

Restauration stratégique des chemins forestiers abandonnés

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

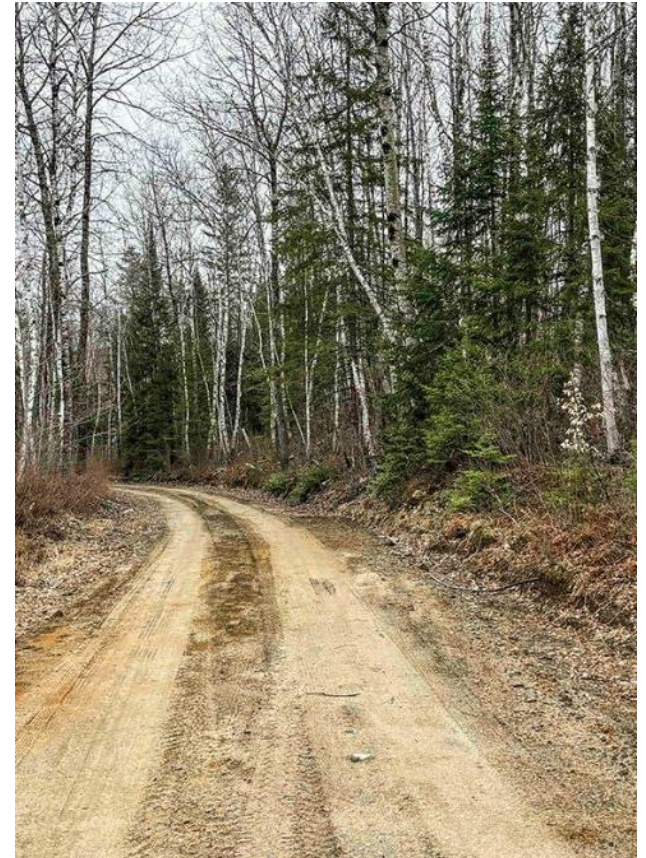
Alejandro Vega
Osvaldo Valeria – François Girard

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.

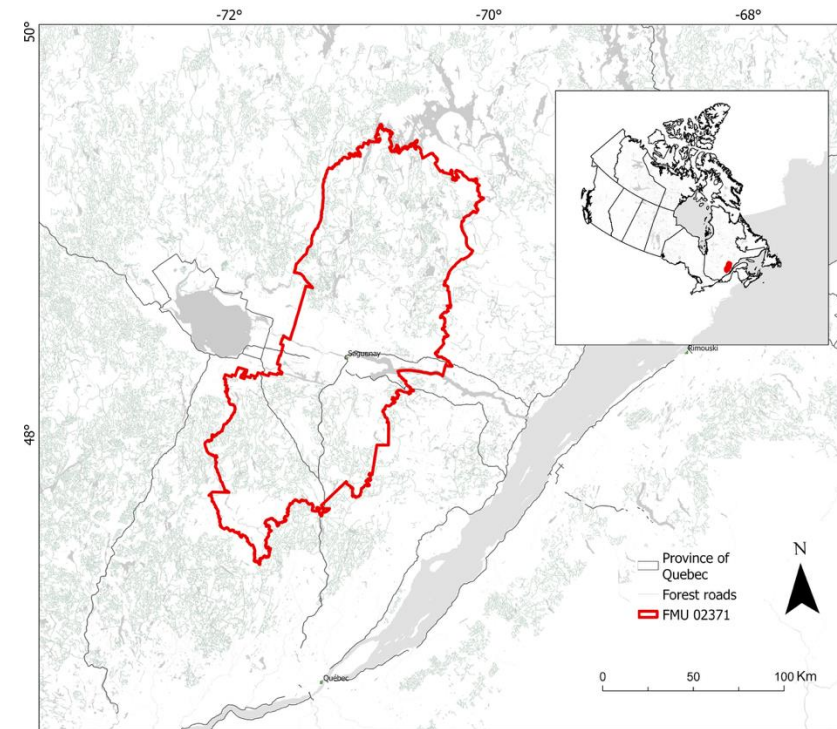
Continuité spatiale du paysage : améliore
la connectivité et la biodiversité

