

# Restauration stratégique des chemins forestiers abandonnés

**Maximiser la capture du carbone avec  
une continuité spatiale dans les paysages  
boréaux**

---

**Alejandro Vega  
Osvaldo Valeria – François Girard**

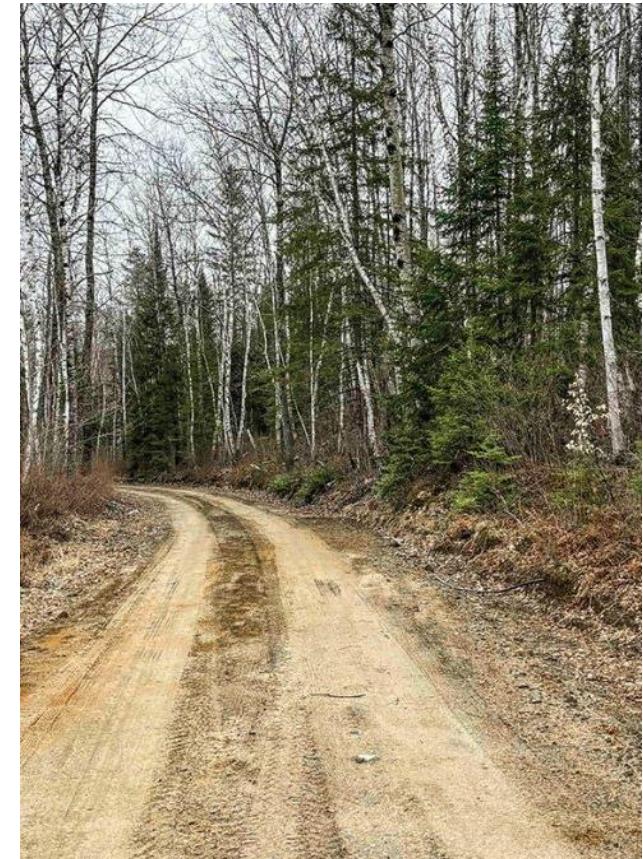
**Septembre 2025**



# Contexte

---

- **Pourquoi c'est important**
  - Les chemins forestiers occupent **plus de 450 000 hectares** au Québec, dont une grande partie est sous-utilisée ou abandonnée.
  - Cette zone pourrait être **convertie en zones de reboisement**, contribuant ainsi de manière significative à la séquestration du carbone.
- Cependant, la planification actuelle de la restauration est :
  - Fragmenté
  - Largement **opportuniste** et non stratégique
  - Rarement optimisée sur le plan spatial ou financier



# Comment planifier la restauration des chemins forestiers abandonnés ?

---

## Objectifs

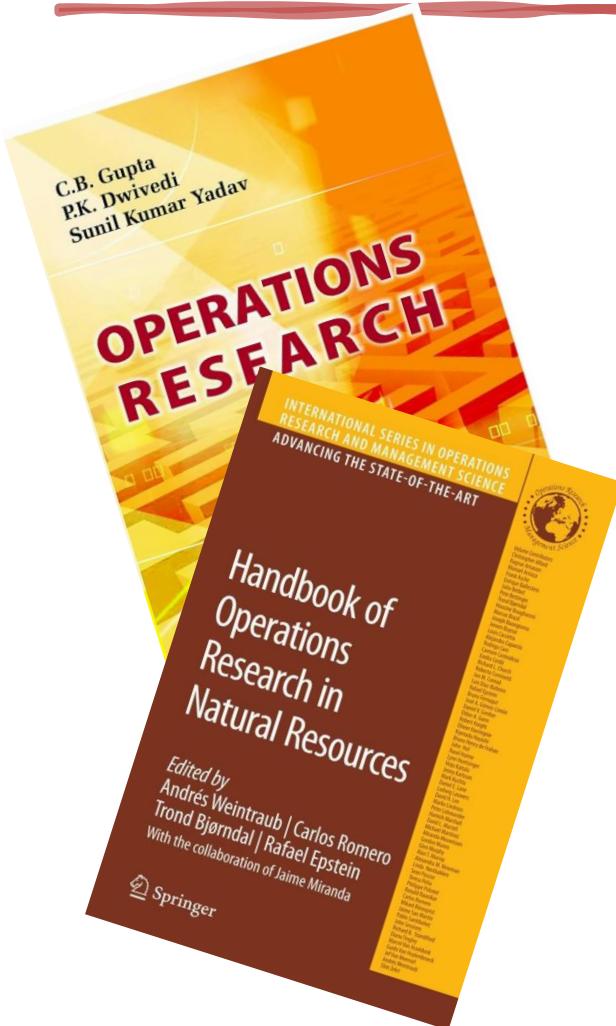
- Développer un modèle d'optimisation spatiale visant à maximiser la **séquestration de carbone** par la désactivation stratégique et continue des chemins forestiers.
- Garantir la faisabilité opérationnelle tout en préservant la continuité spatiale.

## Notre opportunité

- Appuyer l'approche sur une caractérisation écologique fine des sites.
- Hiérarchiser les actions de restauration selon leur potentiel de **séquestration de carbone** et de connectivité spatiale.
- Intégrer explicitement les contraintes financières et logistiques.

# La recherche opérationnelle: De la réalité au modèle d'optimisation

---



---

**Objectif :** transformer un besoin concret en un modèle d'optimisation opérationnel

---

Le modèle permet de tester différents scénarios et de comparer leurs résultats pour guider la planification

---

Exemples : récolte, transport, plantations, lutte contre les feux de forêt.

