



Chaire en Transformation du Transport

Modélisation des stratégies de partage d'entrepôts et des tournées de livraison à vélo

Présentation de François Sarrazin, Ph.D.

Projet de recherche sous la direction des Professeurs

Bernard Gendron, Ph.D. et Martin Trépanier, Ing., Ph.D.

Symposium Chaire en transformation du transport

Montréal, le 14 décembre 2021



Source: <https://www.purolator.com/>

Contexte: logistique urbaine

- ▶ Logistique urbaine : dernier segment du réseau de transport ([Crainic et Montreuil 2016](#))
 - ▶ Assure l'approvisionnement des magasins et des ménages ([Crainic et al. 2004](#))
 - ▶ Transport de marchandises et de personnes partagent les mêmes artères ([Crainic et al. 2009](#))
 - ▶ Multiplicité de produits ([Gérardin et al. 2000](#))
- ▶ Population de plus en plus concentrée dans les villes ([Taniguchi et al. 2014](#)) et hausse du commerce électronique ([Viu-Roig et Alvarez-Palau 2020](#))



Source: <https://ici.radio-canada.ca/>

Contexte: environnement

- ▶ Réchauffement climatique (<https://ici.radio-canada.ca/dossier/>)
- ▶ Le transport représentait 24,4% du CO₂ émis dans le monde en 2016 (<https://webstore.iea.org/>)
- ▶ Le transport routier représente jusqu'à 74% des émissions de transport (*Ibid*)



Source: <https://www.ledevoir.com/>

Problématique

- ▶ Transport par camion peu rentable, car maillon le plus faible ([Holguin-Veras et al. 2014](#))
- ▶ Gestion décentralisée des flottes de camion ([Crainic et al. 2004](#))
- ▶ Phénomènes de congestion
- ▶ La plupart des problèmes de logistique (urbaine ou autre) se rapportent à une mauvaise gestion de l'espace et/ou du temps



Source: <https://www.lhebdojournal.com/>



Source: <https://ici.radio-canada.ca/>

Plan de la présentation

1. Principales solutions
2. Cas d'étude
 1. Données et scénarios
 2. Modèle d'optimisation du transport
 3. Résultats préliminaires
 4. Seconde phase pour les tournées de véhicules
3. Conclusion



Source: <https://ici.radio-canada.ca/>

1- Principales solutions

- ▶ **Centres de distribution urbains**
 - ▶ Permettent d'utiliser différents véhicules
- ▶ Transport multimodal
 - ▶ **Utilisation de vélos électrique**
 - ▶ Trains
 - ▶ Livraisons par drones
- ▶ Composition des flottes de véhicules
- ▶ Livraisons en dehors des heures de pointe
- ▶ Combinaison de livraisons entrantes et sortantes
- ▶ **Optimisation** et simulation des opérations

