

Intégrer par la replanification les incertitudes climatiques dans la détermination des possibilités forestières : implications pour la prise de décision au Québec

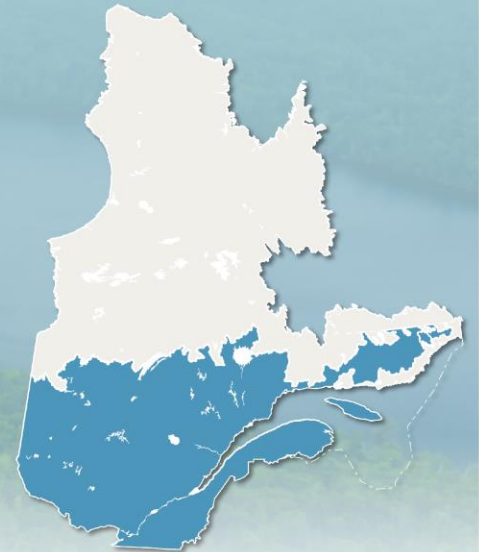
Lorena Balducci, Ph.D.

Jean-François Carle, ing.f., M.Sc.

Guillaume Cyr, ing.f., M.Sc.

Lucas Moreau, ing.f., Ph.D.

IBFRA – Québec – 27 Août 2026



→→→ Introduction

Le **Forestier en chef** est une entité indépendante

- ▶ Mission :
 - ▶ Déterminer les possibilités forestières pour la forêt publique québécoise (*Loi sur l'aménagement durable des forêts* (LADTF, c.A-18.1, s.48))

Question centrale:

- ▶ Comment la science peut-elle éclairer la prise de décision dans un contexte futur incertain ?

Objectifs principaux :

- ▶ Développer un cadre de modélisation combinant les changements climatiques, les perturbations naturelles et des stratégies d'adaptation.
- ▶ Soutenir la prise de décision du Forestier en chef à l'aide d'analyses stochastiques.

→ Méthode : La Côte-Nord comme région d'étude



- ▶ Un modèle a été développé et appliqué à la région de la Côte-Nord (5 unités d'aménagement pour environ 8 millions d'hectares).
- ▶ Fondé sur les stratégies d'aménagement et le budget retenus dans le cadre du calcul de la possibilité forestière 2023-2028.

→→→ Méthode : Approche de modélisation

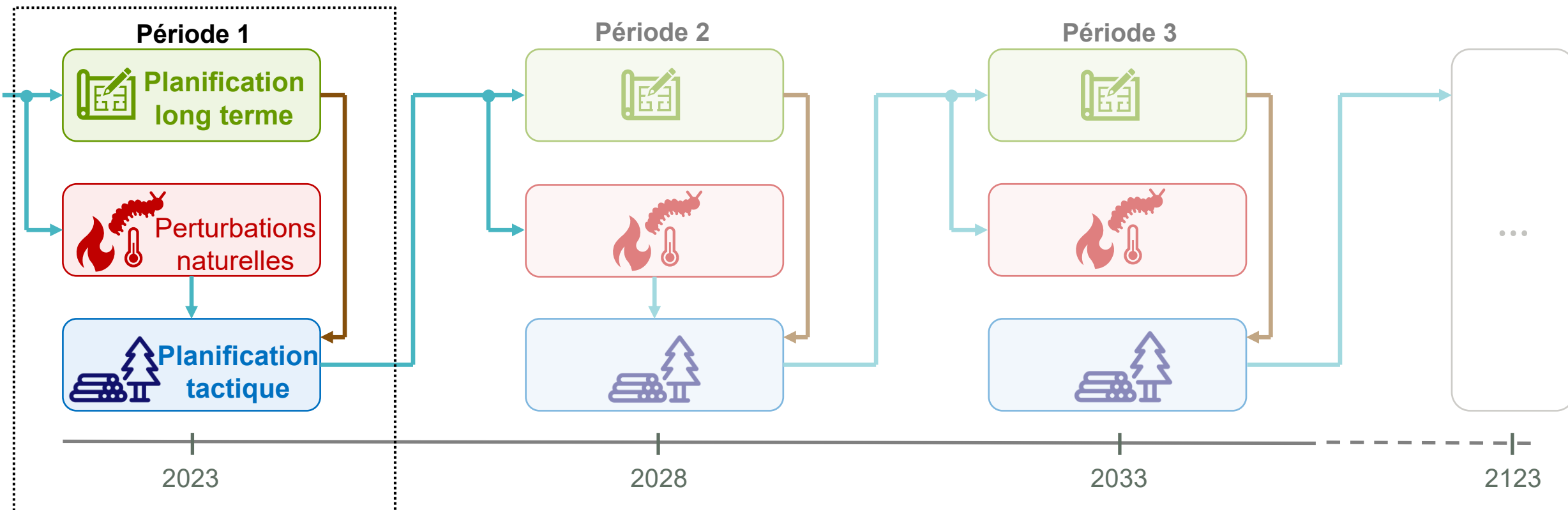
- ▶ Nouveauté ? Un nouvel outil pour l'optimisation et la simulation: **Replanification**
- ▶ Code source ouvert : <https://github.com/Bureau-du-Forestier-en-chef/FMT>



→ Méthode : Approche de modélisation

► Replanification : Comment cela fonctionne ?