---

**Dans notre cas :** désactivation des chemins forestiers sous contraintes écologiques et financières.

# Application à notre cas

---

Intégration du réseau de chemins forestiers et des contraintes dans un modèle MILP (**Programmation linéaire en nombres entiers mixtes**)

---

Résolution avec **Gurobi** → permet d'**identifier les meilleurs choix possibles**

---

En respectant les limites **spatiales, temporelles et logistiques** du territoire

# Une opportunité écologique

---

---

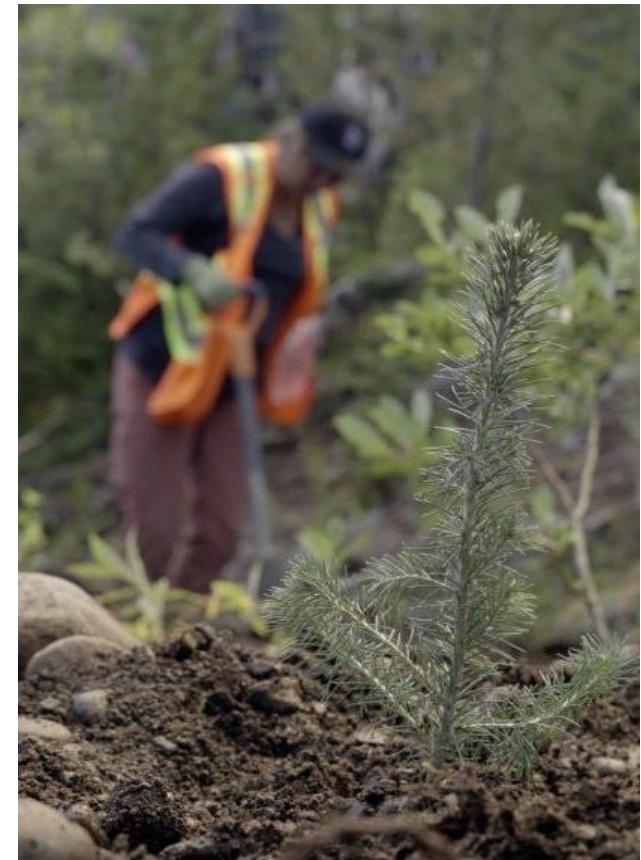
Séquestration additionnelle de carbone : la restauration augmente la séquestration du carbone dans le bois commercial.

---

Continuité spatiale du paysage : améliore la connectivité et la biodiversité

---

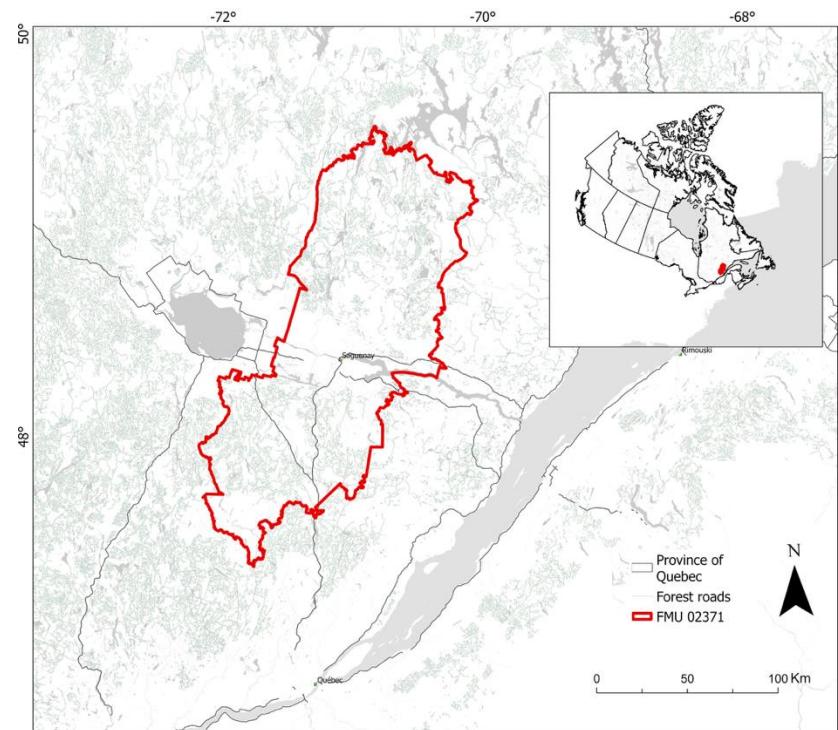
Moins de fragmentation : réduit les impacts négatifs du réseau routier



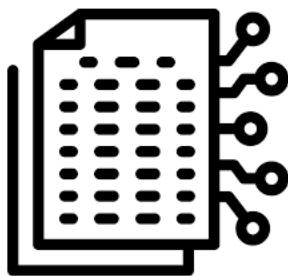
# Case d'étude

---

- Zone d'étude: Unité d'aménagement forestier **UA02371 (Saguenay)**
- **22000 km** chemins forestières



# Données de base



---

Inventaires des chemins forestiers  
(AQréseau+)

---

Sélection de **chemins à faible standard**, où la dégradation peut avoir des impacts négatifs plus rapides

---

Réduction du réseau analysé à **8 500 km** de routes (Class 5, HI, NC + IN)