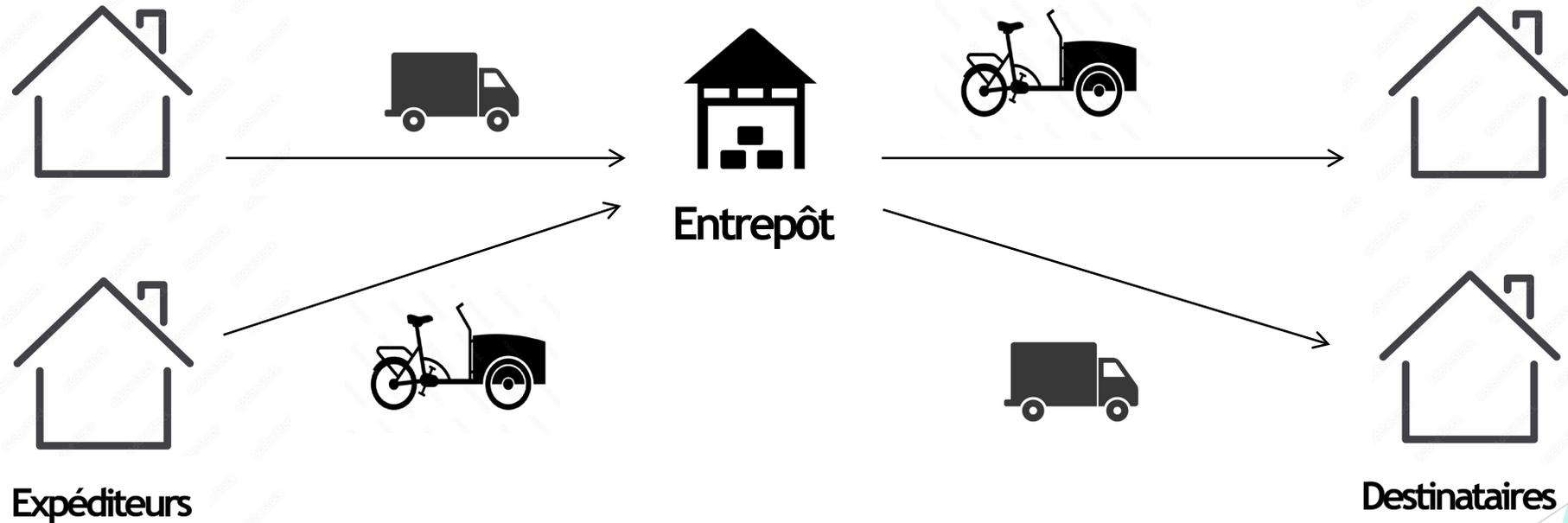


Source: <http://www.railpictures.ca>

2.1- Cas d'étude: données

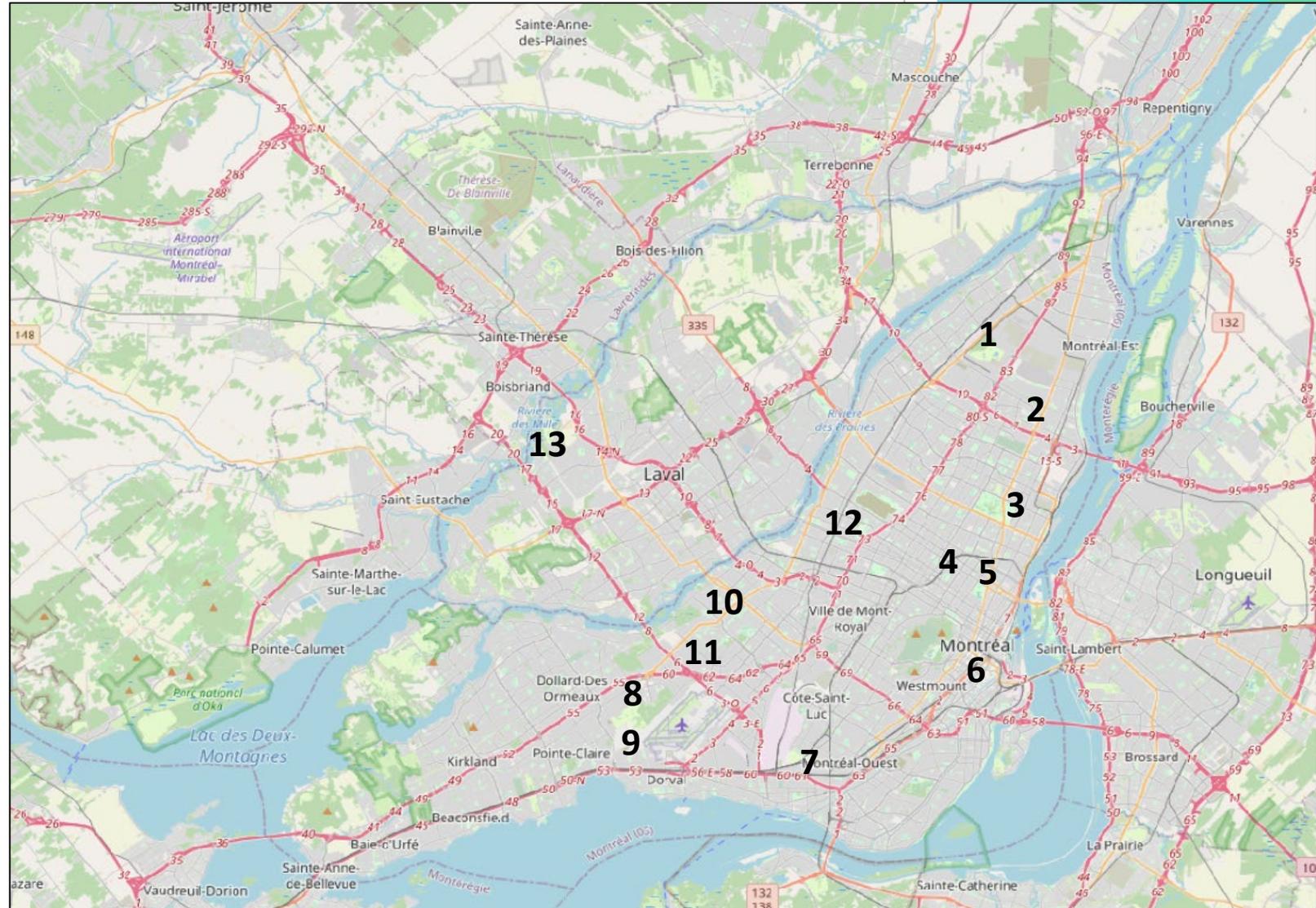
- ▶ 67 460 livraisons de 146 000 kg de courrier express sur une période d'un an (vers ou à partir de Montréal)
 - ▶ Obtenus de la plateforme de transport *Envoi Montréal* grâce à Jalon Montréal et COOP Carbone
 - ▶ La majeure partie de ces livraisons passent par 13 entrepôts
- ▶ Véhicules: Camions « *Curbside* » et vélos cargos
- ▶ On pose comme hypothèse une économie de 50% au niveau des émissions de GES avec l'utilisation des vélos cargos: [Purolator Greens Fleet With Launch of Fully Electric Curbside-Delivery Trucks in Vancouver | T-Net News \(bctechnology.com\)](#)
- ▶ Les secteurs de recensement sont utilisés et identifiés à partir des codes postaux des lieux de cueillette et de livraisons pour chaque ligne.
- ▶ Matrice des distance définie avec QGIS

2.1- Processus de livraison



2.1- Localisation des entrepôts

- 1: Anjou
- 2: Mercier-Hochelaga-Maisonneuve-1
- 3: Mercier-Hochelaga-Maisonneuve-2
- 4: Plateau-Mont-Royal
- 5: Ville-Marie (l'Ilot-Voyageur qui utilise déjà des vélos cargos)
- 6: Sud-Ouest
- 7: Lachine
- 8: Dorval-1
- 9: Dorval-2
- 10: Saint-Laurent-1
- 11: Saint-Laurent-2
- 12: Ahuntsic-Cartierville
- 13: Sainte-Rose



