



# La génétique

au service des réseaux de transport collectifs

Pierre-Léo Bourbonnais, Polytechnique  
Éric Martel-Poliquin, MTMDET  
Catherine Morency, Polytechnique  
Martin Trépanier, Polytechnique



## AVERTISSEMENT

*La présente recherche a été réalisée à la demande du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports et a été financée par la Direction de la modélisation des systèmes de transports, Direction générale de la planification, coordination et évolution des services.*

*Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de cette présentation. Les points de vue exprimés dans cette présentation n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.*

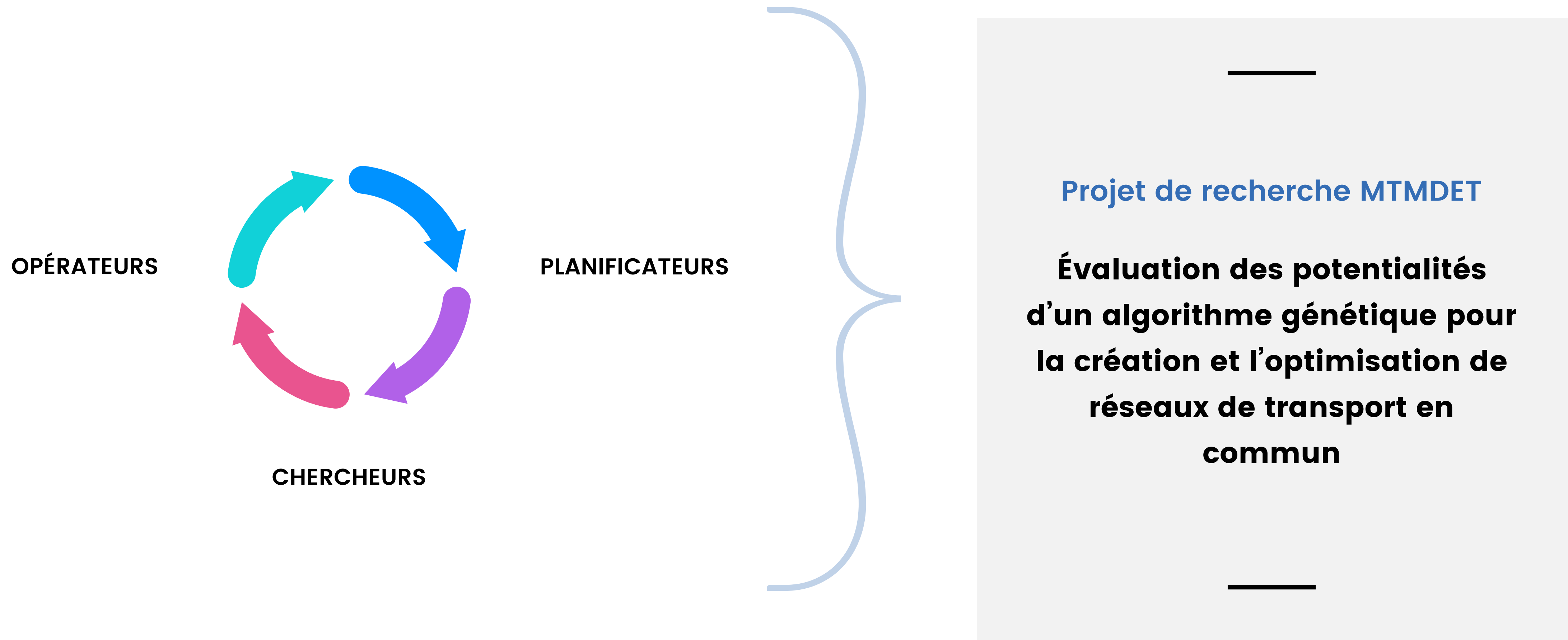


---

# Plan de la présentation

- Mise en contexte
- Algorithmes évolutionnistes et algorithmes génétiques: définitions
- État de l'art
- Villes étudiées et préparation des données
- Paramètres de simulation
- Expérimentations et résultats
- Perspectives après-projet

# Mise en contexte





# Algorithmes évolutionnistes

- S'inspirent de la **théorie de l'évolution**
- Les **gènes** forment un ou des **chromosomes** qui déterminent les **caractéristiques** d'un **individu**
- La **population** comprend l'ensemble des individus
- Chaque **génération** comprend une population
- Les individus vont **s'adapter au problème de manière à optimiser la solution**, sur plusieurs générations
- Les individus transmettent leur matériel génétique à leurs descendants par **reproduction** et leurs comportements par la **culture**
- Les individus **les mieux adaptés ont une plus grande chance de se reproduire**: leurs caractéristiques influenceront davantage les générations suivantes