► Chaque pas de temps représente une période de cinq ans, répétée jusqu'à la fin de l'horizon de planification.



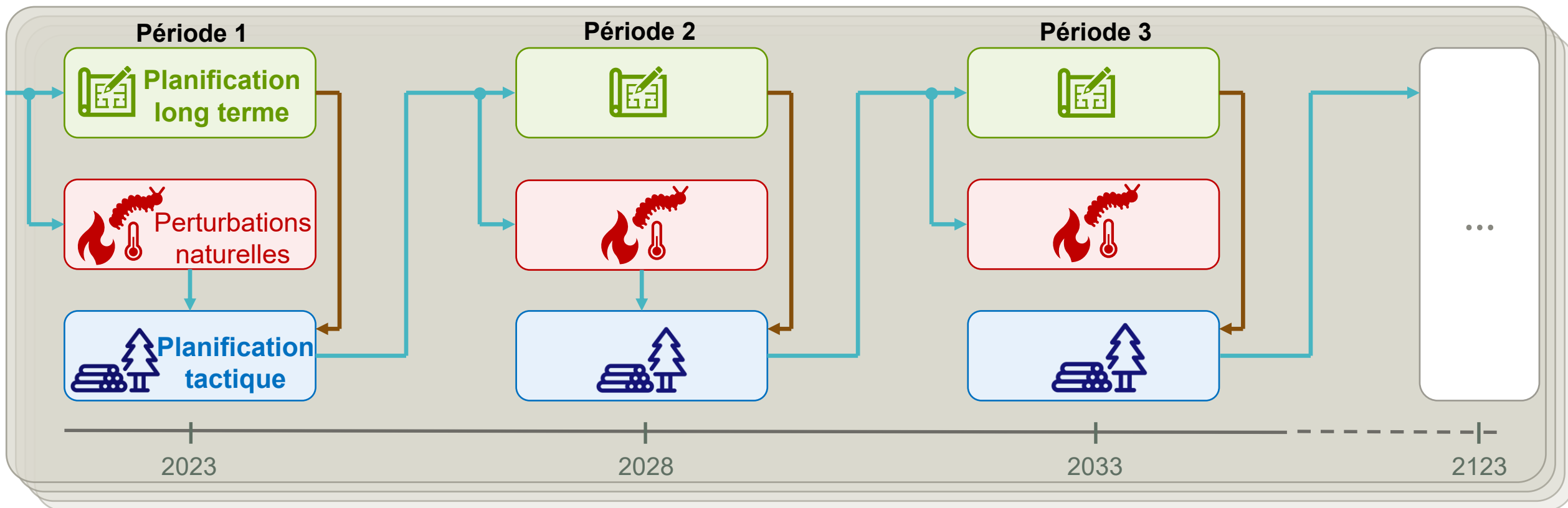
C'est un cycle complet : Planifie à long terme, simule les perturbations, réoptimise, puis passe à la période suivante.

— Mise à jour de l'inventaire forestier
— Transmission de la planification long terme

→→ Méthode : Approche de modélisation

► Replanification : Comment cela fonctionne ?

► Chaque pas de temps représente une période de cinq ans, répétée jusqu'à la fin de l'horizon de planification.



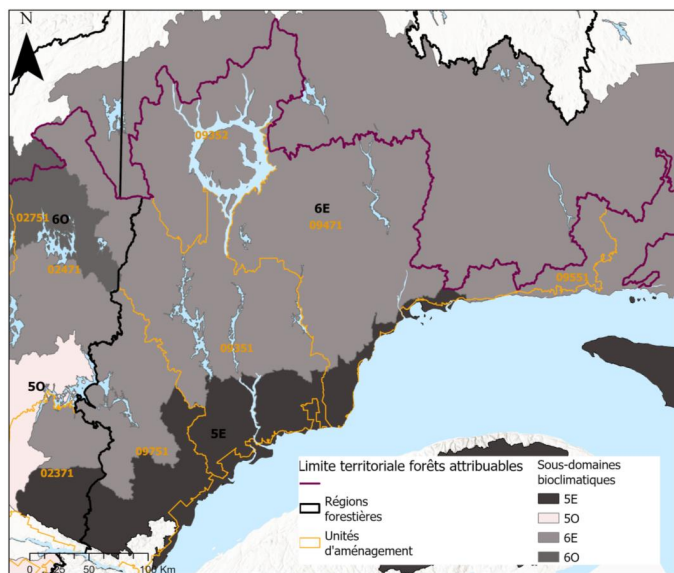
— Mise à jour de l'inventaire forestier

— Transmission de la planification long terme

→ Méthode : Approche de modélisation

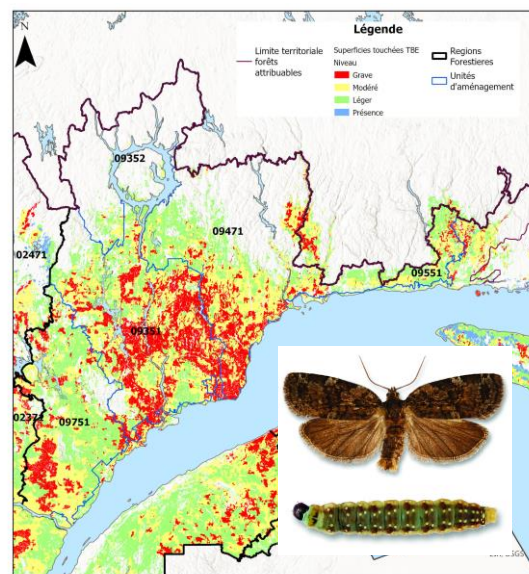
Les effets du climat et les perturbations naturelles ont été intégrés au processus de modélisation.