2.1- Cas d'étude: Utilisation des vélos cargos

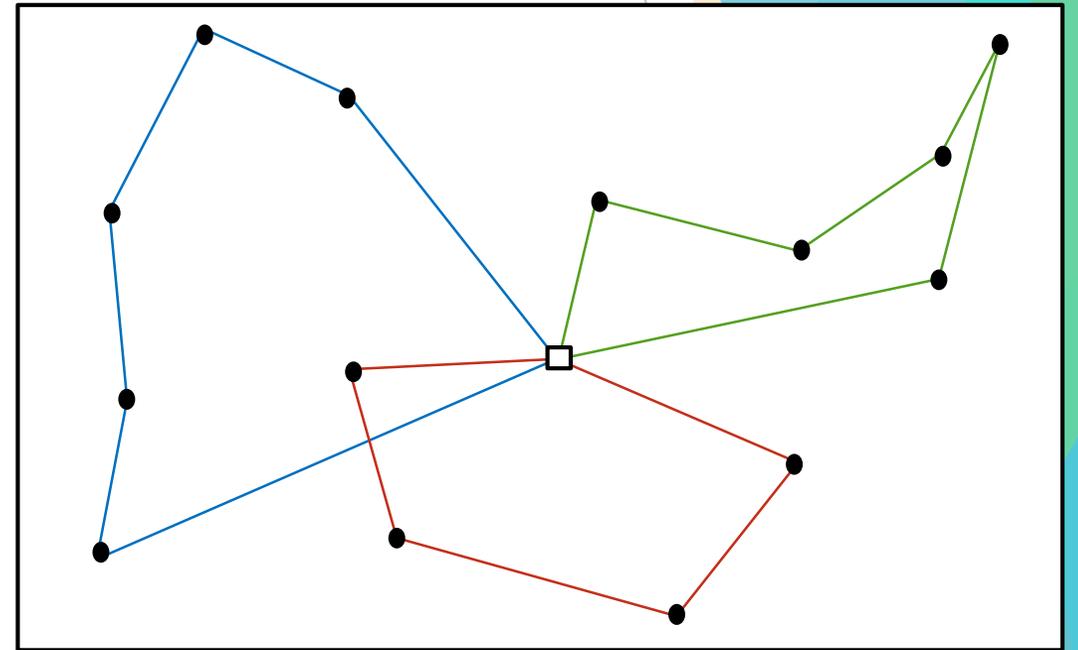
- ▶ Plus écologiques
- ▶ Sécuritaires et plus mobiles
- ▶ Plus lents (mais pas tant que cela...)
- ▶ Autonomie limitée
- ▶ Réduisent le stationnement illégal
- ▶ Adaptés aux secteurs des petites entreprises et des services



Source: <https://www.lesaffaires.com/>

2.1- Séquence des décisions

- ▶ Choisir les entrepôts et les véhicules utilisés pour chaque envoi (cueillette et livraison)
- ▶ À partir de ces choix, déterminer l'ordre des livraisons et bâtir les tournées



Source: [Wikipédia](#)

2.1- Cas d'étude: Scénarios à évaluer

- ▶ Bénéfices du partage des entrepôts
(au lieu d'entrepôts dédiés à une compagnie)
- ▶ Installation de nouveaux entrepôts
- ▶ Utilisation accrue des vélos cargos
- ▶ Autonomie accrue des vélos cargos



Source: <https://www.decomurale.ca/>

2.2 Modèle d'optimisation - Choix des entrepôts et véhicules - Fonction objectif

Minimiser:

$$\sum_i \sum_j \sum_p \sum_v \sum_t C_{ij}^v D_{ij}^v \text{Ratio}^{pvte} k_{ij}^{pvt} \quad (1)$$

Coûts * Distance * Part du transport en charge * Quantité transportée

2.2- Modèle d'optimisation: Contraintes

$$\sum_w \sum_v \sum_{v'} \delta_{ou}^{pwvv'tk} = 1$$

$$\sum_k \delta_{ou}^{pwvv'tk} S_{ou}^{ptk} - x_{ou}^{pwvv't} = 0$$

$$\sum_i \sum_t \sum_v k_{iw}^{pvt} - \sum_j \sum_t \sum_v k_{wj}^{pvt} = 0$$

$$\sum_i \sum_t \sum_v m_{iw}^{pvt} - \sum_j \sum_t \sum_v m_{wj}^{pvt} = 0$$

$$k_{wy}^{pvt} = \sum_u \sum_{v'} x_{wu}^{pyvv't}$$

$$k_{yu}^{pvt} = \sum_w \sum_v x_{wu}^{pyvv't}$$

$$m_{wy}^{pvt} = \sum_u \sum_k \sum_{v'} \delta_{wu}^{pyvv'tk}$$

$$m_{yu}^{pvt} = \sum_w \sum_k \sum_v \delta_{wu}^{pyvv'tk}$$

Toutes les livraisons doivent être faites une fois

Flux par combinaison correspond à la somme des envois

Conservation de flux aux entrepôts

Cohérence des flux et des livraisons sur les segments et l'ensemble du réseau

2.2- Modèle d'optimisation: Contraintes (suite)

$$\delta_{ou}^{pyvv'tk} S_{ou}^{ptk} \leq Q^v/2$$

$$\sum_i \sum_j \sum_t k_{ij}^{pvt} \leq Tours^{vp} Q^v$$

$$\sum_i \sum_j \sum_t m_{ij}^{pvt} Ratio^{pt} H_{ij}^v \leq M^v g^v$$

$$Tours^{vp} = \sum_j \sum_v \sum_t m_{ij}^{pvt} Ratio^{pt} D_{ij}^v / \Omega^v$$