---

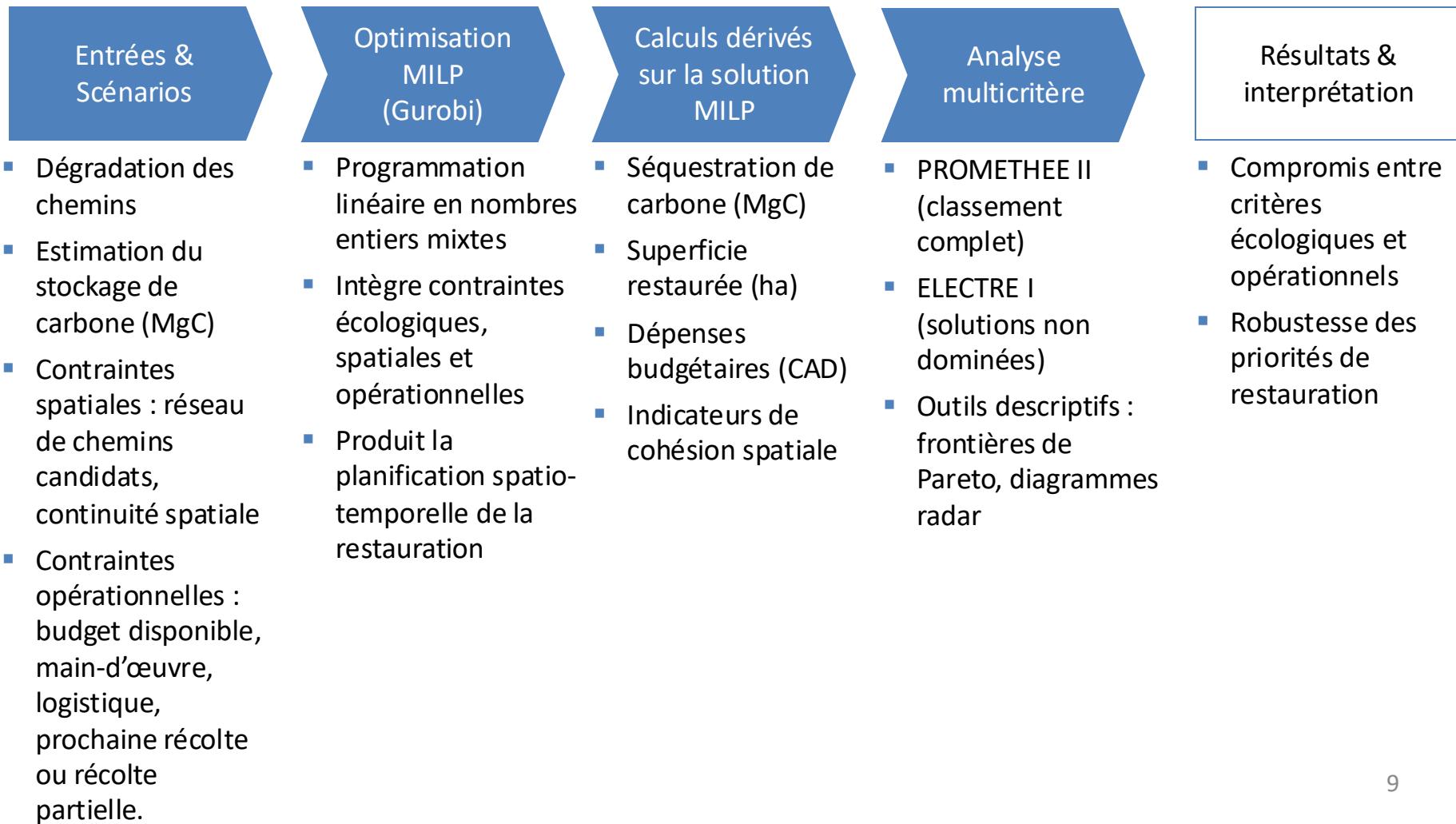
Indice de dégradation des segments et dynamique de **recolonisation végétale**

---

CBM-CFS3 -> RF Model (épinette noire)

# Structure méthodologique

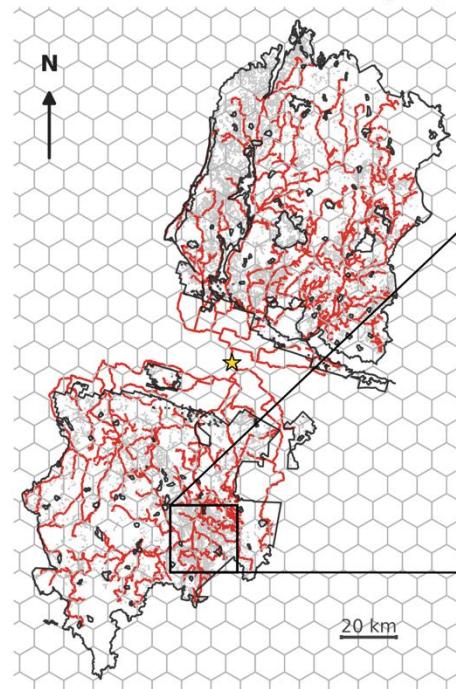
• *Du scénario à l'interprétation des résultats : un processus transparent et reproduitble.*