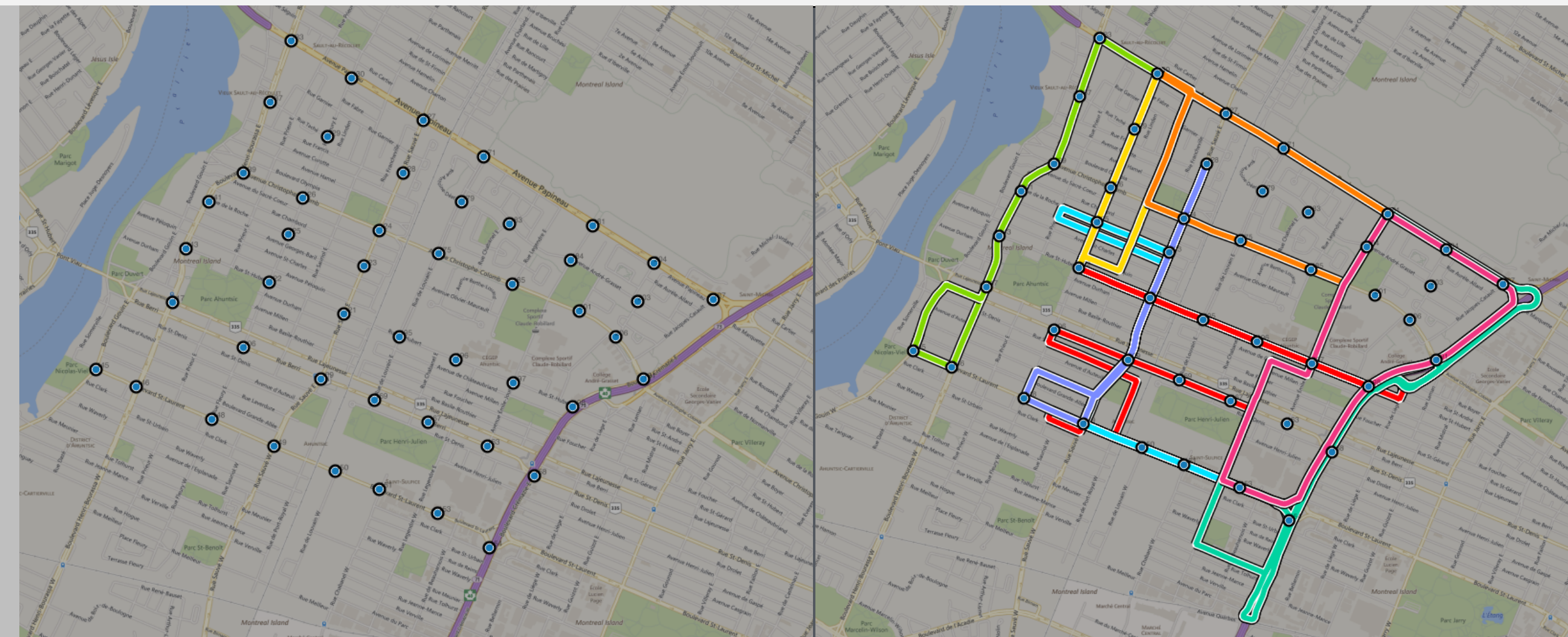
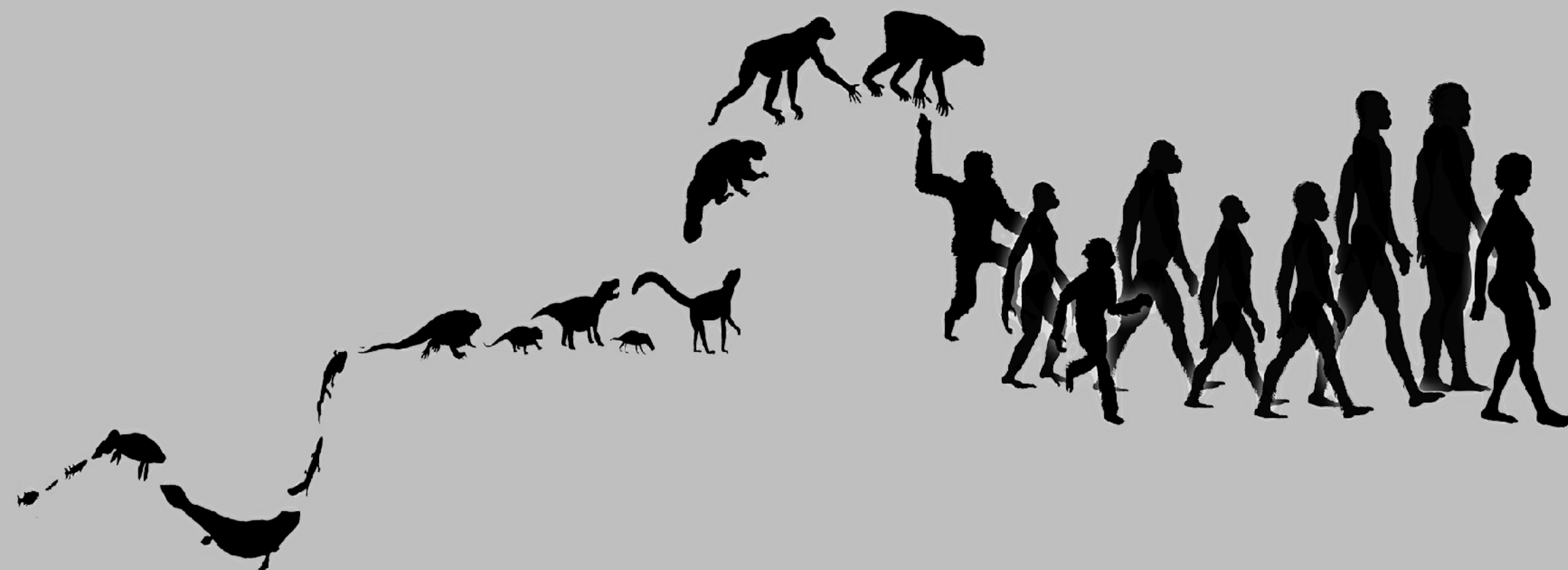


# GÉNÉTIQUE DANS LA NATURE

- ÉTAPE 1 Apparition de la vie
- ÉTAPE 2 Sélection naturelle des individus les mieux adaptés
- ÉTAPE 3 Reproduction et partage de gènes
- Rencontre de deux parents
  - Entrecroisement des gènes (crossover)
  - Mutations aléatoires
- ÉTAPE 4 Nouvelle génération