$$m_{ij}^{pvt} \leq \theta_{ij}^{pvt} B$$

$$\theta_{ij}^{pvt} D_{ij}^v \leq \Omega^v$$

$$\sum_i \sum_v \sum_t k_{iy}^{pvt} \leq Q_y$$

$$m_{ij}^{pvt}, Tours^{vp} \in \mathbb{Z}$$

$$\theta_{ij}^{pvt}, \delta_{wu}^{pyvv'tk} \in \{0;1\}$$

$$m_{ij}^{pvt}, k_{ij}^{pvt}, x_{wu}^{pvt} \geq 0$$

Gros envois ne peuvent pas être livrés par vélos cargos

Capacité pondérale des véhicules

Capacité temporelle des véhicules

Définition du nombre de tours par type de véhicule

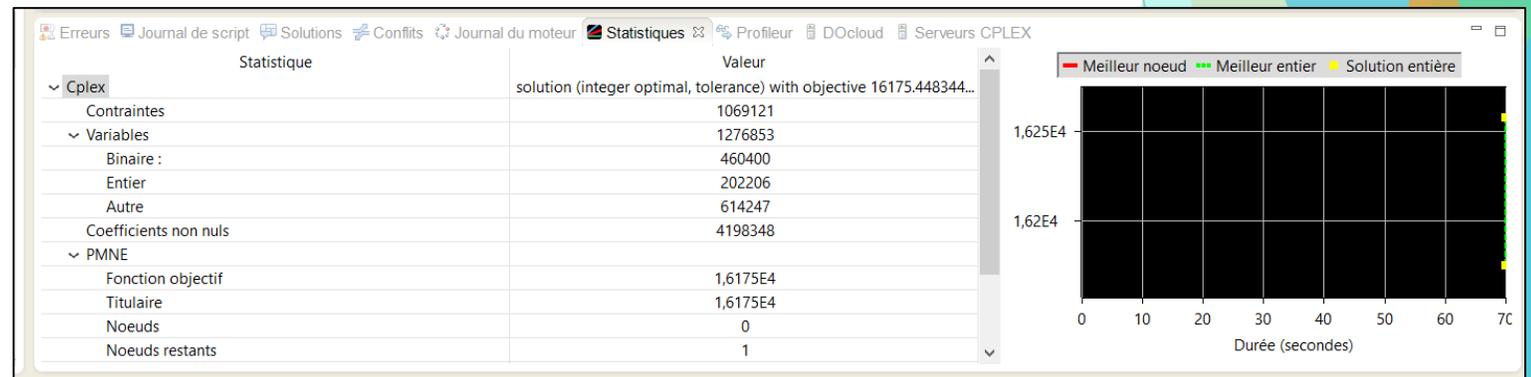
Distance maximale par véhicule

Capacité des entrepôts

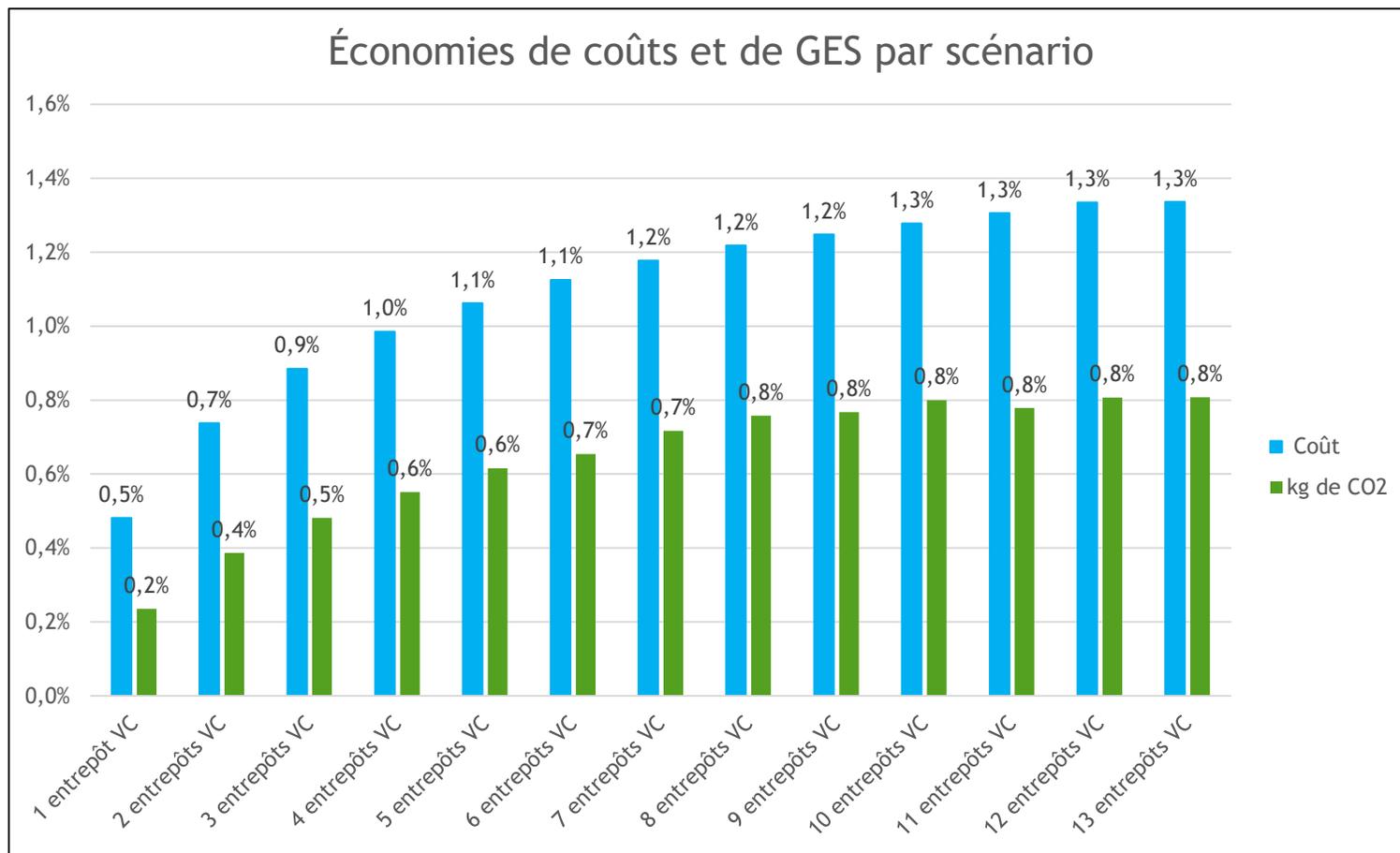
Variables en nombres entiers, binaires et non négatives