Moins de fragmentation : réduit les
impacts négatifs du réseau routier

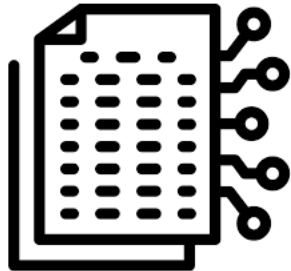


Case d'étude

- 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

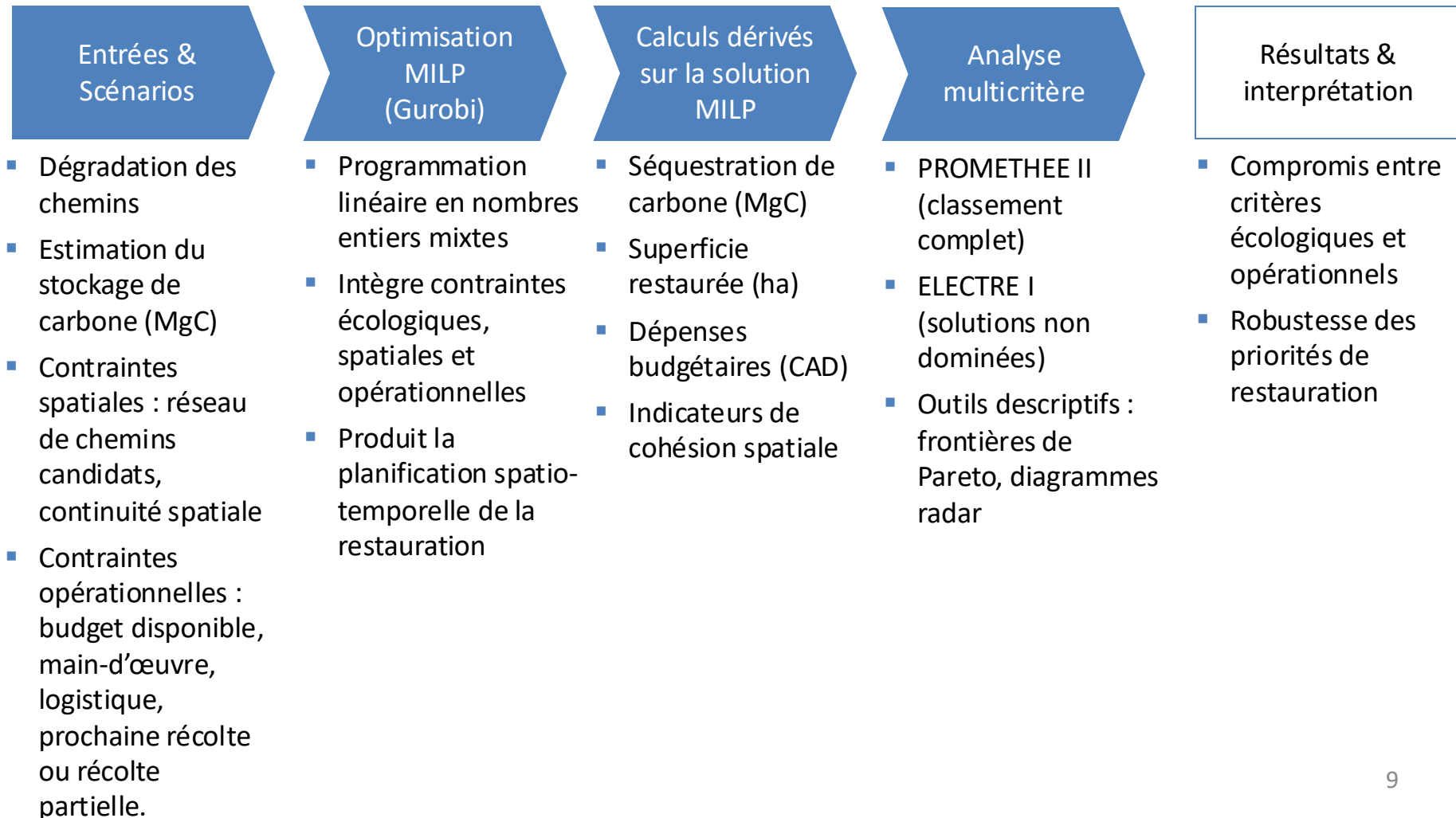
Réduction du réseau analysé à **8 500 km** de
routes (Class 5, HI, NC + IN)