Productivité



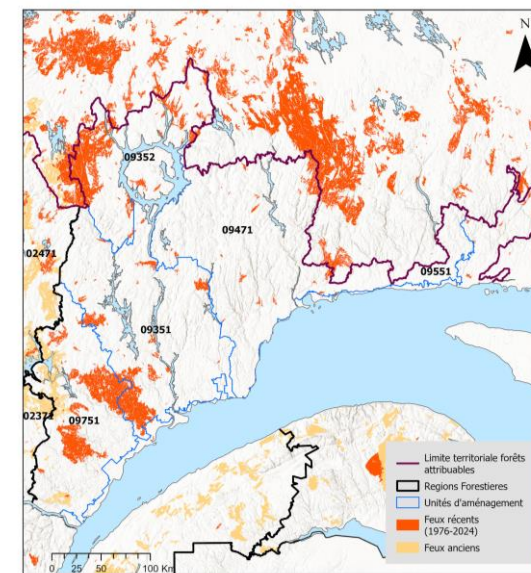
D'Orangeville et al., 2018; Power. et Auger, 2019; Power et al., 2025; Wang et al., 2022

TBE



Bauce et al., 2024, Bouchard et Auger, 2016, Boulanger et al., 2016; DRF, 2024; Houdonde et al., 2021, Régnière et al., 2012

Feux de forêt



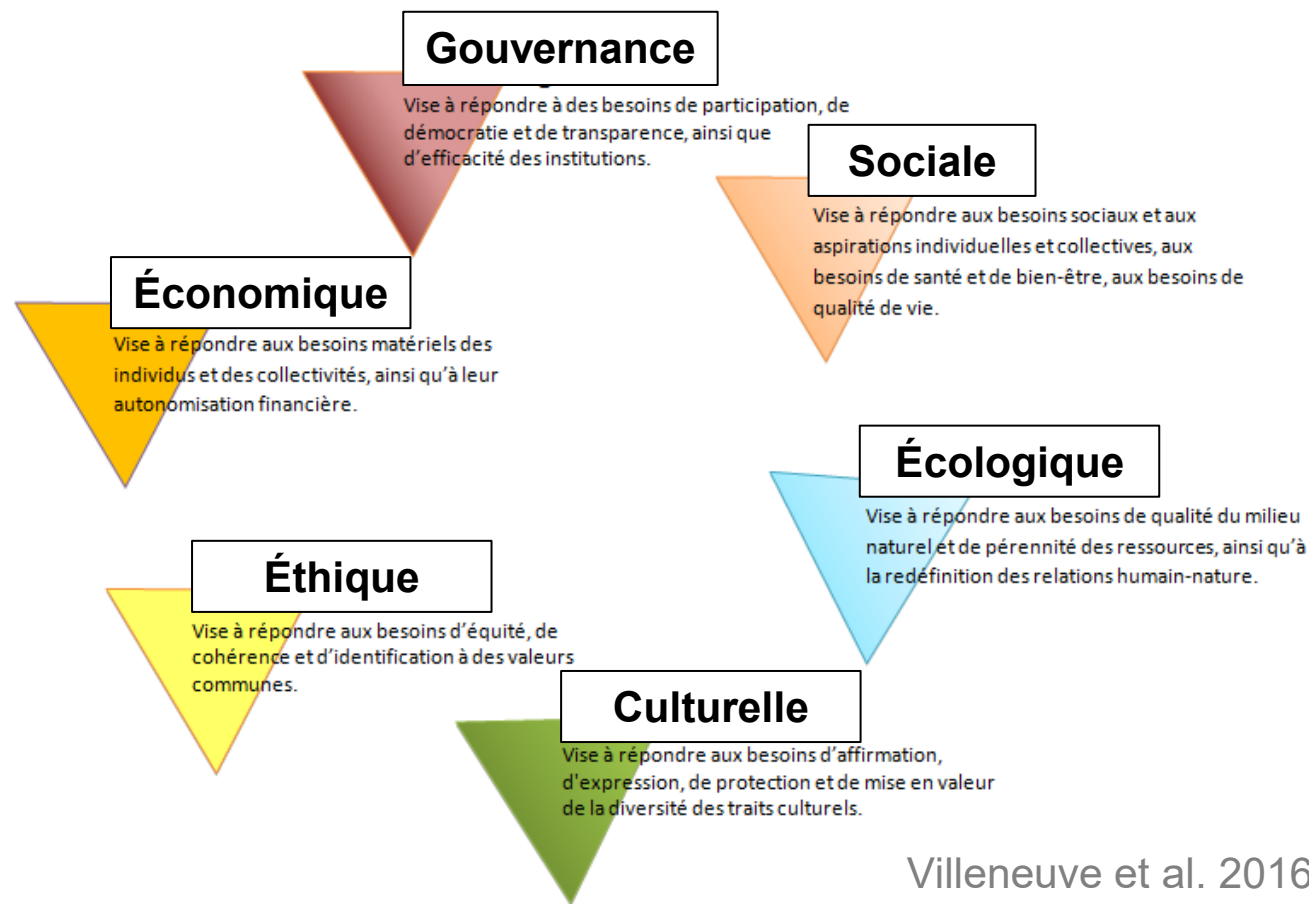
Bernier et al, 2006; Couillard et al., 2022; Cyr et al., 2022; Metsaranta et al., 2023; NRCan, 2016; Bouchard et al., 2023; Splawinski et at., 2014, 2016, 2019.

