

EPITA APP ING 1

# Rapport de recherche sur le dénégement de Montréal



ERO GROUPE 01

- BOUHEDDOU Rayann
- DUPAIGNE Corentin
- GUINIOT-ALLOU Corentin
- MONTAGNAC Paul
- PAGIS Esteban

27 juin 2025

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Données et périmètre d'étude</b>	<b>3</b>
2.1	Collecte et préparation des données . . . . .	3
2.2	Optimisation des itinéraires . . . . .	3
2.3	Coût et performance de déneigement . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Hypothèses et choix de modélisation</b>	<b>4</b>
3.1	Hypothèses relatives à la mission drone . . . . .	4
3.2	Hypothèses relatives à la mission déneigeuse . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Choix de modélisation et comparaison des scénarios</b>	<b>5</b>
4.1	Solutions retenues et indicateurs de performance . . . . .	5
4.2	Comparaison des scénarios . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Les limites du modèle</b>	<b>6</b>

# 1 Introduction

Dans ce rapport, nous présentons une approche de la gestion de déneigement de Montréal. Nous avons modélisé deux missions distinctes, un survol par drone et une tournée de déneigeuse, sous forme de graphe. Nous avons appliqué le problème du postier chinois dirigé pour générer des itinéraires couvrant chaque tronçon au moins une fois. L'ensemble de la solution a été entièrement développé en Python, rendu flexible et reproductible pour planifier efficacement les opérations de surveillance et de déneigement.

## 2 Données et périmètre d'étude

### 2.1 Collecte et préparation des données

Nous avons d'abord extrait le réseau routier de Montréal pour tenir compte du sens de circulation. Chaque tronçon possède un niveau de neige simulé, compris entre 0 cm et 30 cm, afin de tester différents scénarios d'enneigement sans recourir à une base de données météorologique externe. Pour délimiter précisément notre zone d'étude, nous avons récupéré les graphes projetés des cinq arrondissements (Outremont, Verdun, Anjou, Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles et Plateau-Mont-Royal), puis fusionné ces sous-ensembles en un unique graphe global.

### 2.2 Optimisation des itinéraires

Notre objectif étant de couvrir chaque rue exactement une fois, nous avons orienté notre choix algorithmique vers le problème du postier chinois dirigé. Après avoir vérifié la forte connexité du graphe, nous avons procédé à l'équilibrage des flux entrants et sortants sur chaque nœud, en ajoutant ponctuellement des liaisons factices pour rendre le réseau eulérien. Le circuit optimal ainsi obtenu couvre l'ensemble des tronçons, tout en respectant la répartition spatiale de la neige et les contraintes réelles de circulation. Enfin, des visualisations cartographiques ont permis de superposer le tracé et l'intensité de l'enneigement sur un fond OpenStreetMap, facilitant l'analyse et la présentation des résultats.

### 2.3 Coût et performance de déneigement

La municipalité met à notre disposition un jeu de paramètres tarifaires détaillant les coûts liés à l'utilisation du Super Drone et des déneigeuses. Ces données serviront de base aux calculs d'optimisation pour chacune des deux missions (survol et déneigement) :

TABLE 2.1 – Paramètres de coût et de performance des moyens de déneigement

	<b>Super Drone</b>	<b>Véhicule Type I</b>	<b>Véhicule Type II</b>
Coût fixe (€/jour)	100	500	800
Coût kilométrique (€/km)	0,01	1,10	1,30
Coût horaire (premières 8 h) (€/h)	–	1,10	1,30
Coût horaire (au-delà de 8 h) (€/h)	–	1,30	1,50
Vitesse moyenne (km/h)	–	10	20

## 3 Hypothèses et choix de modélisation

### 3.1 Hypothèses relatives à la mission drone

Nous avons volontairement simplifié la simulation de vol en considérant que le drone bénéficie d’une autonomie illimitée et d’une vitesse constante, indépendamment de la charge embarquée ou du profil du terrain. Les phases de décollage et d’atterrissage ne sont pas modélisées, tout comme les durées de stabilisation ou de changement de cap. Les effets du vent, des rafales et des conditions météorologiques sont entièrement ignorés, de même que la présence d’obstacles imprévus (lignes électriques, grues, avifaune) ou les restrictions temporaires d’espace aérien. Nous supposons également une précision parfaite du positionnement GPS, sans dérive ni perte de signal, et une altitude de vol fixe sans tenir compte des variations réglementaires ou d’altimétrie. Par ailleurs, nous négligeons toute latence de communication entre la station de contrôle et l’appareil, et considérons la Terre comme localement plane pour les calculs de distance. Ces hypothèses visent à réduire la complexité algorithmique tout en garantissant une couverture systématique du réseau routier.