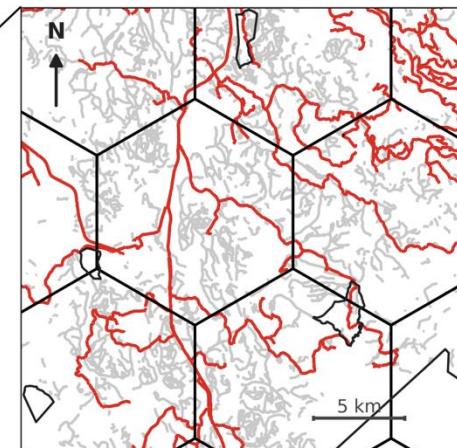
# Structuration spatiale du territoire

Contexte du réseau routier et détail pour la présélection MILP

Panneau A — Aire d'étude (aperçu)



Panneau B — Détail (candidats vs restreints)



Réseau routier candidat

Réseau restreint (communautaire/touristique/forestier)

Unités de planification spatiale (10 000 ha)

Centre logistique

Limite de l'aire d'étude

# Horizon temporel



- Planification sur **25 ans**
- Alignée avec la dynamique des peuplements voisins : chaque segment restauré est planifié jusqu'à la date de récolte du peuplement adjacent (~100 ans de rotation naturelle).

# Stratégies de restauration



---

Deux options retenues pour refléter la réalité opérationnelle.

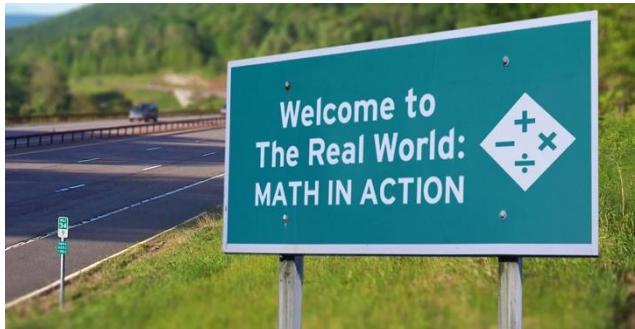
---

Chaque option implique des **coûts et des bénéfices de croissance** différents

---

Permet de tester le modèle dans deux scénarios concrets de planification

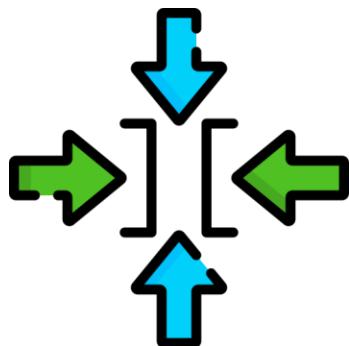
# Du modèle mathématique à l'opérationnel



- Fonction objective qui intègre carbone, coûts et règles spatiales.
- Transformer un problème complexe en un outil de planification concret

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{i,s,t} \cdot A_{i,t} \cdot CPH_{i,s,t} \cdot (1 + \lambda \cdot DEG_{i,t}) \\ & + \gamma \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{t > 0} w_{i,s,t} + \gamma_s \sum_{h \in H} \sum_{t > 0} wsp_{h,t} \\ & - \alpha \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} p_t \cdot z_{h,t} - \beta \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} slack_{h,t} - c \sum_{t \in T} budget\_slack_t \\ & - \mu \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} isolément_{h,t} - \phi_{\text{dist}} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} x_{i,s,t} \cdot DIST_i \end{aligned}$$

# Contraintes opérationnelles



---

**Budget** : annuel et cumulé

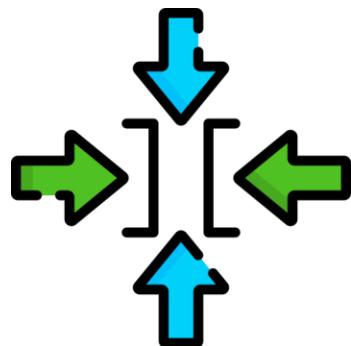
---

**Capacité** : main-d'œuvre et équipements disponibles

---

**Hiérarchie du réseau routier** : restaurer les branches avant les troncs, ordre « de l'amont vers l'aval »

# Contraintes spatiales



---

**Éviter la dispersion** : pas de restaurations isolées ou incohérentes

---

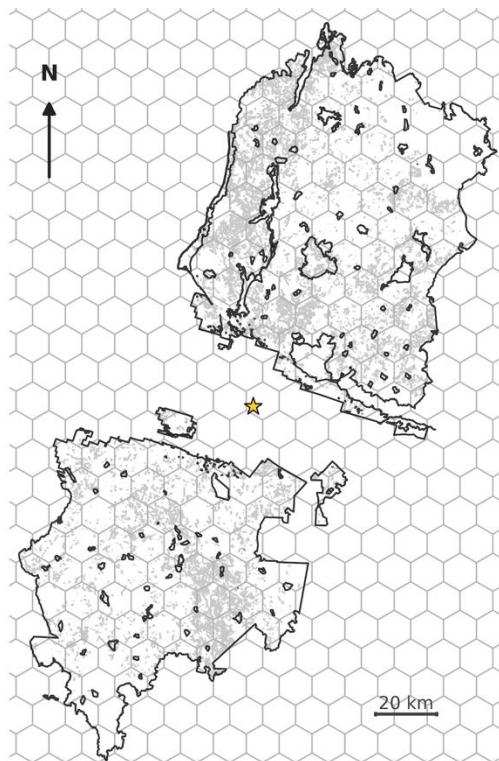
**Cohésion** : concentrer les efforts dans des unités spatiales voisines

