratifs en étoile peut apporter des améliorations significatives en termes d'efficacité et de durabilité.

Les principales conclusions sont triples :

1. **La mutualisation est transformatrice :** La stratégie la plus efficace pour optimiser les livraisons urbaines est la mutualisation de la flotte du dernier kilomètre. Le

regroupement des colis de plusieurs transporteurs au sein d'une plateforme centralisée et le déploiement d'une flotte partagée de vélos cargo éliminent les déplacements redondants, réduisant ainsi considérablement la distance totale, le temps d'exploitation et la congestion des véhicules.

2. **Les modèles en étoile offrent le meilleur équilibre** : si la livraison directe par vélo cargo est l'option la plus écologique, elle est inefficace pour la logistique urbaine. Le modèle en deux étapes, basé sur un hub, offre un meilleur équilibre en exploitant les atouts des deux types de véhicules : les fourgonnettes pour un transport efficace en vrac jusqu'au hub et les vélos cargo pour une livraison propre et agile dans les centres urbains denses.
3. **L'emplacement stratégique est primordial** : Le choix d'un emplacement central influence considérablement l'efficacité globale d'un système en étoile. Le site des Galeries Lachine a démontré un avantage logistique évident par rapport à l'écoquartier de Lachine-Est, soulignant la nécessité d'une analyse géospatiale rigoureuse dans la planification des pôles de consolidation urbaine.

Le scénario **de livraison par hub (Galeries Lachine, mutualisé)** s'est révélé être la stratégie globale la plus convaincante, permettant une **réduction de 41 % de la distance parcourue** et de **93 % de la consommation de carburant** par rapport à la situation de référence, ce qui en fait la principale recommandation pour un système logistique urbain à l'épreuve du temps.

## 7.2 Recommandations

Sur la base des résultats de la simulation, les recommandations concrètes suivantes sont proposées aux parties prenantes, notamment aux planificateurs municipaux, aux prestataires logistiques et aux décideurs politiques :

1. **Prioriser le développement d'un pôle logistique urbain mutualisé** : Les acteurs publics et privés devraient collaborer à l'établissement d'un centre de consolidation urbaine (CCU) pilote dans un lieu stratégique, comme le secteur des Galeries Lachine. Cette initiative devrait se concentrer sur la création d'une infrastructure partagée pour le tri des colis et d'une plateforme de transport commun pour la livraison du dernier kilomètre grâce à une flotte mutualisée de vélos cargo électriques.
2. **Encourager la logistique collaborative** : Des politiques municipales devraient être élaborées pour encourager les entreprises de logistique à participer à des réseaux de livraison partagés. Cela pourrait inclure un accès préférentiel aux trottoirs pour les véhicules desservant la plateforme, des subventions pour la participation à un service de livraison mutualisé ou la mise en place de zones à faibles émissions favorisant les livraisons par vélos cargo.
3. **Investir dans une planification de réseau axée sur les données** : Avant de s'engager dans l'infrastructure physique, il est nécessaire de procéder à des simulations et à des analyses de données plus poussées afin d'affiner le nombre et l'emplacement optimaux de micro-pôles dans la grande région de Montréal. Le modèle développé dans cette étude fournit une base solide pour une telle analyse approfondie.

4. **Intégrer la planification logistique au développement des infrastructures :** L'impact mineur du tunnel simulé suggère que les projets d'infrastructures de transport actif devraient être planifiés conjointement avec la refonte du réseau logistique. Le meilleur retour sur investissement proviendra des projets soutenant directement les corridors à fort trafic reliant les dépôts, les plateformes et les zones de livraison denses.

En adoptant une approche collaborative basée sur des plateformes, Lachine et la grande région de Montréal peuvent créer un écosystème de livraison du dernier kilomètre qui est non seulement plus efficace et rentable, mais aussi beaucoup plus durable et mieux intégré au tissu urbain.