### 3.2 Hypothèses relatives à la mission déneigeuse

Pour les opérations de déneigement, le véhicule est modélisé comme capable de parcourir indéfiniment le circuit sans contraintes de carburant, de maintenance ou de rechargement de sel, et sans perte de performance liée à l’usure mécanique. Nous ne tenons pas compte du trafic, des feux de circulation ni des incidents pouvant ralentir ou interrompre le déplacement, et la profondeur de neige est considérée statique tout au long du parcours, sans accumulation ni fonte. Les pentes, l’adhérence variable et les contraintes légales (horaires de circulation, limite de poids ou de largeur) sont également écartées. Nous postulons une efficacité constante d’enlèvement de neige, indépendante de la vitesse ou de l’épaisseur initiale, et négligeons l’impact du rayon de braquage ou du dégagement des trottoirs. Enfin, la déneigeuse suit parfaitement le réseau orienté issu d’OSM, respectant les sens uniques et les restrictions de virage sans aucune déviation, et les calculs de distance se font dans un référentiel plan local.

## 4 Choix de modélisation et comparaison des scénarios

### 4.1 Solutions retenues et indicateurs de performance

Pour assurer une couverture complète et efficace du réseau routier, nous avons retenu la résolution du problème du postier chinois dirigé (Directed Chinese Postman Problem) sur un graphe non orienté enrichi des niveaux de neige simulés. Cette approche garantit un circuit fermé parcourant chaque tronçon au moins une fois, tout en respectant les sens de circulation. Les indicateurs principaux retenus pour évaluer la qualité des solutions sont le kilométrage total parcouru, le temps d'exécution estimé (à partir d'une vitesse moyenne théorique), et le coût opérationnel calculé à partir des paramètres fournis par la municipalité (coûts fixes, kilométriques et horaires selon le mode de déplacement).

### 4.2 Comparaison des scénarios

Pour la ville de Montréal, plusieurs configurations ont été évaluées. L'utilisation d'une seule déneigeuse de type I se révèle trop lente (128,2 h) malgré un faible coût (1 929 €), tandis qu'un unique engin de type II réduit considérablement la durée (64,1 h) pour un budget de 2 477,33 €. Le recours à deux véhicules homogènes ( $2 \times$  Type I ou  $2 \times$  Type II) permet d'accélérer encore les opérations, mais au prix d'un surcoût significatif pour les engins de type II (3 277,16 € en 40,6 h).

TABLE 4.1 – Scénarios optimaux de déneigement pour Montréal

Configuration	Temps (h)	Coût total (€)
1 $\times$ Type I	128,2	1 929,00
2 $\times$ Type I	81,3	2 428,98
1 $\times$ Type II	64,1	2 477,33
2 $\times$ Type II	40,6	3 277,16
1 $\times$ Type I + 1 $\times$ Type II	46,9	2 886,32

Au regard des besoins de rapidité et de maîtrise budgétaire de la municipalité, le scénario 1  $\times$  Type I + 1  $\times$  Type II apparaît comme le meilleur compromis, offrant une durée d'intervention réduite (46,9 h) pour un coût maîtrisé (2 886,32 €).

## 5 Les limites du modèle

Notre implémentation introduit plusieurs sources d'inexactitude qui peuvent affecter la fiabilité des résultats. D'abord, la conversion des données OpenStreetMap en graphe NetworkX entraîne une simplification géométrique : les tronçons sont représentés par des arêtes droites entre nœuds, alors que dans la réalité les routes comportent souvent des courbes et des épingles à cheveux, ce qui peut sous-estimer la distance effective parcourue. De plus, la projection des coordonnées implique un arrondi à quelques centièmes de mètre, susceptible d'introduire des écarts cumulés sur de longues tournées. La génération aléatoire des niveaux de neige, bien qu'utilisée pour tester la robustesse, ne reflète pas la variabilité spatiale réelle des chutes et du compactage, ce qui limite l'authenticité des performances simulées. Par ailleurs, la résolution du problème du postier chinois fait appel à des routines de plus-court-chemin (Dijkstra) dont les implémentations Python pures peuvent, sur de très gros graphes, introduire des erreurs d'arrondi numérique dans les poids cumulés, modifiant parfois légèrement l'ordre des arcs sélectionnés.