→→→ Méthode : Approche de modélisation

- ▶ **Climat** : Comparaison entre le scénario de référence historique et un scénario climatique modéré (SSP2-4.5)
- ▶ **Catégories de scénario** :
 - ▶ Évolution naturelle (aucun aménagement)
 - ▶ Aménagement forestier **sans** adaptations
 - ▶ Aménagement forestier **avec** adaptations (différents taux de récolte de récupération, coupes avec réserve de semenciers, plantations mixtes de conifères et différents taux de fonds de réserve)
- ▶ **Indicateurs**: p. ex. maintien de la possibilité forestière, volume sur pied, superficies touchées par les perturbations naturelles, échec de régénération, etc.

→→ Méthode : Comment utiliser les indicateurs de notre modèle pour soutenir la prise de décision ?

- ▶ **Grille d'analyse de développement durable** : outil multidimensionnel d'évaluation de la durabilité (UQAC et boîte à outils d'accélération des ODD des Nations Unies)
- ▶ Utilisée pour **comparer les réplcats de scénarios selon six dimensions**, à partir des indicateurs d'aménagement forestier issus de notre modélisation.



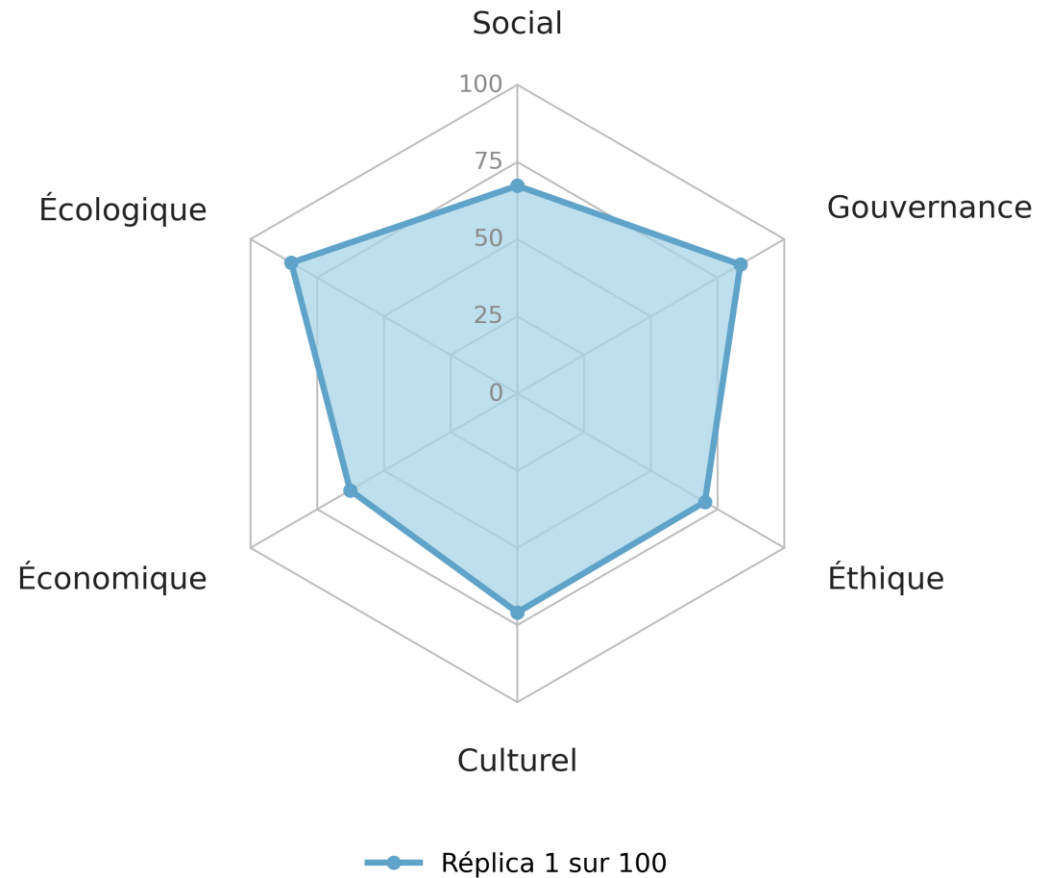
Villeneuve et al. 2016

→→ Méthode : Aide à la décision tenant compte de l'incertitude

- ▶ Normalisation et calcul des scores par dimension
- ▶ Performance globale d'un réplica = Aire de l'hexagone