2.2- Résolution

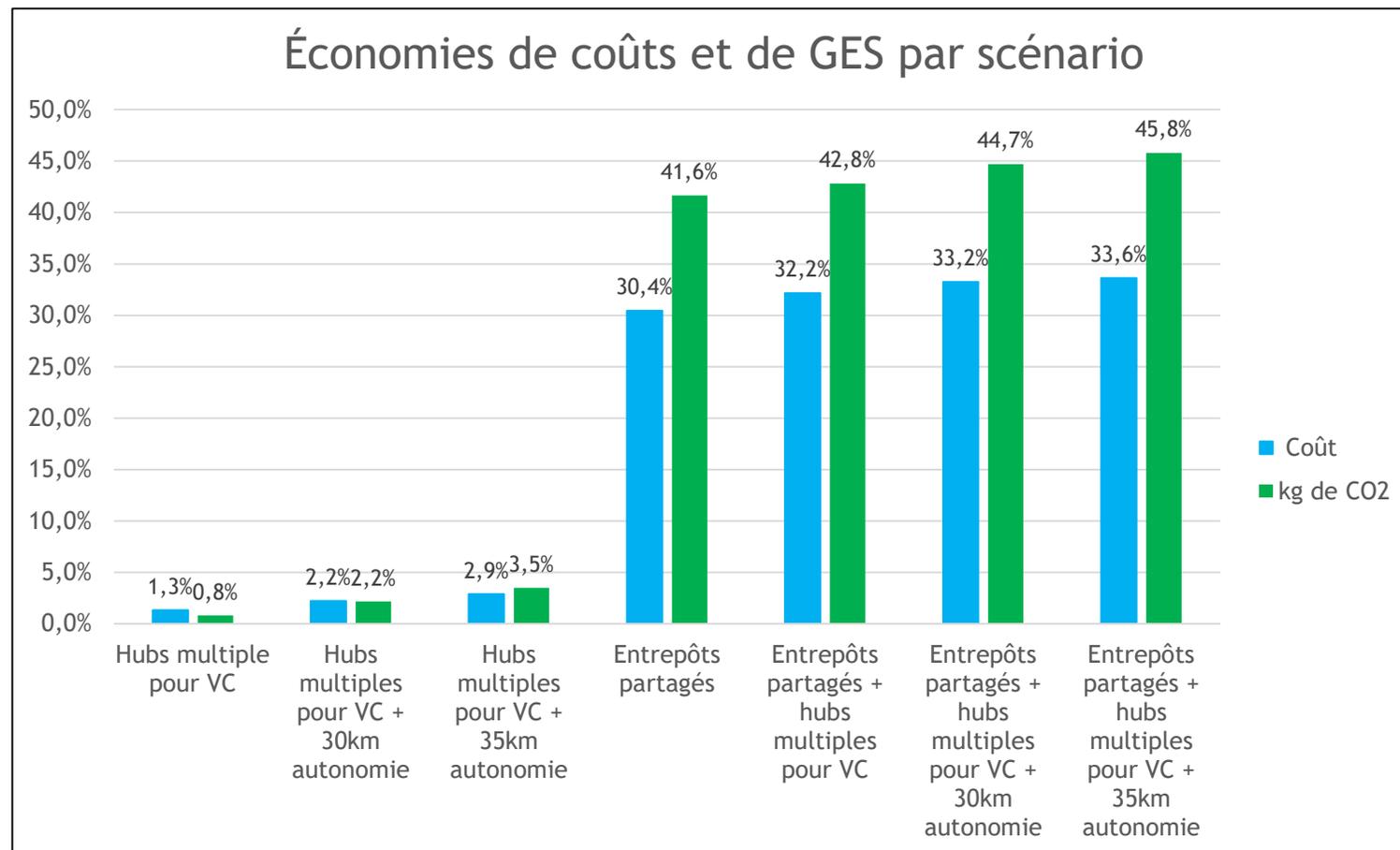
- ▶ Entre 1 070 000 et 14 444 000 contraintes
- ▶ Entre 1 275 000 et 12 729 000 variables
- ▶ Programmé avec OPL Studio et résolu avec CPLEX 12.6
- ▶ Entre 20 minutes et 10 heures de temps de résolution
- ▶ Solution optimale



2.3- Principaux résultats (hypothèse d'une utilisation à 35% des véhicules)



2.3- Principaux résultats (suite)