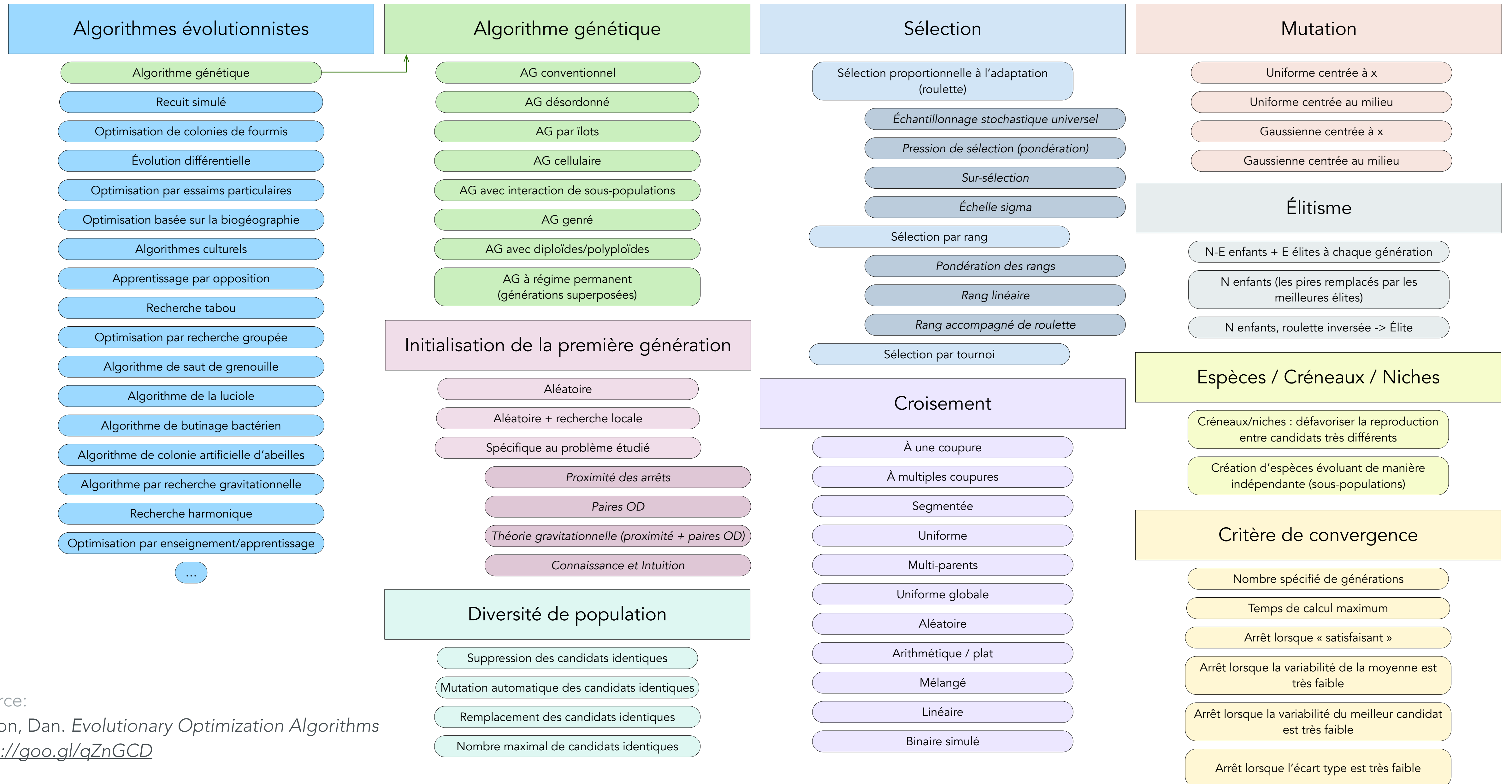
# ALGORITHME GÉNÉTIQUE D'OPTIMISATION DE RÉSEAUX DE TRANSPORT COLLECTIF

- ÉTAPE 1 Créer une population de réseaux générés aléatoirement
- ÉTAPE 2 Sélection des meilleurs réseaux en utilisant une fonction d'optimisation
- ÉTAPE 3 Entreprendre la reproduction et le partage de lignes
- Sélectionner deux parents dans les réseaux survivants
  - Entrecroiser les lignes des réseaux parents (crossover)
  - Effectuer des mutations aléatoires (ajout, enlèvement de lignes et/ou d'arrêts)
- ÉTAPE 4 Remplacer la population par la nouvelle génération





# Algorithmes évolutionnistes





# État de l'art

- Plusieurs expérimentations depuis le début des années 2000
- Aspects théoriques bien maîtrisés
- Peu d'expérimentations avec de vraies données
- La plupart utilisent des matrices OD fictives ou simplement générées à partir de la densité de population
- Les temps de parcours entre les arrêts sont souvent très approximatifs et les parcours ne tiennent pas compte des restrictions de virage et des feux de circulation
- Les accès à pied aux arrêts ne se font que sur les segments de rue et sont imprécis



# Algorithmes génétiques

Définition des concepts principaux

- **Candidat ou individu** • L'objet à optimiser  
*Dans notre cas: réseau comprenant plusieurs lignes ou ligne comprenant plusieurs arrêts*
- **Gènes** • Paramètres permettant de définir un candidat  
*Le gène représente habituellement la présence ou non d'une ligne dans un réseau ou d'un arrêt dans une ligne*
- **Chromosome** • Ensemble des gènes d'un candidat
- **Population** • Ensemble des candidats à évaluer pour une génération donnée
- **Génération** • Itération de calcul dans l'algorithme génétique (simulation)  
*Chaque génération s'accompagne d'une population*

# Algorithmes génétiques

Définition des concepts principaux (suite)

- **Sélection** • L'étape de sélection consiste à choisir les candidats qui pourront se reproduire et se croiser pour créer la génération suivante  
*L'opération est répétée un certain nombre de fois afin d'obtenir assez de candidats pour participer à la création de la population de la génération suivante*
- **Croisement** • Étape permettant de mettre en commun le matériel génétique des candidats parents ayant survécu lors de la sélection afin de créer de nouveaux candidats enfants de la génération suivante
- **Mutation** • Processus de modification aléatoire d'un gène d'un candidat  
*Les mutations permettent d'étendre l'espace de recherche et réduisent la probabilité de converger vers un minimum local*  
*La probabilité de mutation est habituellement faible (moins de 1%) afin de conserver un équilibre adéquat entre l'évolution génétique et les mutations*