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

CBM-CFS3 -> RF Model (épinette noire)

Structure méthodologique

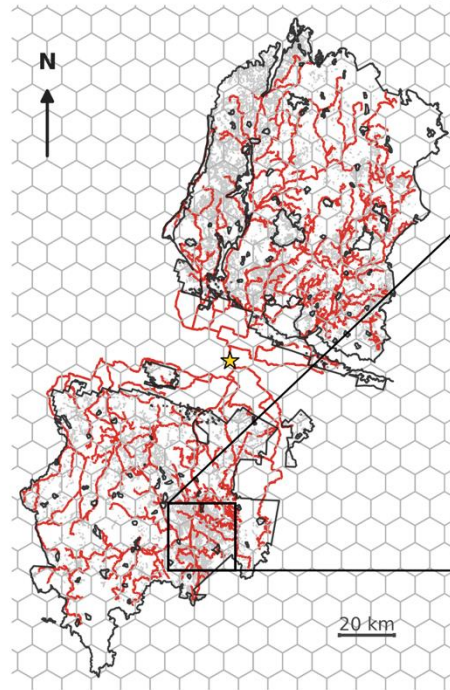
• *Du scénario à l'interprétation des résultats : un processus transparent et reproductible.*



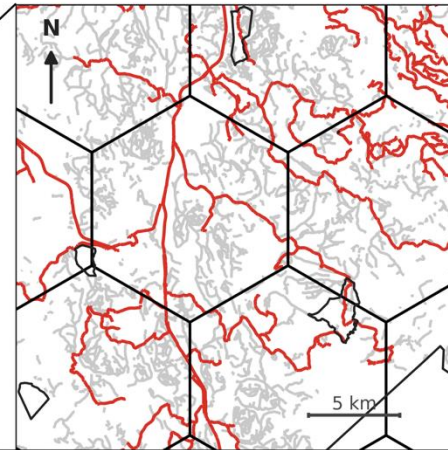
Structuration spatiale du territoire

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.

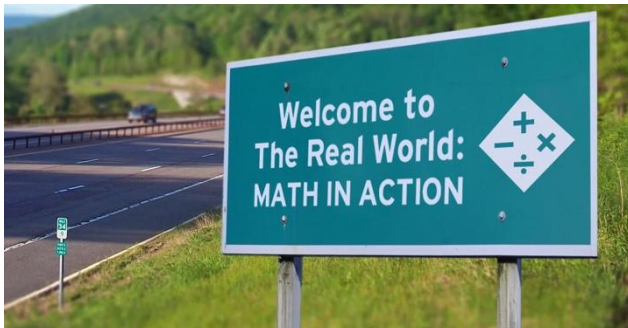
Chaque option implique des **coûts** et des **bénéfices de croissance** différents