Analyse du développement durable Scénario X, réplica unique

(Exemple illustratif)

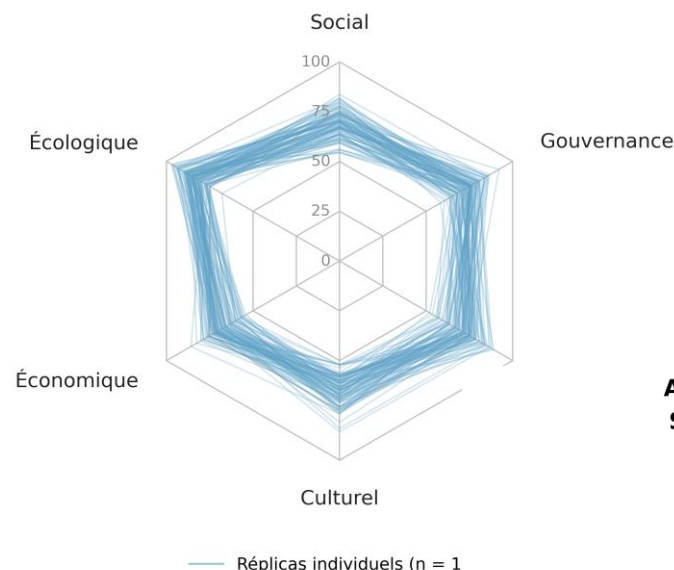


→ Méthode : Aide à la décision tenant compte de l'incertitude

- ▶ Normalisation et calcul des scores par dimension
- ▶ Performance globale d'un réplica = Aire de l'hexagone
- ▶ Classement des scénarios basé sur leur performance globale sous incertitude
- ▶ 3 périodes de temps (aujourd'hui-2050, 2050-2080, 2080-2128)

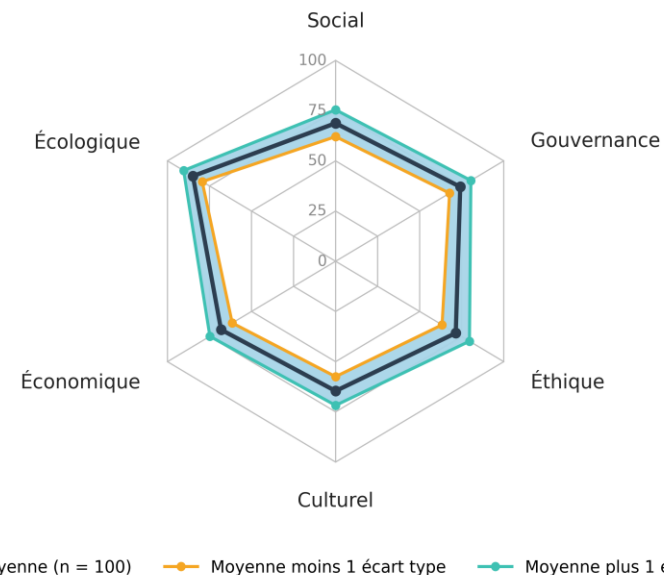
Analyse du développement durable
Scénario X, 100 réplicas stochastiques

(Exemple illustratif)