# Villes étudiées

Sherbrooke • Saguenay • Trois-Rivières

Préparation des données

- **Utilisation d'un calculateur de chemin précis et rapide**  
*OpenSourceRoutingMachine (OSRM) avec méthode de map matching*
- **Réseaux routiers et piétonniers OpenStreetMap corrigés, nettoyés et complétés pour les trois villes**  
*Inclusion des feux de circulation et des restrictions + pénalités aux feux et virages*  
*Inclusion des sentiers, rues piétonnes et ruelles pour les accès à pied*
- **Données GTFS des réseaux existants**
- **Données de demande provenant des enquêtes Origine-Destination les plus récentes**

# Effet de la précision du calcul de chemins

Trajets calculés pour les bus en passant par plusieurs arrêts

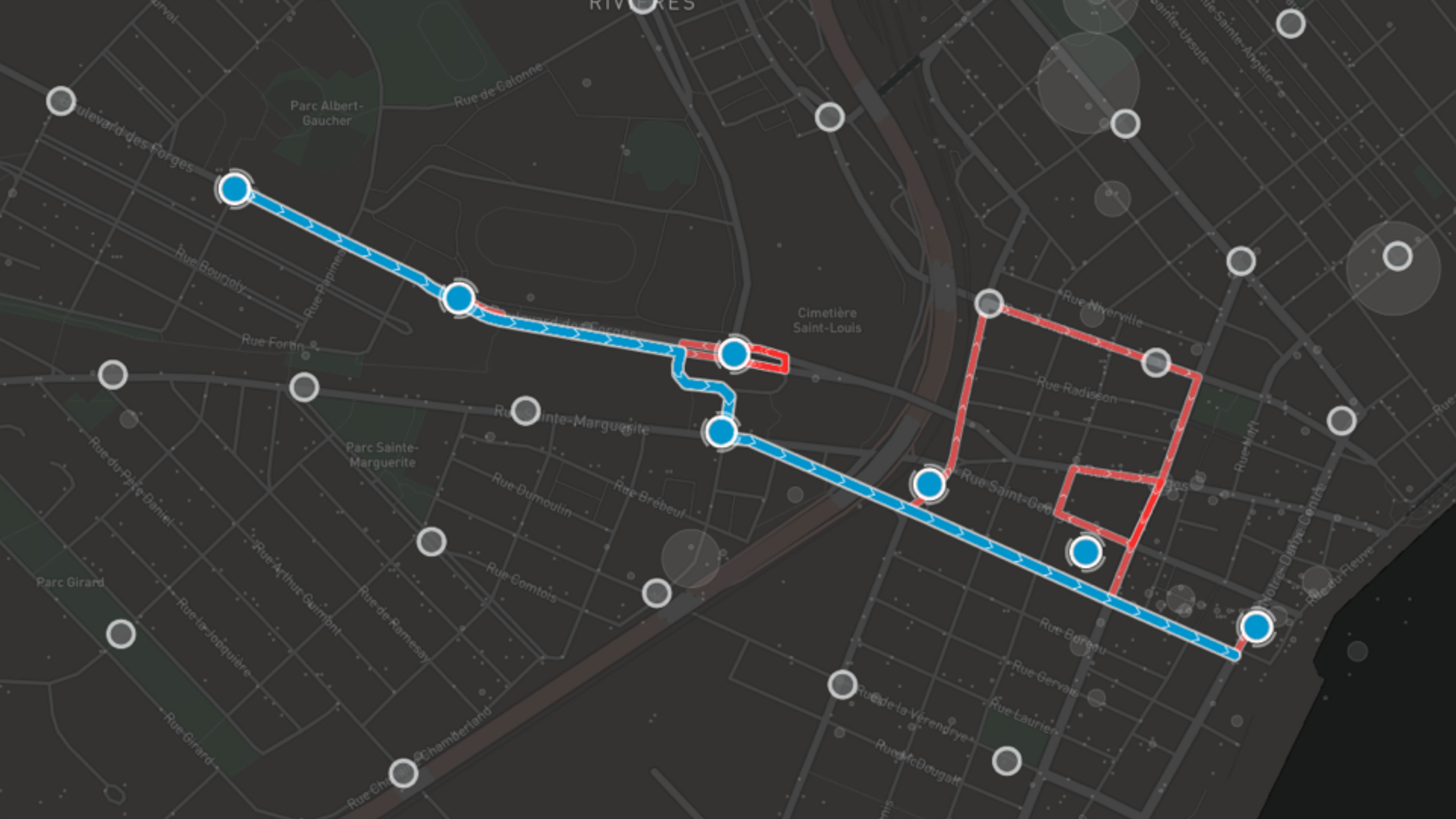
- **Problématique**

- Les calculateurs de chemin (*OSRM, Google* et autres) cherchent toujours le segment de rue le plus près de chaque arrêt le long du parcours, peu importe les sens uniques ou les virages nécessaires
- Les temps de parcours avec plusieurs arrêts s'accompagnent alors de nombreux détours **(en rouge)**

- **Solution**

- Utiliser un algorithme de *map matching* avec rayon de 50 m autour de chaque arrêt **(en bleu)**
- Exemple: un parcours prend **2,3 fois moins de temps** avec cet algorithme pour desservir les mêmes arrêts dans le même ordre