Permet de tester le modèle dans deux scénarios concrets de planification

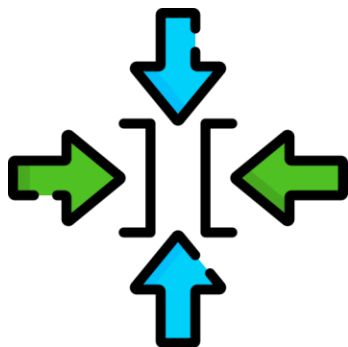
Du modèle mathématique à l'opérationnel

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

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



Contraintes opérationnelles

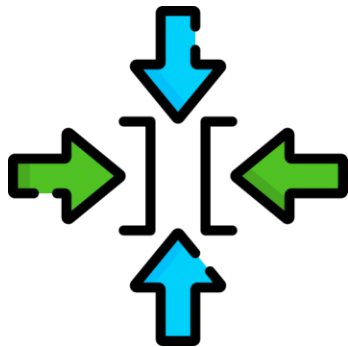


Budget : annuel et cumulé

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



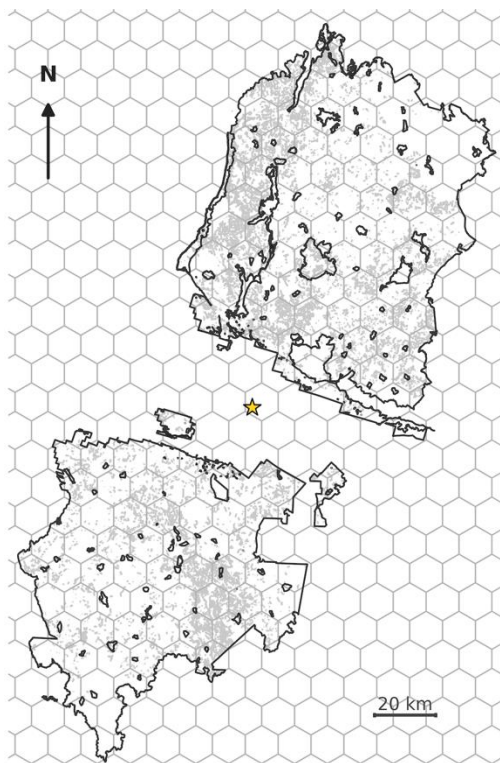
Éviter la dispersion : pas de restaurations isolées ou incohérentes

Cohésion : concentrer les efforts dans des unités spatiales voisines

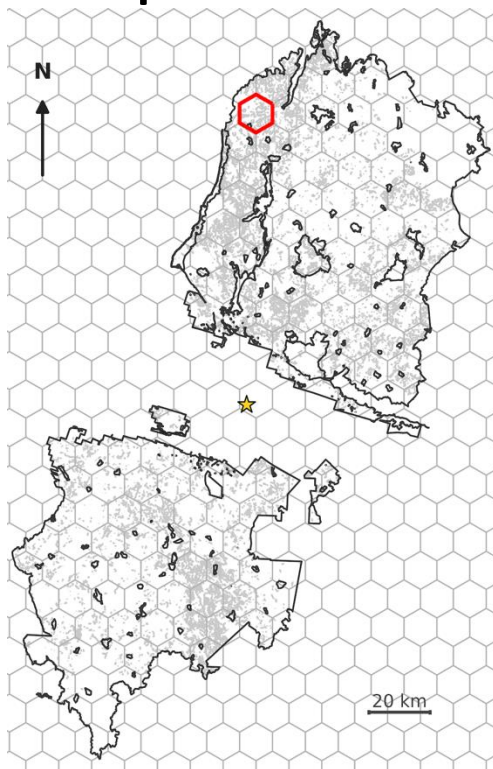
Continuité : maintenir les unités déjà actives dans le temps

Scénarios de priorisation

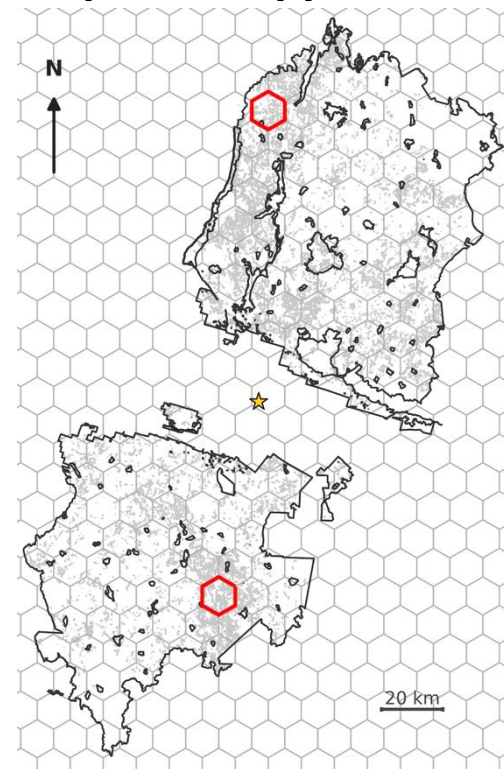
P0 : sans préférence spatiale (scénario de référence)



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**.