---

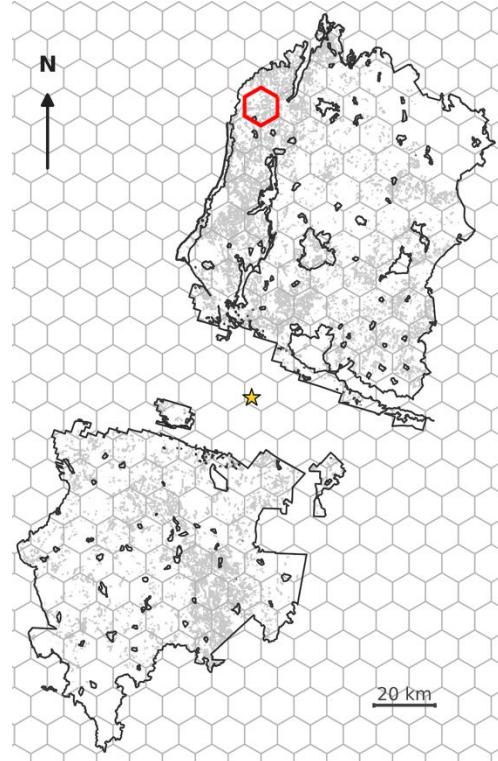
**Continuité** : maintenir les unités déjà actives dans le temps

# Scénarios de priorisation

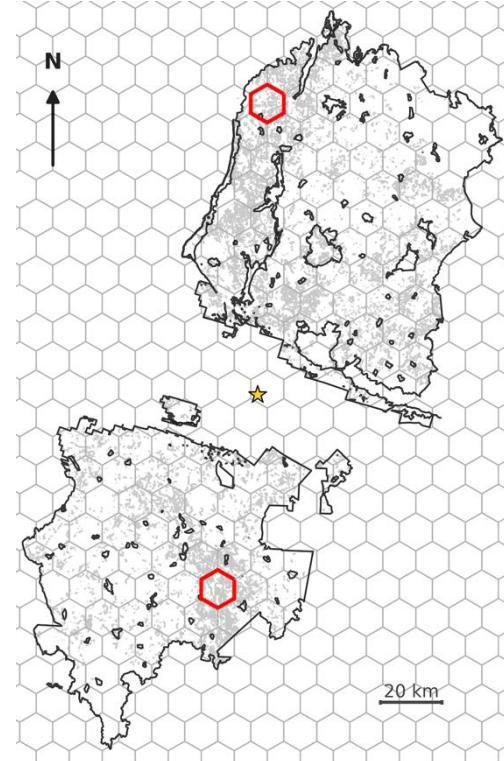
**P0** : sans préférence spatiale (scénario de référence)



**P1** : priorité donnée à une **unité de planification spatiale critique**



**P2** : priorité donnée à **deux unités de planification spatiale opposées**



# Configurations du modèle testées

- 9 configurations représentant des hypothèses différentes sur l'équilibre entre **carbone**, **cohésion spatiale** et **faisabilité opérationnelle**.
- Chaque configuration a été combinée avec 3 priorités spatiales (P0 neutre, P1 équilibrée, P2 cohésive) — soit **27 exécutions au total**.

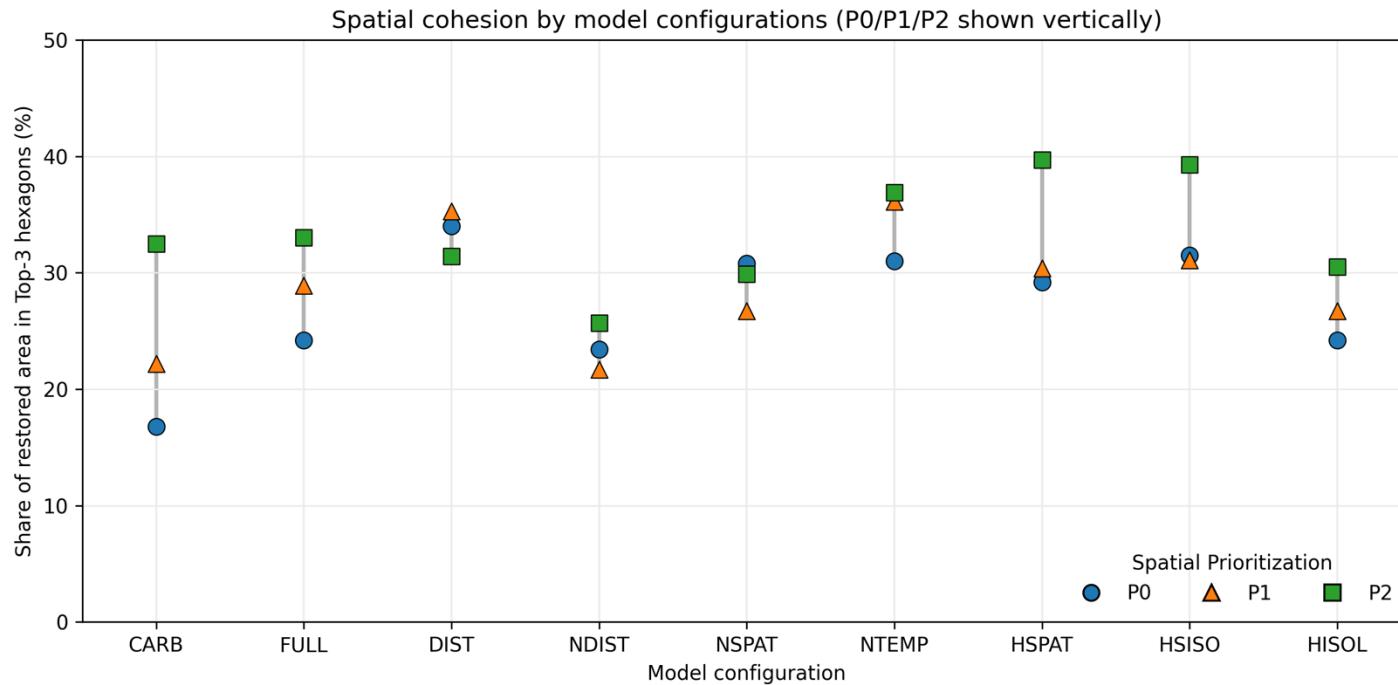
Acronyme	Description courte
CARB	Maximisation du carbone (sans pénalités)
DIST	Forte pénalité distance/transport
FULL	Modèle complet, pénalités modérées
HSISO	Pénalités très fortes (agrégation + isolement)
HISOL	Isolement seulement (sans agrégation)
HSPAT	Agrégation spatiale forte (sans isolement)
NDIST	Sans pénalité de distance
NSPAT	Sans pénalités spatiales
NTEMP	Sans pénalités temporelles