# Réduction du nombre d'arrêts

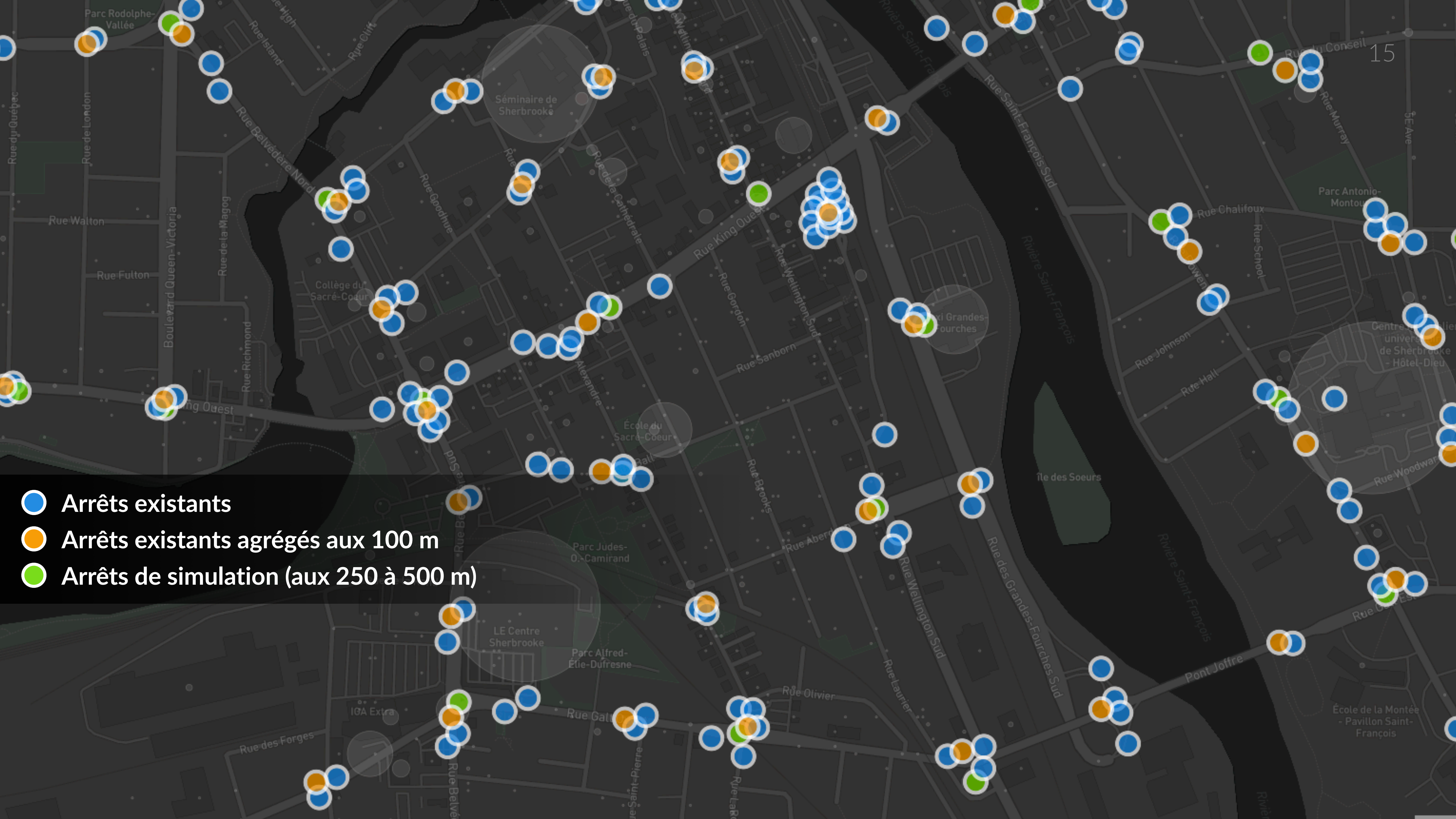
- **Problématique**

- Plus le nombre total d'arrêts est élevé, plus les temps de calcul sont longs

- **Solution**

- Agréger les arrêts aux 100 m
- Sélectionner un ensemble réduit d'arrêts (distance entre arrêts entre 250 et 500 m)
- On obtient entre 250 et 400 arrêts selon la ville étudiée





- Arrêts existants
- Arrêts existants agrégés aux 100 m
- Arrêts de simulation (aux 250 à 500 m)



# Génération d'un ensemble de lignes de départ

- **Problématique**

- Le nombre de lignes possible est infini, ce qui rend les calculs plus longs

- **Solution**

- Créer un indicateur appelé **gravité** associé à chaque arrêt (proportionnelle au nombre d'origines et de destinations à proximité et inversement proportionnelle à la distance de ces lieux)
- Générer un ensemble de **lignes réalistes et plausibles** (tortuosité maximale, temps de parcours et nombre d'arrêts minimal et maximal, etc.) à partir de cet indicateur et des temps de parcours entre chaque arrêt
- **Inclure les lignes existantes** dans l'ensemble de départ