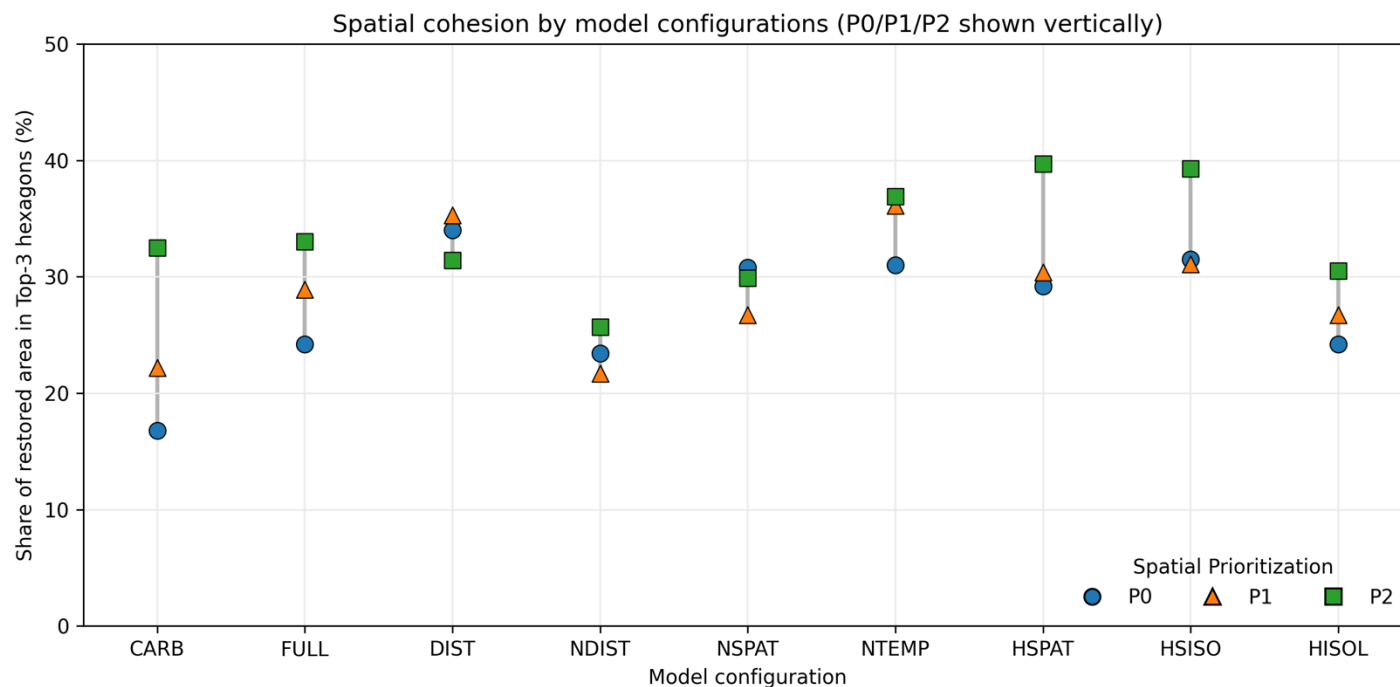
Acronyme	Description courte
CARB	Maximisation du carbone (sans pénalités)
DIST	Forte pénalité distance/transport
FULL	Modèle complet, pénalités modérées
HSISO	Pénalités très fortes (agrégation + isolement)
HISOL	Isolement seulement (sans agrégation)
HSPAT	Agrégation spatiale forte (sans isolement)
NDIST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