# Résultats clés

---

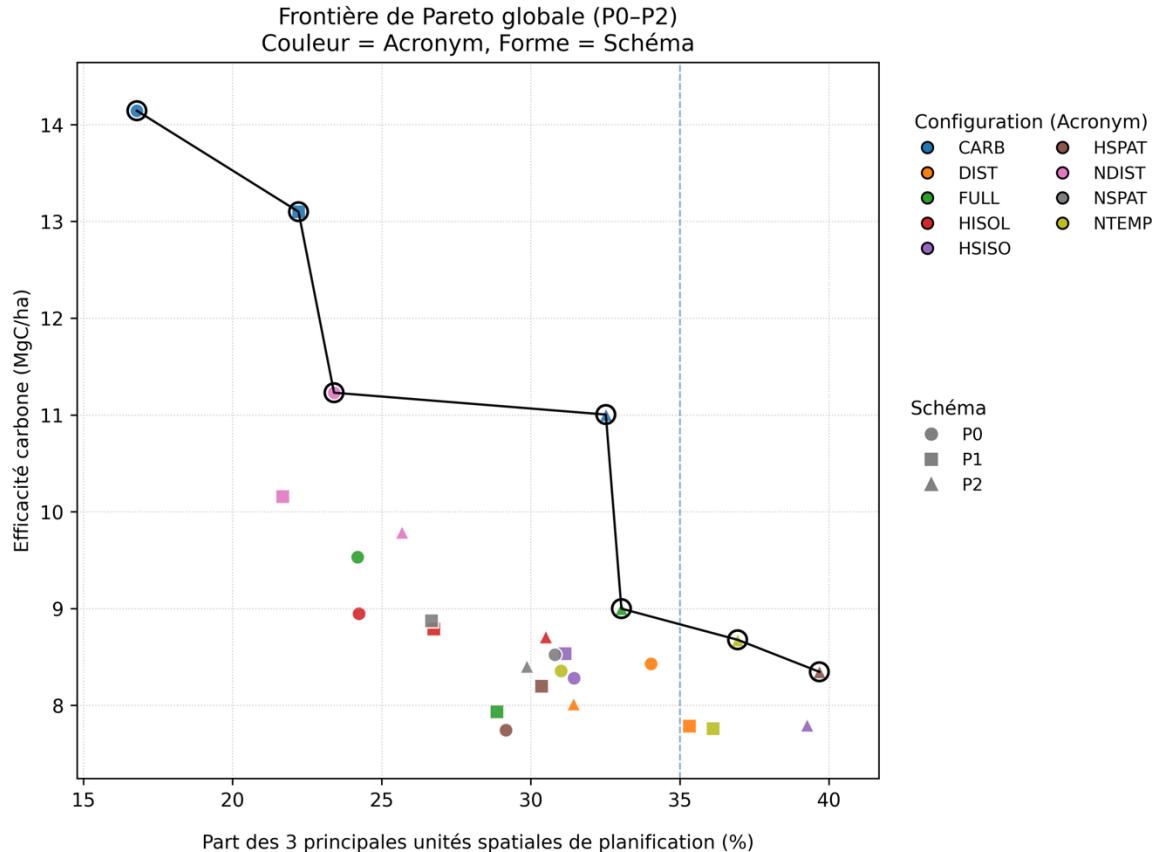
# Résultats globaux par priorité (P0, P1, P2)

- **Share Top 3** : part de la restauration concentrée dans les **3 unités spatiales les plus actives**.
- Le modèle répond bien à la demande de **cohésion spatiale** quand on passe de **P0 → P2**.
- Mais cette cohésion **entre en tension** avec le **gain carbone total** (diminution progressive).