Analyse du développement durable
Scénario X, moyenne et écart type

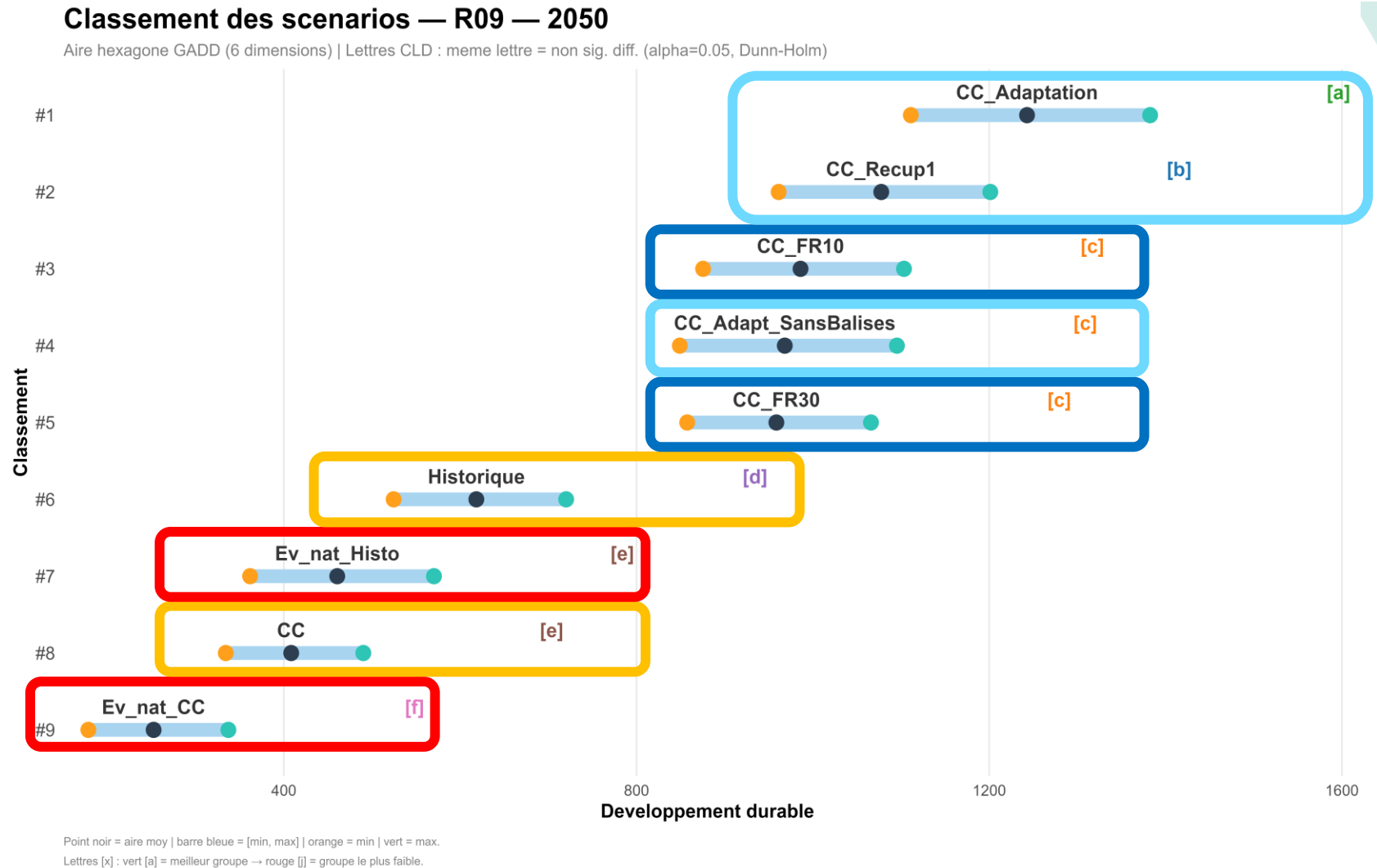
(Exemple illustratif)



→→ Résultats : Support à la décision

Court terme (Aujourd'hui – 2050)

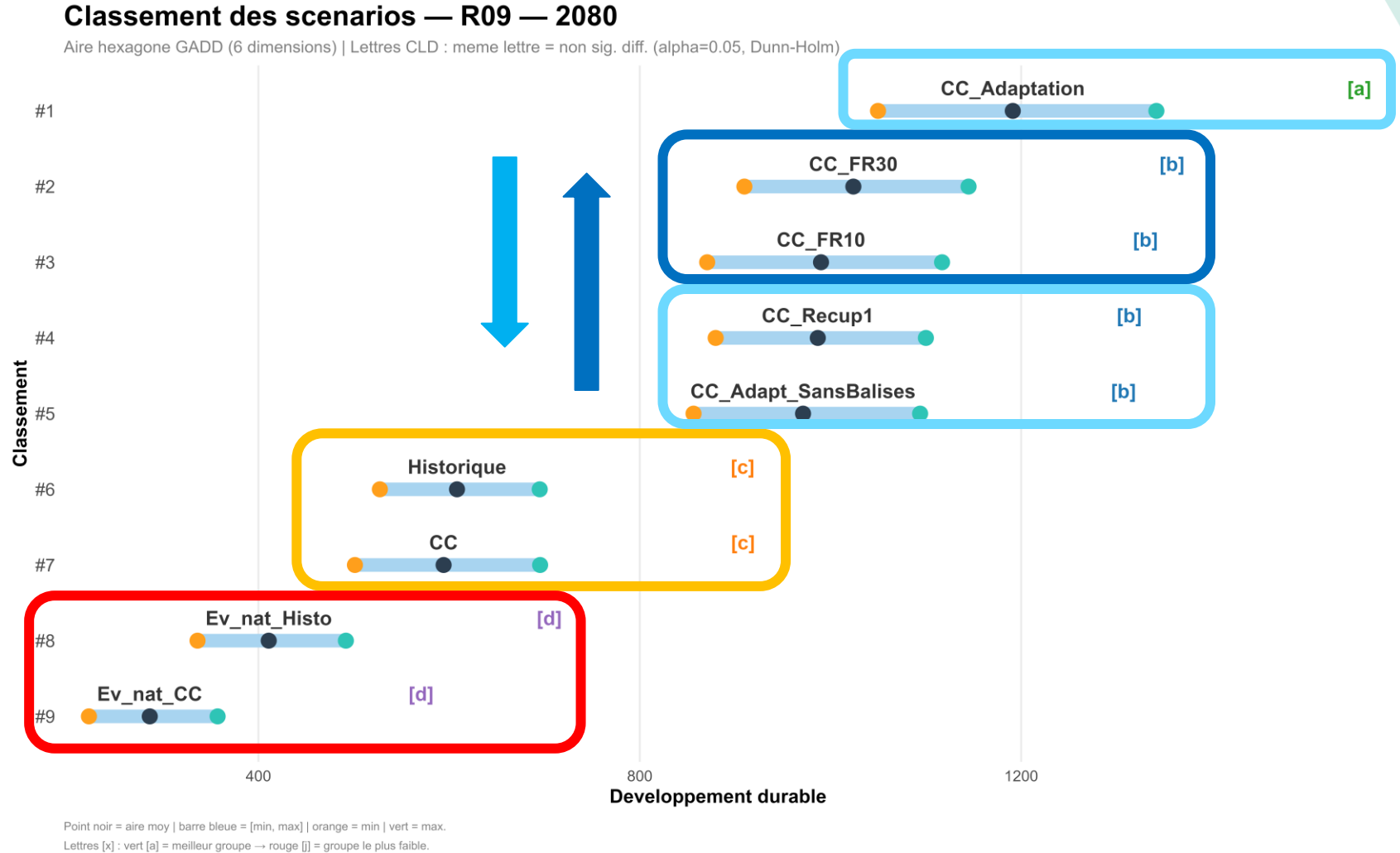
Accent sur les
actions immédiates
et les impacts à
court terme