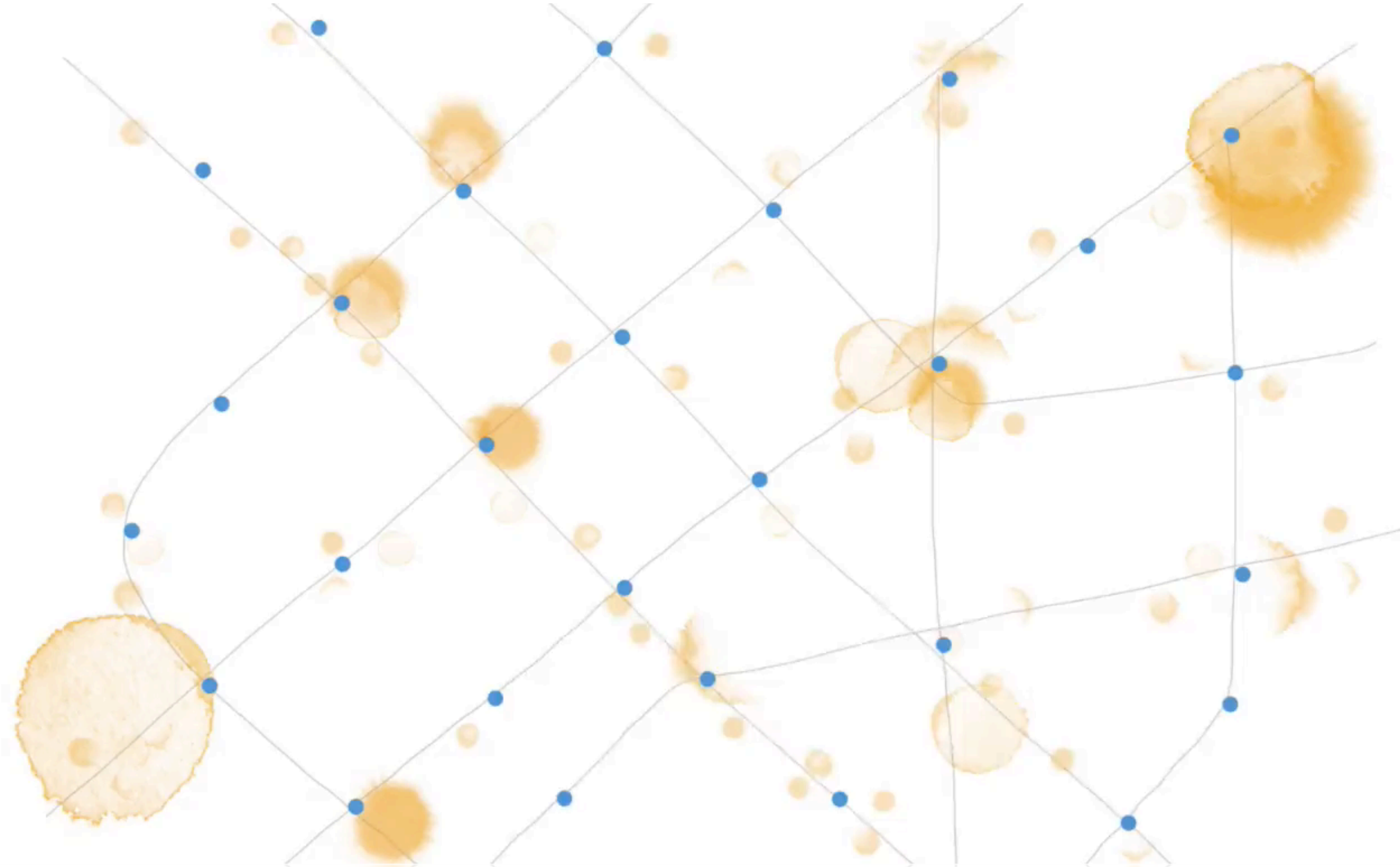
---

# Démonstration de l'interface

Gravité des arrêts

# Génération d'un ensemble de lignes de départ

*Théorie gravitationnelle*





# Objectif de l'algorithme génétique

- **Réduire les coûts d'opération et réduire les temps de parcours des usagers**
  - On convertit les temps de parcours des usagers en coût horaire (10\$/déplacement-h)
  - On convertit les coût d'opération en coût horaire (120\$/véhicule-h)
  - **On veut minimiser la somme des deux**
  - Dans nos expérimentations, on a **fixé les coûts d'opération** un utilisant le **nombre de véhicules en service** dans les réseaux existants
  - L'algorithme permet de **sélectionner les ensembles de lignes qui minimisent le coût usager** avec le même nombre de véhicules