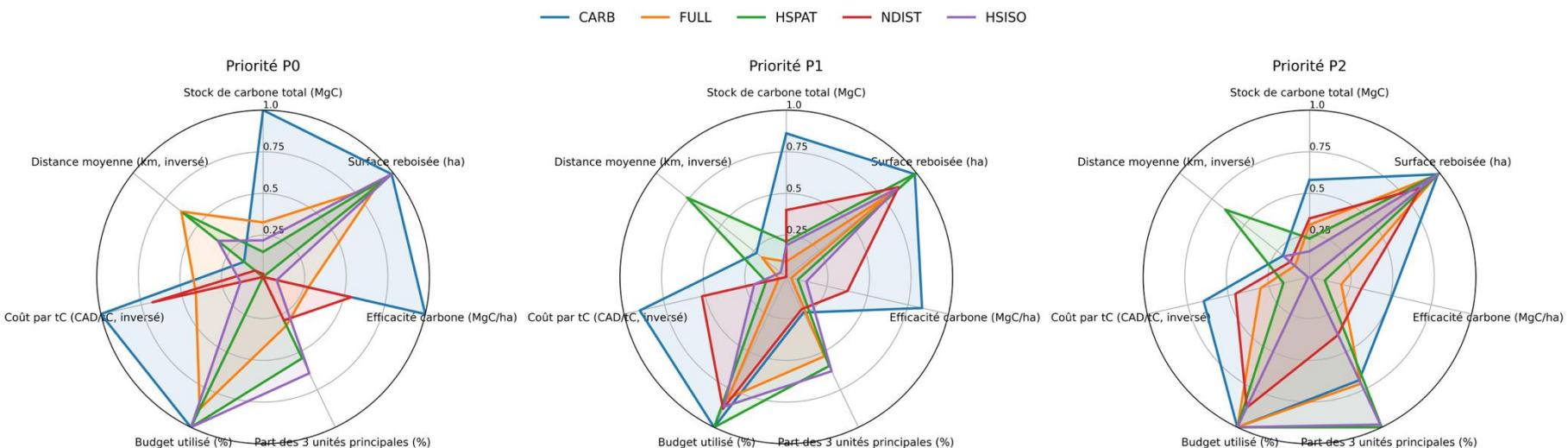
# Résultats globaux par priorité (P0, P1, P2)

- **Share Top 3** : part de la restauration concentrée dans les **3 unités spatiales les plus actives**.
- Le modèle répond bien à la demande de **cohésion spatiale** quand on passe de **P0 → P2**.
- Mais cette cohésion **entre en tension** avec le **gain carbone total** (diminution progressive).



# Comparaison multi-critères (PROMETHEE) + radars

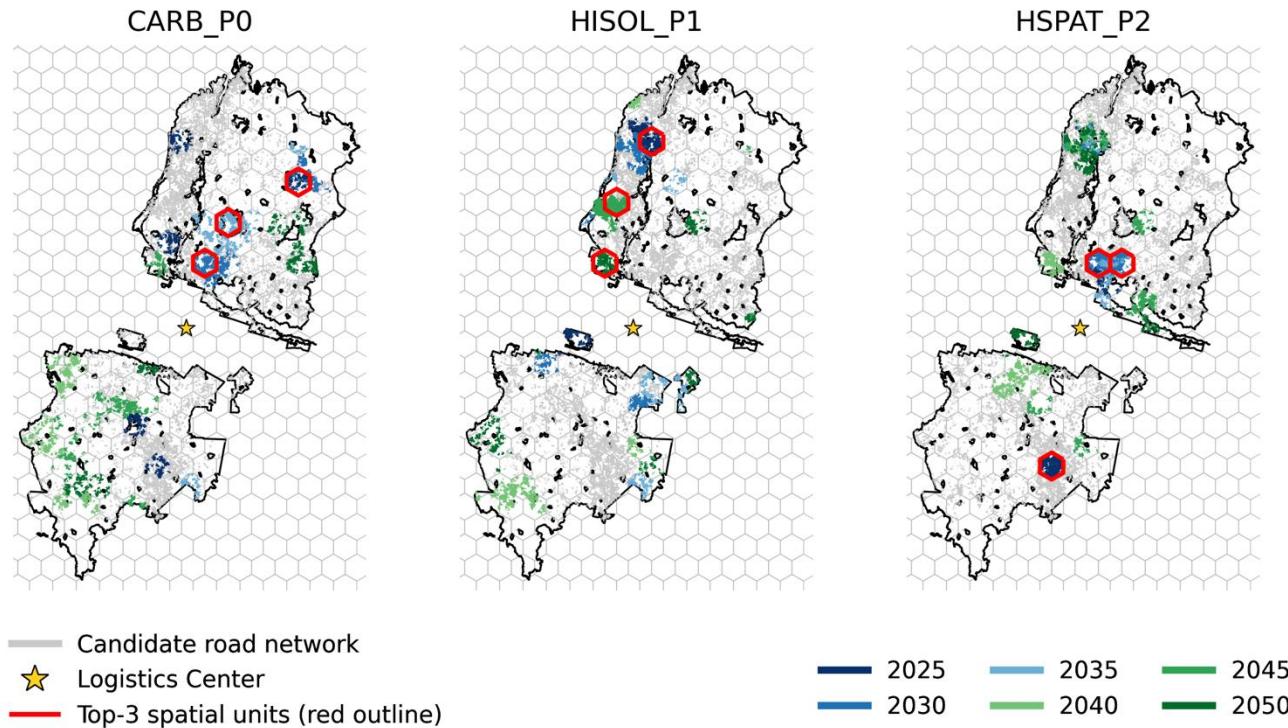
- Classement PROMETHEE: met en balance **carbone, cohésion et contraintes logistiques**.
- Graphiques radar (axes normalisés): montrent clairement les **compromis** entre carbone, coût, distance, agrégation (*Share Top 3*), etc.