Résultats clés



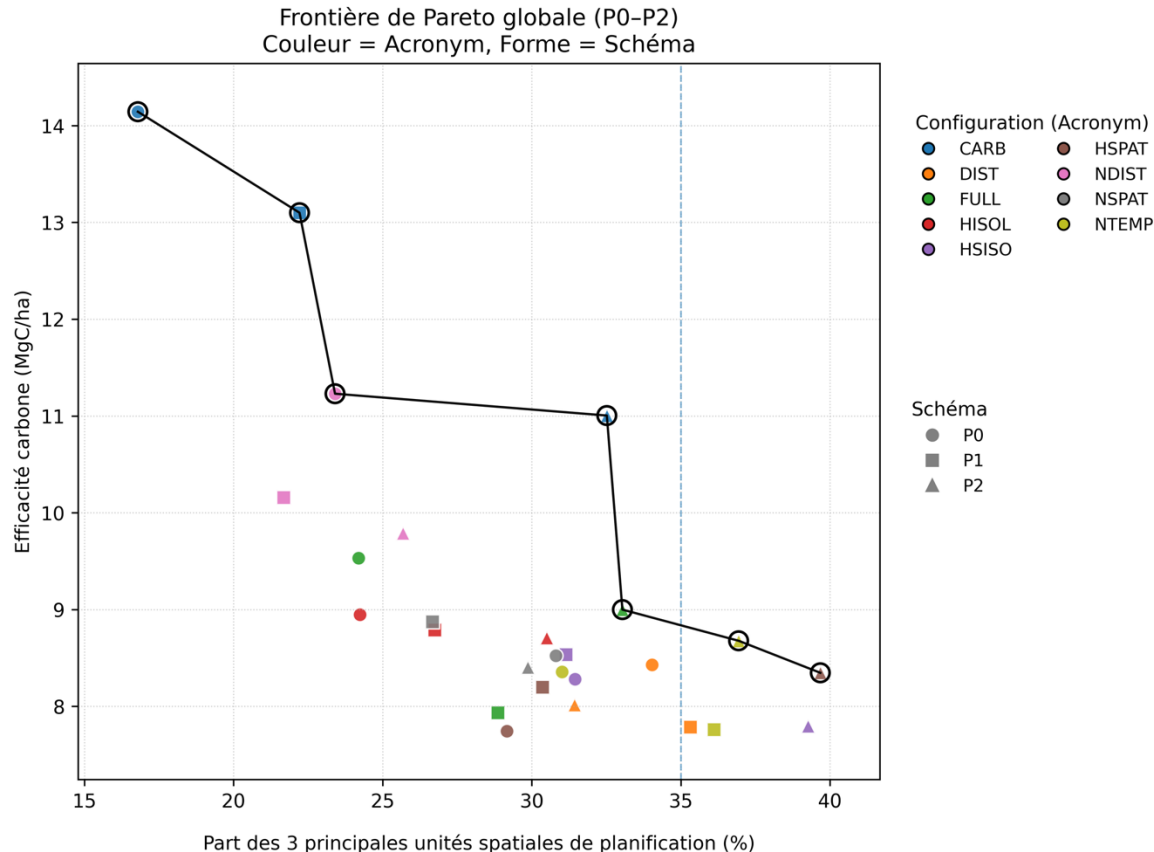
Résultats globaux par priorité (P0, P1, P2)

- **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).