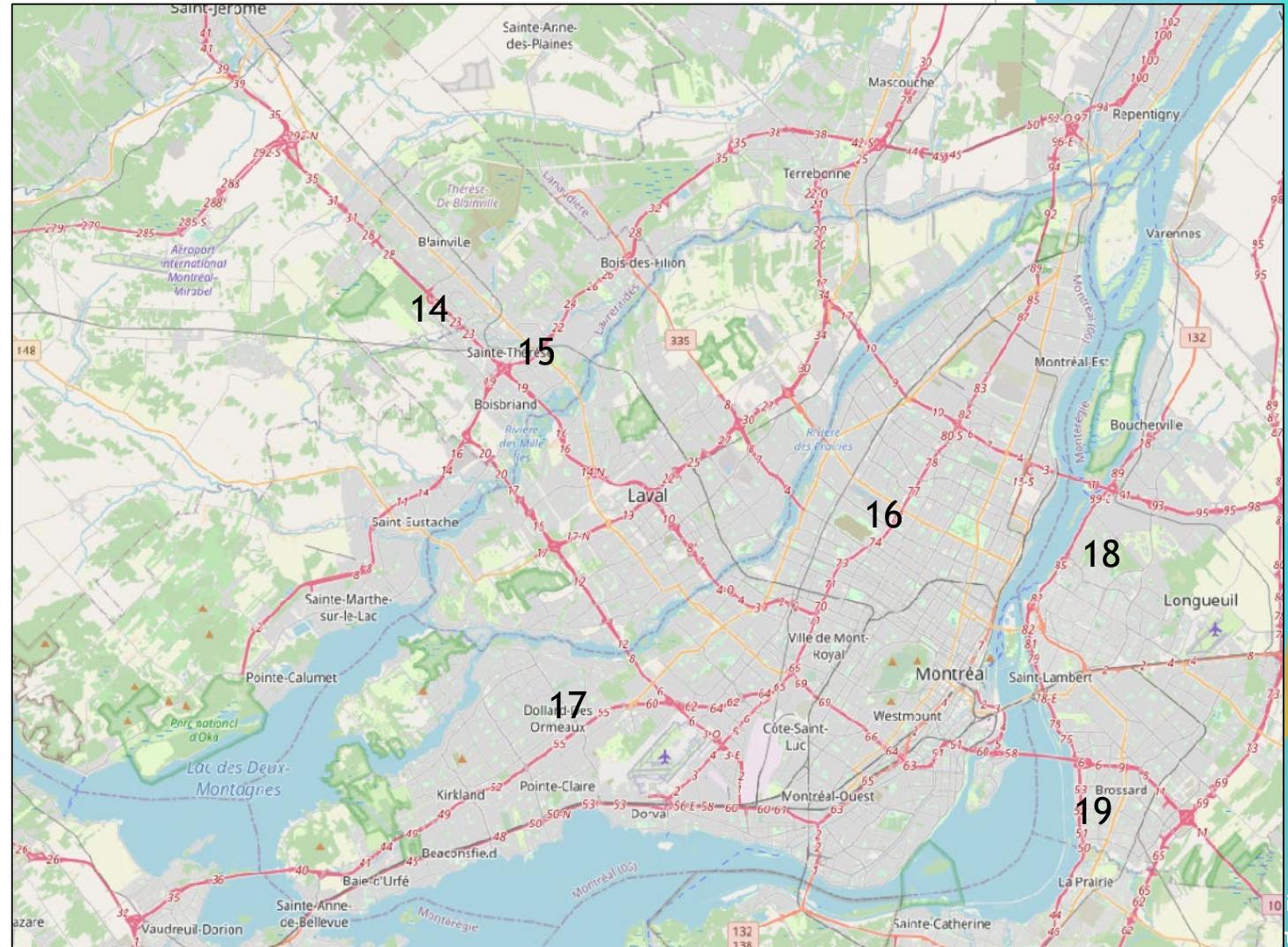


2.3- Part des kg-km transportés par Vélos cargos par scénario

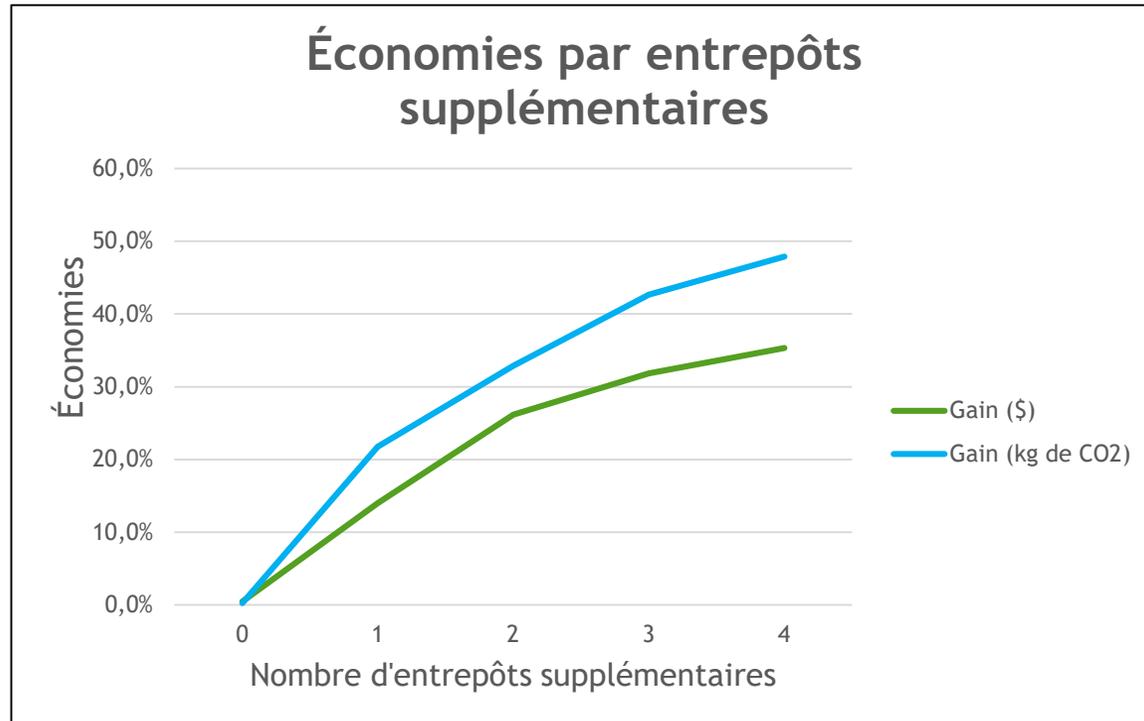
#	Scénario	%
1	Pas de vélo cargo	0%
2	Un hub de vélos cargos (Ilot-Voyageur)	3%
3	Hubs multiples pour les vélos cargos	9%
4	Hubs multiples + 30km d'autonomie pour les VC	15%
5	Hubs multiples + 35km d'autonomie pour les VC	19%
6	Entrepôts partagés	7%
7	Entrepôts partagés + Hubs multiples	24%
8	Entrepôts partagés + Hubs multiples + 30km d'autonomie	34%
9	Entrepôts partagés + Hubs multiples + 35km d'autonomie	42%

2.3- Autres entrepôts possibles

- 14: Sainte-Thérèse
- 15: Rosemère
- 16: Saint-Michel
- 17: Dollard-des-Ormeaux
- 18: Vieux-Longueuil
- 19: Brossard