# Cartes (scénarios représentatifs — Share Top 3)

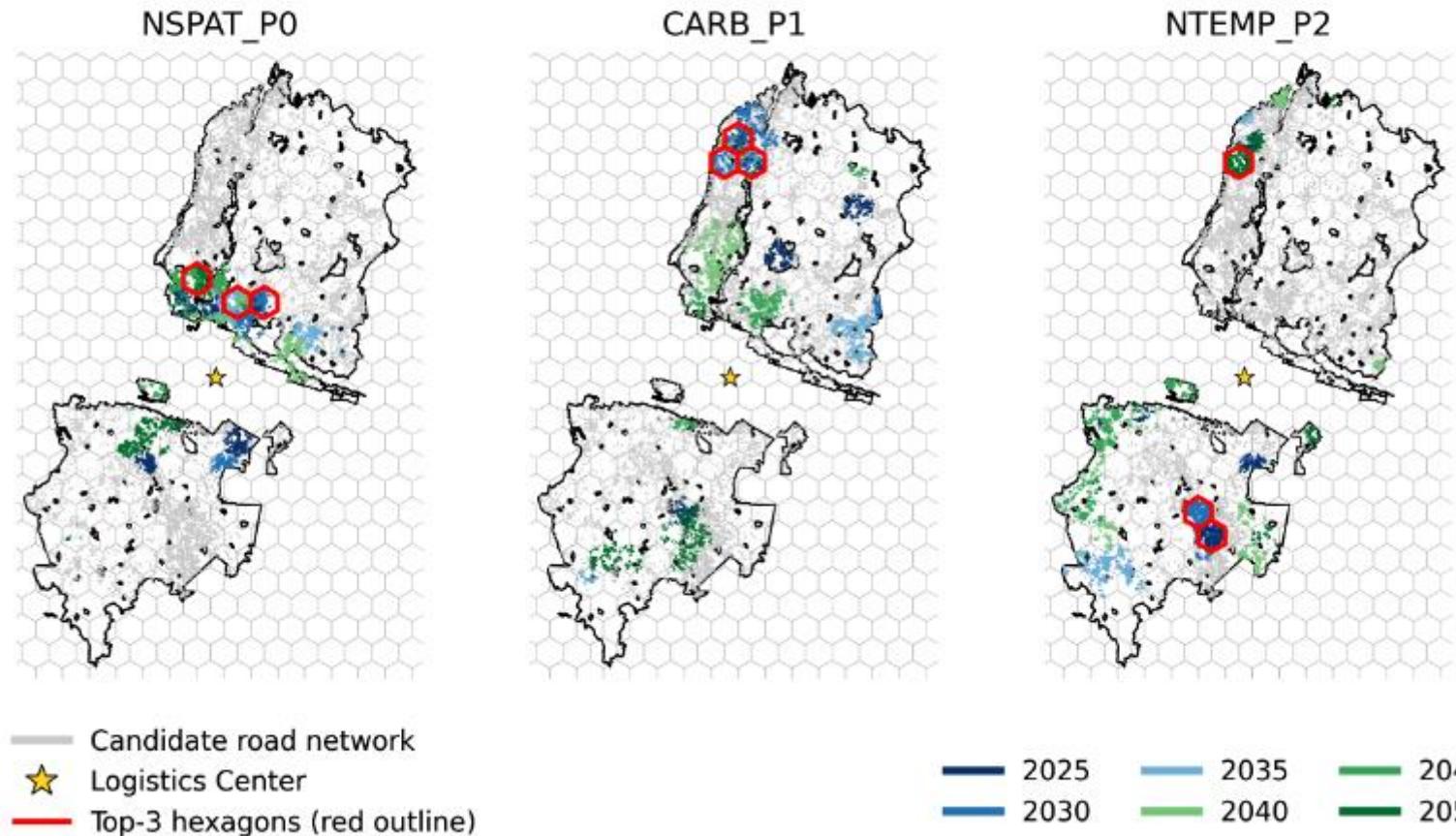
- Déploiement spatio-temporel (2025–2050) des segments restaurés, même emprise et légende.

Spatio-temporal rollout of restored road segments (2025–2050)



# Scénarios représentatifs (classement PROMETHEE)

Spatio-temporal rollout of restored road segments (2025–2050)



# Discussion : résultats et implications écologiques

---

## Résultats principaux

- Cohésion spatiale  $\uparrow \leftrightarrow$  efficacité carbone  $\downarrow$
- Schémas P0–P2 : flexibilité du MILP
- Les décisions de restauration impliquent toujours un compromis (carbone  $\leftrightarrow$  cohésion).

## Interprétation écologique

- Cohésion  $\rightarrow$  continuité et fonctionnalité de l'habitat
- Carbone  $\rightarrow$  efficacité  $\uparrow$  mais dispersion  $\uparrow$
- Compromis carbone–cohésion inévitable (doit être géré)

# Discussion : implications opérationnelles et perspectives

---

## Interprétation opérationnelle

- Priorisation sous contraintes réelles : budget, capacité, calendrier
- Share Top 3 = indicateur transparent de concentration spatiale

## Perspectives

- Intégration possible de modèles prédictifs ou stochastiques
- Considérer les incertitudes liées au changement climatique (p. ex. feux de forêt) et leur interaction avec la restauration des chemins.

# MERCI

---



# Restauration stratégique des chemins forestiers abandonnés

## Maximiser la capture du carbone avec une continuité spatiale dans les paysages boréaux



Alejandro Vega  
Osvaldo Valeria – François Girard

Septembre 2025