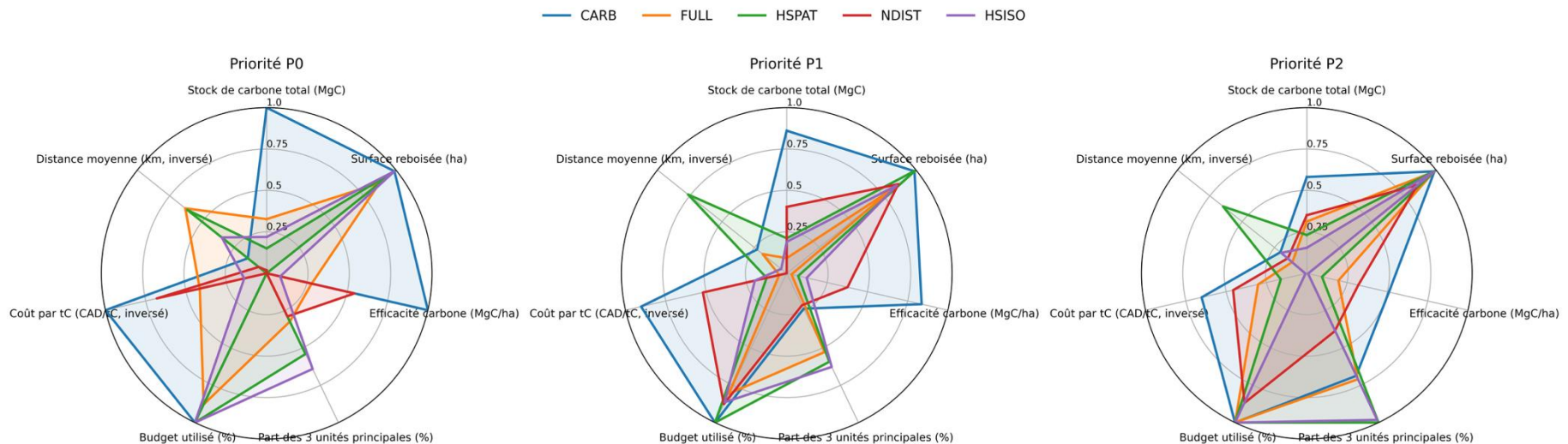
Résultats globaux par priorité (P0, P1, P2)

- **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

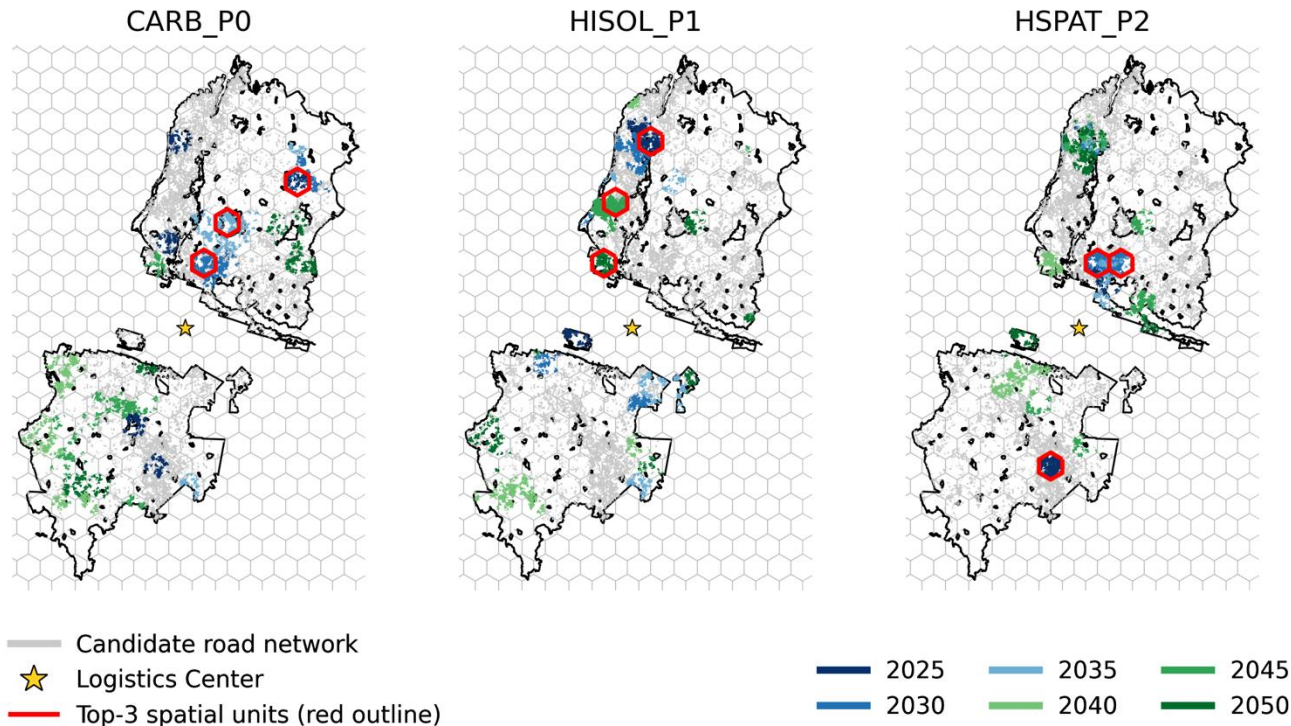
- Classement **PROMETHEE**: met en balance **carbone**, **cohésion** et **contraintes logistiques**.
- Graphiques **radar** (axes normalisés): montrent clairement les **compromis** entre carbone, coût, distance, agrégation (*Share Top 3*), etc.