# Expérimentations

Algorithme génétique

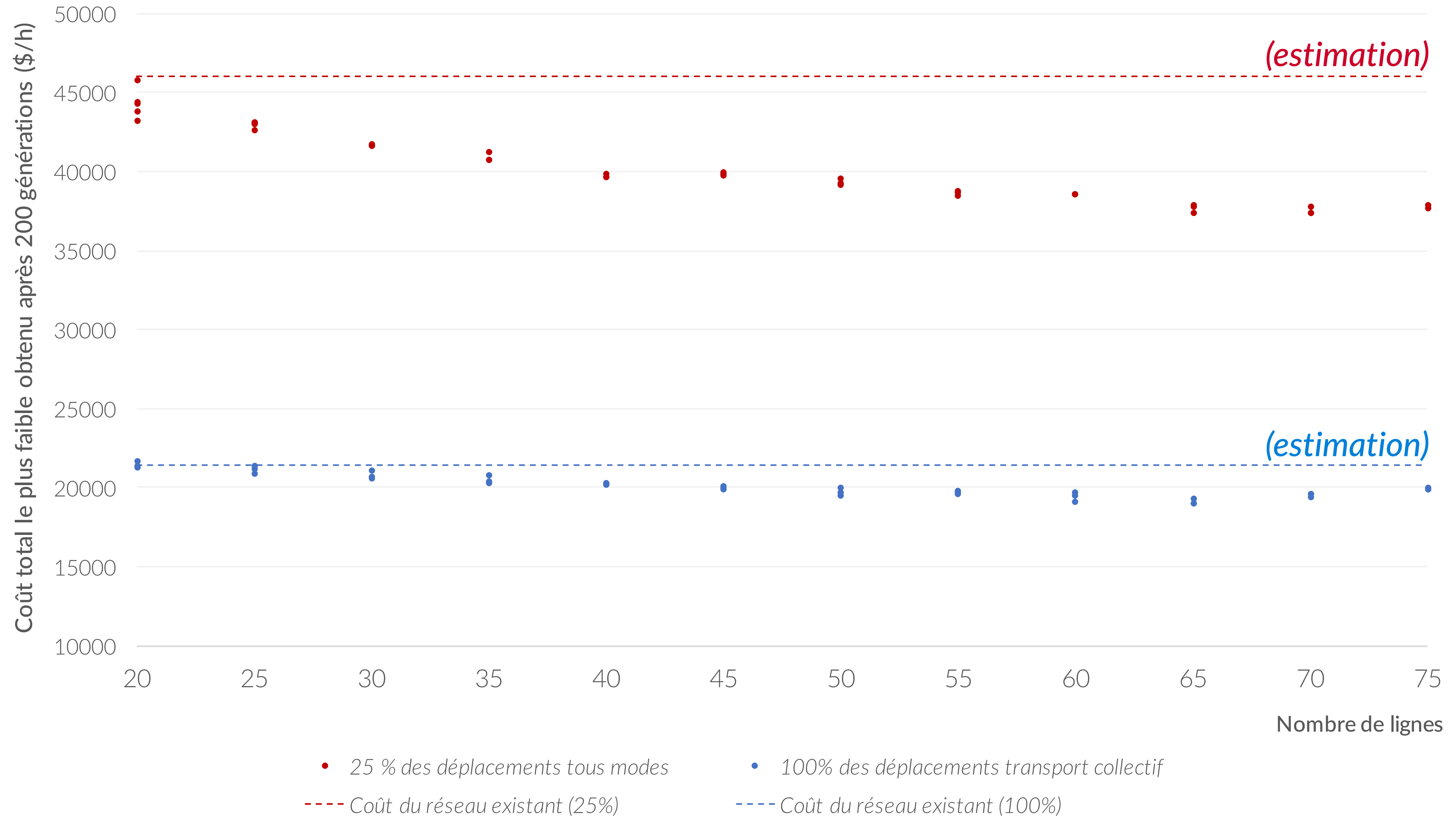
- 2 volets
  - **25%** de tous les déplacements de **6:00 à 9:00** (tous modes déclarés)
  - **100%** des déplacements déclarés transport collectif de **6:00 à 9:00**
- Paramètres
  - Coût opération: **120\$/véhicule-h** (*hypothèses*)
  - Coût usager: **10\$/h** (à pied ou en transport collectif) • tarif fixé à **30\$** si aucun service disponible (*hypothèses*)
  - Nombre de véhicules disponibles: **Sherbrooke 76** | **Saguenay 60** | **Trois-Rivières 42**
  - Temps minimum d'attente avant embarquement: **5 minutes**
  - Nombre maximal de transferts: **2**
  - Temps maximal d'accès aux arrêts et de transfert à la marche: **10 minutes**
  - Temps de marche maximal si déplacement effectué à pied: **17 minutes**



# Résultats

Sherbrooke

Coût total en fonction du nombre de lignes dans le réseau



# Résultats

## Sherbrooke

- 25% de tous les déplacements de 6:00 à 9:00 (tous modes déclarés)
  - Coût existant: **46 047\$/h** (usagers: 36 927\$/h | opérateur: 9 120\$/h) (*estimation*)
  - Coût optimisé: **36 786\$/h** (usagers: 27 666\$/h | opérateur: 9 120\$/h) • 65 lignes **-20%**
- 100% des déplacements déclarés transport collectif de 6:00 à 9:00
  - Coût existant: **21 447\$/h** (usagers: 12 327\$/h | opérateur: 9 120\$/h) (*estimation*)
  - Coût optimisé: **18 776\$/h** (usagers: 9 656\$/h | opérateur: 9 120\$/h) • 65 lignes **-12%**
- Temps de calcul approximatif: 3h • 300 générations



# Résultats

## Saguenay

- 25% de tous les déplacements de 6:00 à 9:00 (tous modes déclarés)
  - Coût existant: **65 647\$/h** (usagers: 58 447\$/h | opérateur: 7 200\$/h) (*estimation*)
  - Coût optimisé: **52 919\$/h** (usagers: 45 719\$/h | opérateur: 7 200\$/h) • 60 lignes **-19%**
- 100% des déplacements déclarés transport collectif de 6:00 à 9:00
  - Coût existant: **15 183\$/h** (usagers: 7 983\$/h | opérateur: 7 200\$/h) (*estimation*)
  - Coût optimisé: **12 756\$/h** (usagers: 5 556\$/h | opérateur: 7 200\$/h) • 50 lignes **-16%**
- Temps de calcul approximatif: 3h • 300 générations