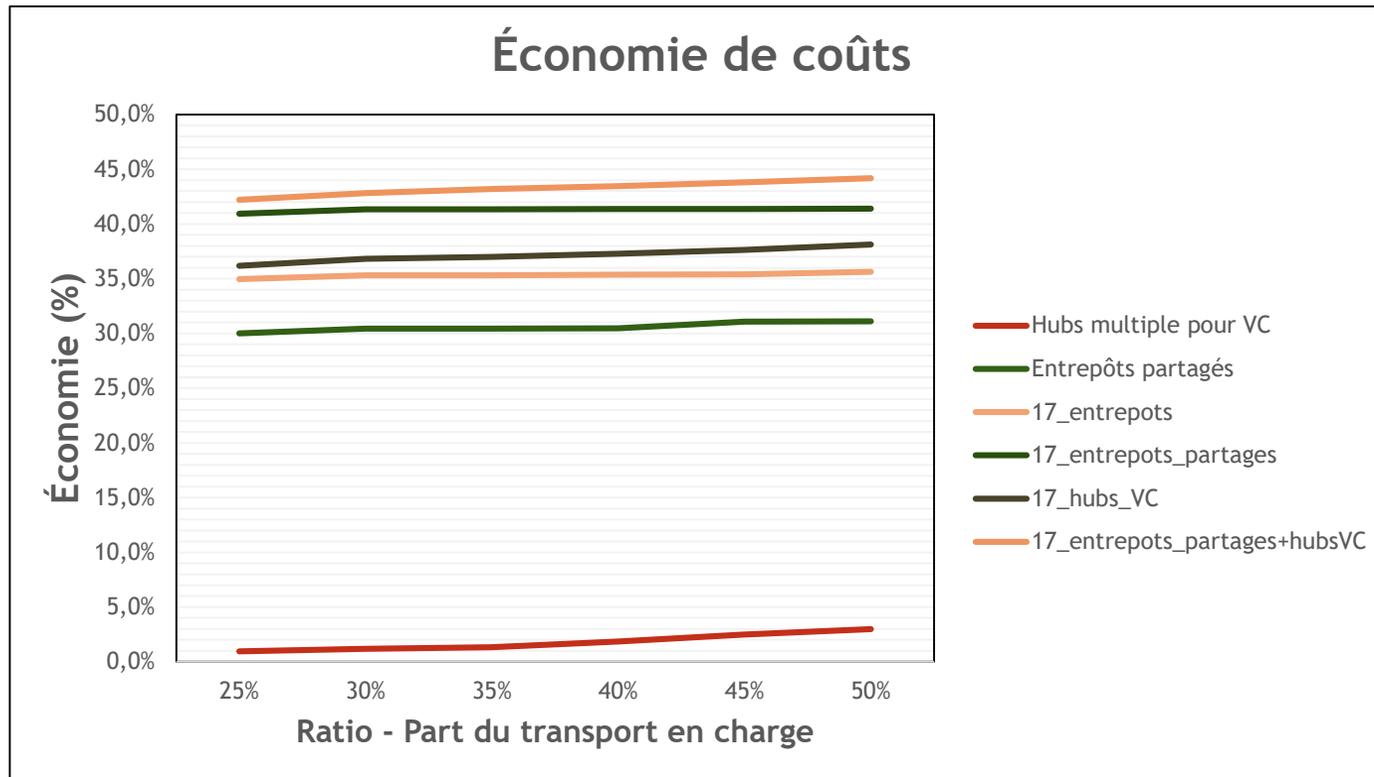
2.3- Économies par entrepôts supplémentaires



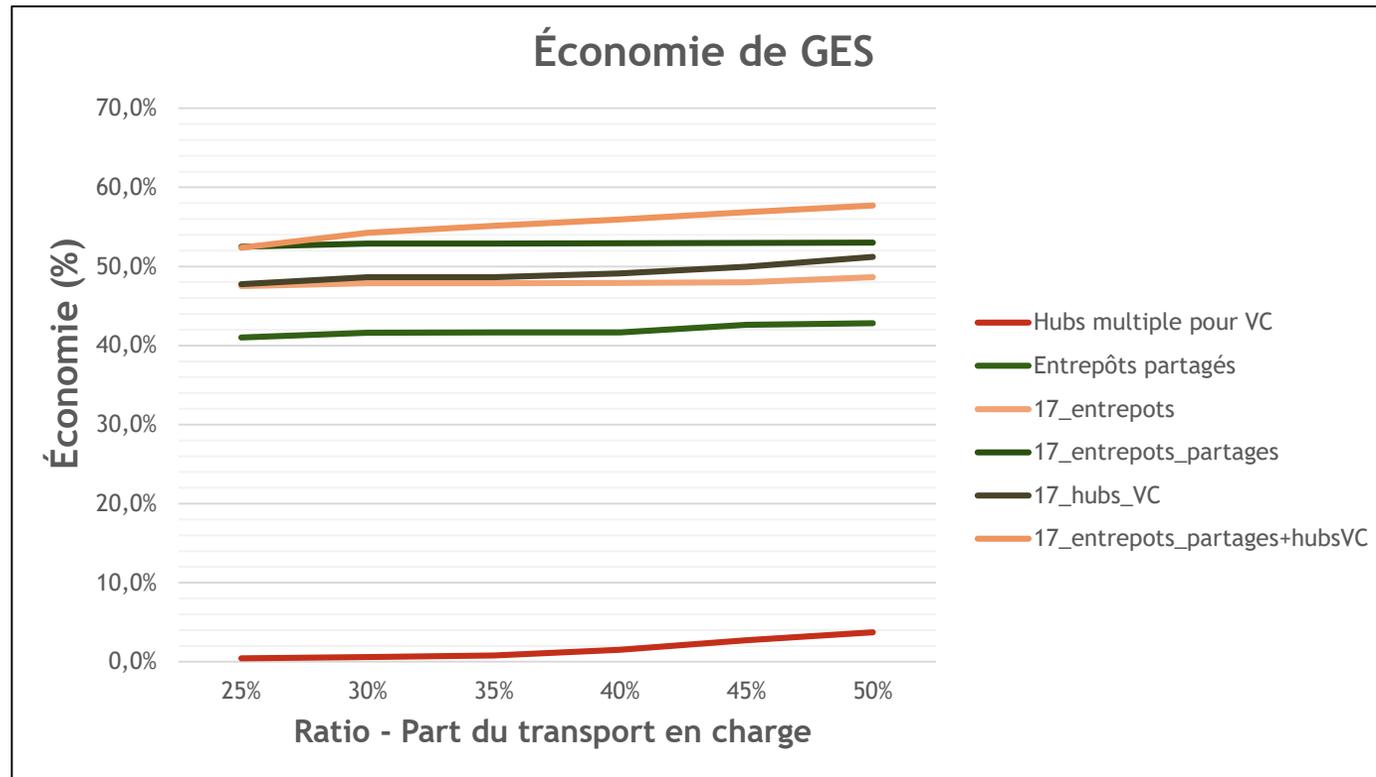
2.3- Entrepôts choisis

Entrepôts Supplémentaires	1	2	3	4
1	Saint-Michel	X	X	X
2	Saint-Michel	Dollard-des-Ormeaux	X	X
3	Saint-Michel	Dollard-des-Ormeaux	Sainte-Thérèse	X
4	Saint-Michel	Dollard-des-Ormeaux	Sainte-Thérèse	Brossard