Cartes (scénarios représentatifs — Share Top 3)

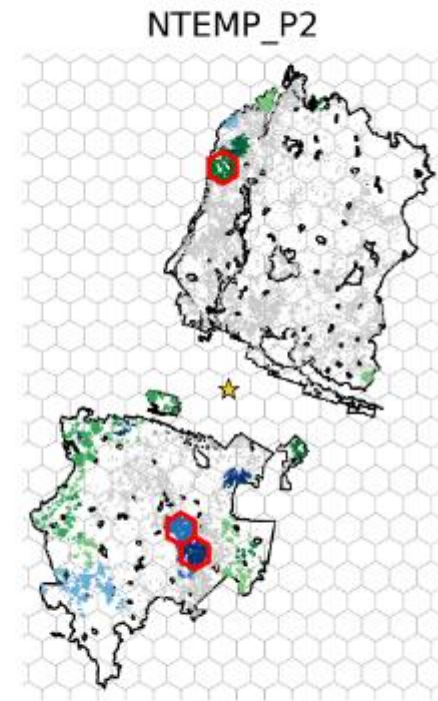
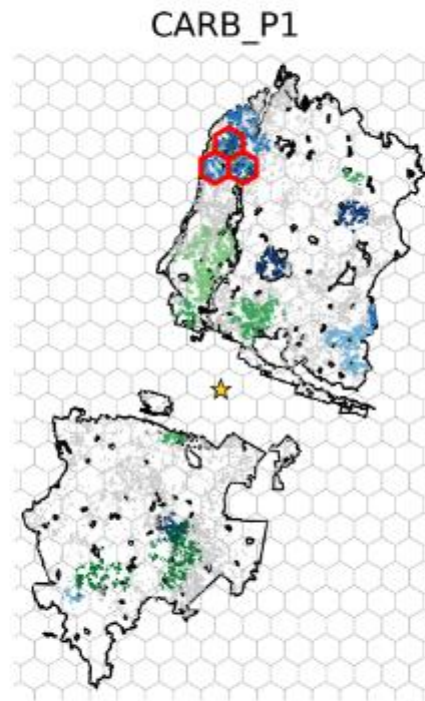
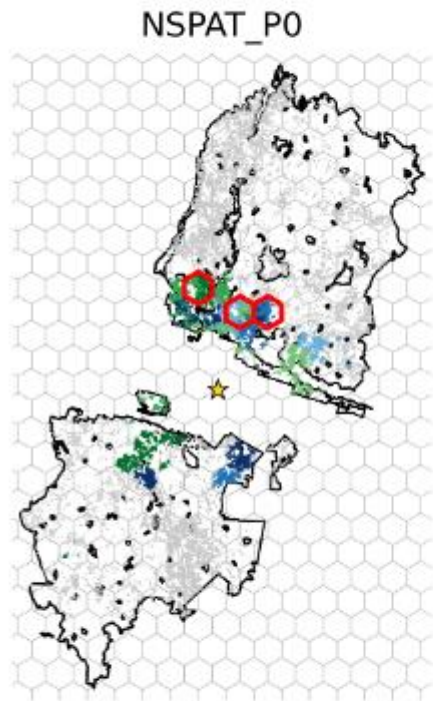
- Déploiement **spatio-temporel (2025–2050)** des segments restaurés, même emprise et légende.

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



Scénarios représentatifs (classement PROMETHEE)

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



— Candidate road network
★ Logistics Center
— Top-3 hexagons (red outline)

2025 2030 2035 2040 2045 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