# Résultats

## Trois-Rivières

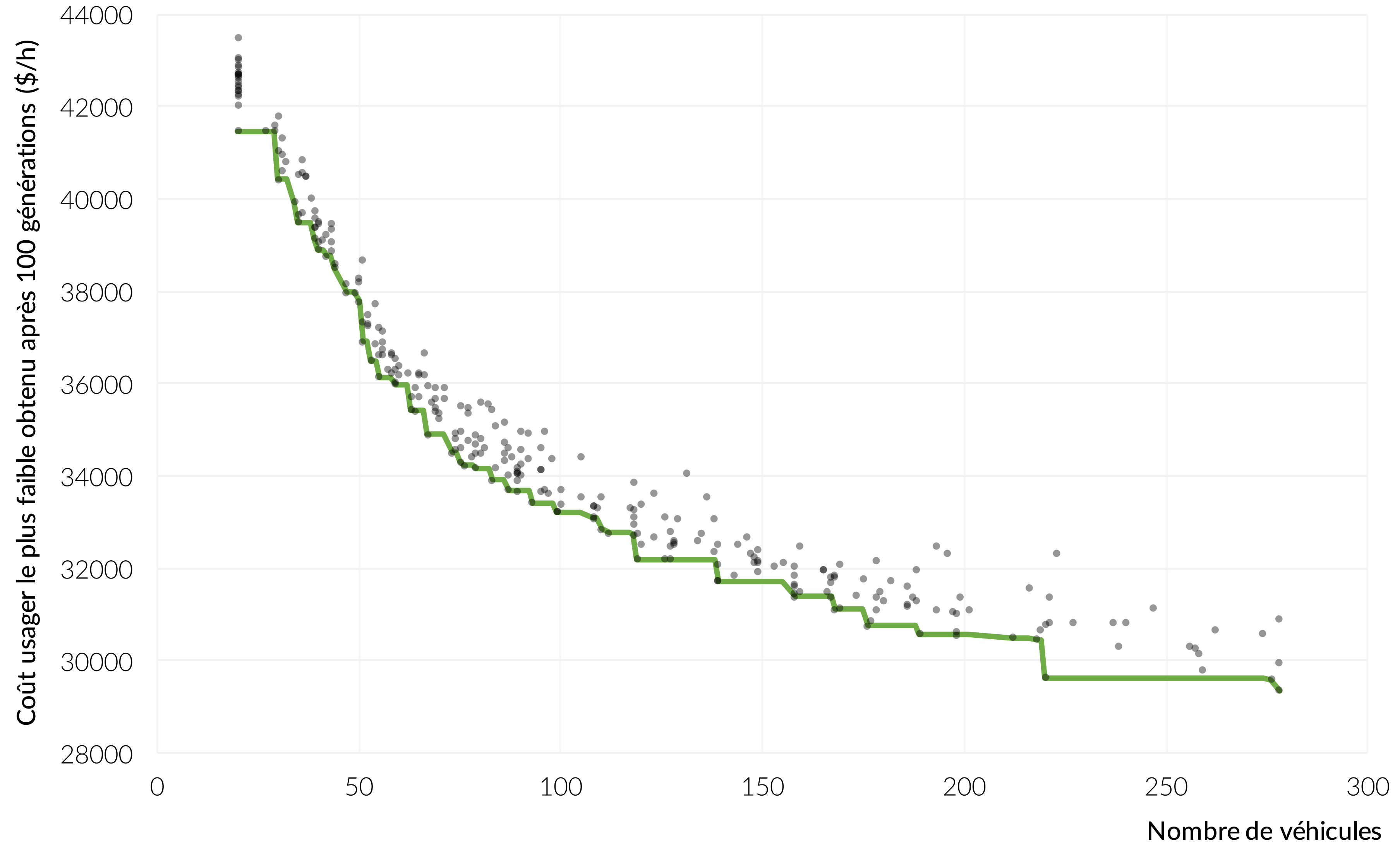
- 25% de tous les déplacements de 6:00 à 9:00 (tous modes déclarés)
  - Coût existant: **45 466\$/h** (usagers: 40 426\$/h | opérateur: 5 040\$/h) (*estimation*)
  - Coût optimisé: **40 298\$/h** (usagers: 35 258\$/h | opérateur: 5 040\$/h) • 40 lignes **-11%**
- 100% des déplacements déclarés transport collectif de 6:00 à 9:00
  - Coût existant: **10 879\$/h** (usagers: 5 839\$/h | opérateur: 5 040\$/h) (*estimation*)
  - Coût optimisé: **9 366\$/h** (usagers: 4 326\$/h | opérateur: 5 040\$/h) • 32 lignes **-14%**
- Temps de calcul approximatif: 2h • 300 générations



# Résultats

Trois-Rivières

Coût usager en fonction du nombre de véhicules en service



# Lignes intelligentes

Algorithme évolutionniste développé pour ce projet

## Fonctionnement

- Chaque ligne est mise en compétition et tente de **maximiser son profit**
- Chromosome avec gènes représentant les **comportements** de chaque ligne
- Algorithme génétique pour **partager les comportements entre parents et enfants**
- **Les lignes intelligentes évoluent** à chaque étape d'évolution

*Ajout et/ou enlèvement d'arrêts*

*Optimisation du type de véhicule*

*(bus articulé, bus, midibus, minibus, minivan, voiture, etc.)*

*Ajout ou enlèvement de véhicules*

- **Utilisé seul ou en collaboration** avec l'algorithme génétique



# Optimisation du type de véhicule

Algorithme génétique + Lignes intelligentes

**Voiture (4 places, 50\$/h)**

**Minivan (6 places, 60\$/h)**

**Grande minivan (12 places, 70\$/h)**

**Minibus (20 places, 85\$/h)**

**Midibus (50 places • 20 sièges, 100\$/h)**

**Bus régulier (80 places • 30 sièges, 120\$/h)**

**Bus à deux étages (100 places • 70 sièges, 145\$/h)**

**Bus articulé (110 places • 50 places, 150\$/h)**

**Bus Bi-articulé (180 places • 70 sièges, 180\$/h)**

***Réduction supplémentaire de 4% des coûts pour Sherbrooke***

---

# Démonstration de l'interface

Lignes intelligentes



# Perspectives après-projet

- Les algorithmes génétiques et évolutionnistes représentent un **énorme potentiel**
- Critères d'efficacité et de réalisme
  - **Données précises et complètes** (réseaux, routiers, piétonniers, données de demande, etc.)
  - **Calculateur flexible** et algorithme de *map matching*
- Prochaines étapes
  - **Étudier des villes de plus grande taille**
  - **Projets pilotes** auprès des sociétés de transport • **Avis aux intéressés!**

---

# Questions, commentaires, suggestions ?



# Merci!



AVERTISSEMENT

**MTMDET**

**Société de transport de Sherbrooke  
Ville de Sherbrooke**

**Société de transport du Saguenay  
Ville de Saguenay**

**Société de transport de Trois-Rivières  
Ville de Trois-Rivières  
Julien Faucher**

*La présente recherche a été réalisée à la demande du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports et a été financée par la Direction de la modélisation des systèmes de transports, Direction générale de la planification, coordination et évolution des services.*

*Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de cette présentation. Les points de vue exprimés dans cette présentation n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.*