→→ Résultats : Support à la décision

Moyen terme
(2050 – 2080)

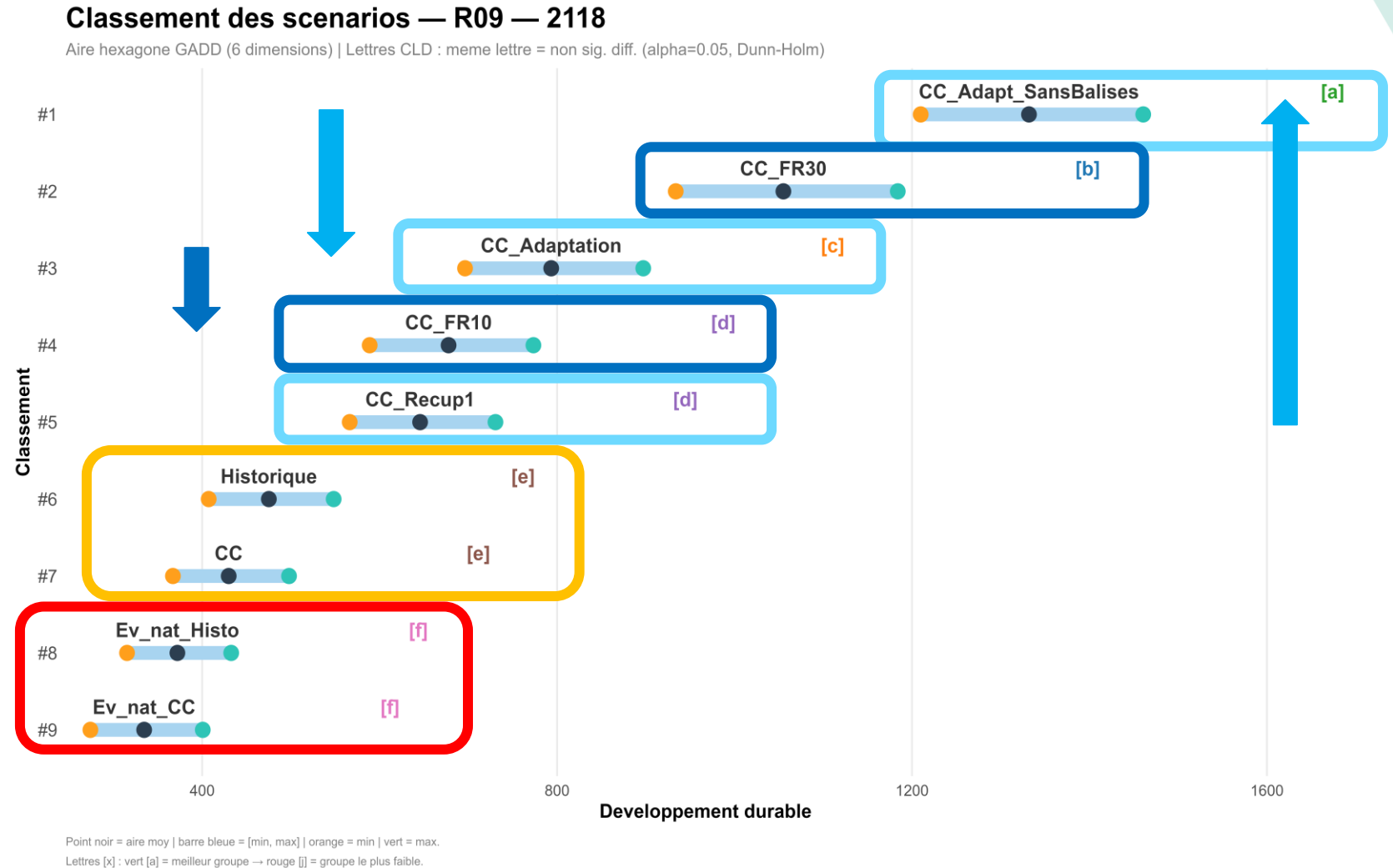
Évaluation des
trajectoires
d'adaptation et de
transition à moyen
terme