2.3- Analyse de sensibilité (part du transport en charge)



2.3- Analyse de sensibilité (part du transport en charge - GES)



2.3- Analyse statistique

Indicateur	Facteur/R ²	Coefficient	p-valeur
Coûts (\$)	Constante	(0.645)	0.00
	% en charge	0.092	0.08
	Hubs avec Vélos cargos	0.001	0.12
	Autonomie des Vélos cargos (km)	0.002	0.01
	Partage des entrepôts	0.014	0.00
	Nombre d'entrepôts	0.048	0.00
	R ² ajusté		87%
Indicateur	Facteur/R ²	Coefficient	p-valeur
GES (Kg de CO ₂)	Constante	(0.842)	0.00
	% en charge	0.163	0.03
	Hubs avec Vélos cargos	0.001	0.36
	Autonomie des Vélos cargos (km)	0.004	0.00
	Partage des entrepôts	0.018	0.00
	Nombre d'entrepôts	0.061	0.00
	R ² ajusté		84%

2.4 Modèle d'optimisation -Tournées de véhicules - Fonction objectif

Minimiser:

$$\sum_i \sum_j \sum_r \sum_v C^{rv} D_{ij}^v S^r y_{ij}^r \quad (20)$$

Coûts * Distances * Charges transportées * Variables de décision

2.4- Modèle de tournées: Contraintes

$$\sum_j y_{ij}^r = 1$$

$$\sum_i \sum_j \sum_r y_{ij}^r z^{rv} H_{ij}^v \leq M^v g^v$$

$$\sum_i \sum_j y_{ij}^r D_{ij}^v z^{rv} \leq \Omega^v$$

$$\sum_j y_{ij}^r = \sum_k X^{rk} \theta_i^r$$

$$\sum_j y_{wj}^r = Z_w^r = \sum_j y_{jw}^r$$

$$u_i^r - u_j^r + (n^r - 1) * y_{ij}^r \leq (n^r - 2)$$

$$y_{ij}^r \in \{0;1\}$$

$$u_i^r \geq 0$$

Tous les envois doivent être faites une fois

Assez de temps disponible pour la flotte

Distance maximale (vélos cargos)

Sites visités dans une route le nombre de fois prévus

Départ et retour à l'entrepôt désigné

Pas de sous-tours

Variables binaires

Non-négativité

3- Conclusion

- ▶ Le partage des entrepôts apporterait des gains importants au niveau des coûts et des émissions de GES
- ▶ Villeray, Dollard-des-Ormeaux , Sainte-Thérèse et Brossard sont les sites les plus intéressants pour l'installation de nouveaux entrepôts
- ▶ L'autonomie des vélos cargos est un facteur important
- ▶ Seconde phase du modèle en cours d'implémentation



Source: <https://ici.radio-canada.ca/>

Remerciements

- ▶ Chaire en transformation des transports
- ▶ Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec
- ▶ Mickael Brard (Jalon Montréal) et Yves Sagnières (COOP Carbone):
Données de livraisons de courrier à Montréal sur une période d'un an
- ▶ Pr Walter Rei (UQAM) – Conseils sur la résolution (seconde phase)

COOP CARBONE



Références

- ▶ Crainic, Teodor Gabriel, Nicoletta Ricciardi, et Giovanni Storchi. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(2):119–137, 2004.
- ▶ Crainic, Teodor Gabriel, Michel Gendreau, et Jean Yves Potvin. Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(6):541–557, 2009.
- ▶ Crainic, Teodor et Benoit Montreuil. Physical Internet Enabled Hyperconnected City Logistics. In *Transportation Research Procedia*, volume 12, pages 383–398. Elsevier B.V., 2016.
- ▶ Eiichi Taniguchi, Russell G. Thompson, et Tadashi Yamada. 2014, Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125:4–14
- ▶ Gerardin, Bernard, Danièle Patier, Jean-Louis Routhier, et Erwan Segalou. PROGRAMME NATIONAL " MARCHANDISES EN VILLE " Diagnostic du transport de marchandises dans une agglomération, Document technique n°1 Avril 2000 MELT-DRAST. Technical report.
- ▶ Holguin-Veras, José, Cara Wang, Michael Browne, Stacey Darville Hodge, et Jeffrey Wojtowicz. The New York City Off-hour Delivery Project: 9 Lessons for City Logistics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125:36–48, 3 2014.
- ▶ Viu-Roig, Marta, Eduard J. Alvarez-Palau. 2020, The Impact of E-Commerce-Related Last-Mile Logistics on Cities: A systematic Literature Review. *Sustainability*, Vol 12(16) 6492.
- ▶ [Purolator Greens Fleet With Launch of Fully Electric Curbside-Delivery Trucks in Vancouver | T-Net News \(bctechnology.com\)](#) (consulté en mai 2021)
- ▶ <https://ici.radio-canada.ca/dossier/> (Consulté en Septembre 2019)
- ▶ [IEA: https://webstore.iea.org/](https://webstore.iea.org/) (Consulté en Septembre 2020)



Merci!



Source: <https://www.transportroutier.ca/>

francois.sarrazin.2@umontreal.ca