→→ Résultats : Support à la décision

Long terme
(2080 – 2100)

Évaluation de la
durabilité et de la
résilience à long terme



→→ Messages clés

1. Nous avons développé un nouveau cadre de modélisation intégrant les effets des changements climatiques sur la productivité, les perturbations naturelles et les stratégies d'adaptation afin de soutenir la prise de décision.
2. Les scénarios d'adaptation ont surpassé le scénario de référence historique sur l'ensemble de l'horizon de simulation.
3. Mais il n'existe pas de scénario universellement optimal : le choix dépend des dimensions privilégiées et de l'horizon temporel considéré, et non d'un classement unique.
4. Première étape : transformer des enjeux complexes en messages simples afin d'éclairer les décideurs.

→→→ Remerciements

Yan Boulanger (NRCan, CFS)

Hugues Power (MRNF, DRF)

Tadeusz Splawinski (ALL-TECH Environmental Services Limited)

Bureau du Forestier en chef :

Étienne Perreault, Laurie Dupont-Leduc, Gabriel Landry, Roxanne Tremblay, Helin Dura, Francesca Houde, Marc-Alexandre Martel, Michel Caron, Louis-Alexandre Giasson, Joëlle Deschênes et Alexandre Trottier-Deschênes

Nos sites internet:

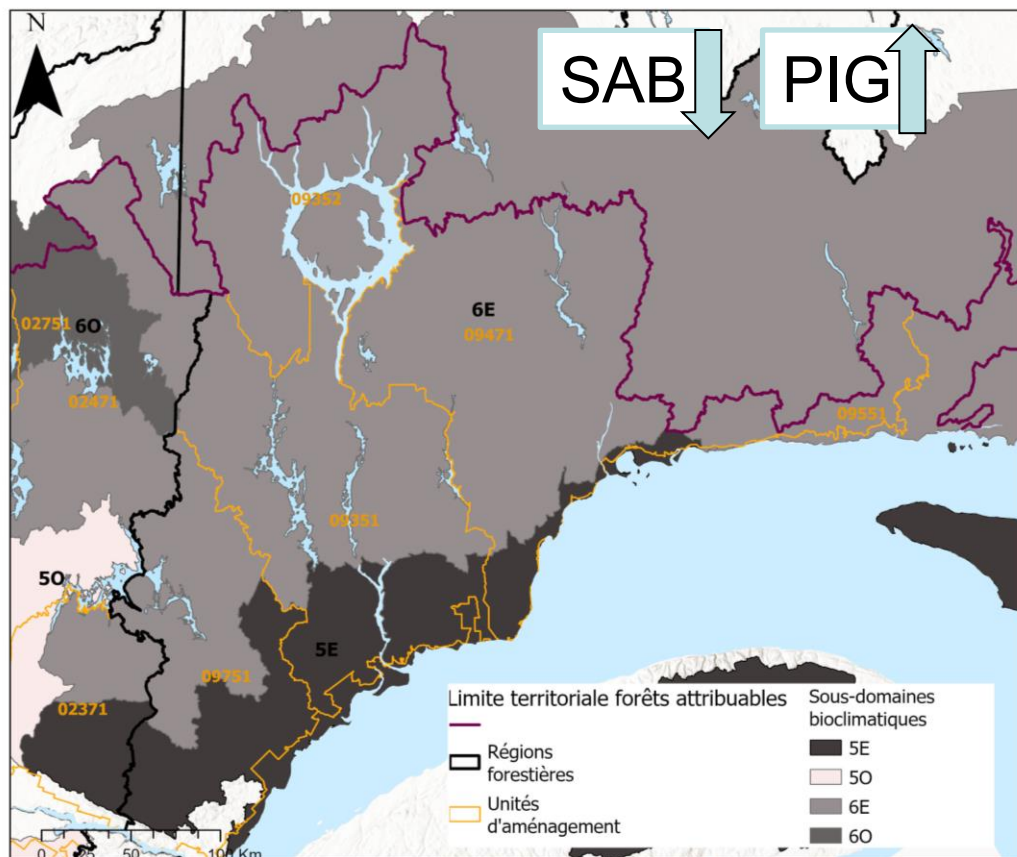
<http://www.forestierenchef.gouv.qc.ca>
<https://github.com/Bureau-du-Forestier-en-chef>

Contact:

bureau@fec.gouv.qc.ca

MERCI!
QUESTIONS?

→ Méthode : Effet du climat sur la productivité



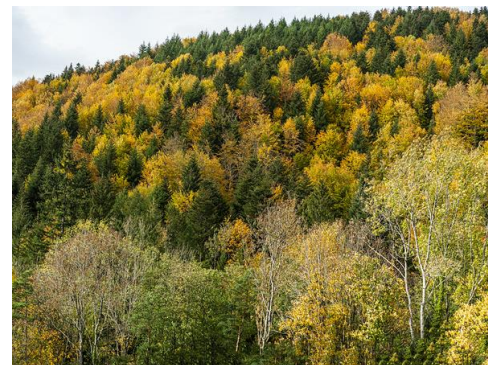
- ▶ Modificateurs de volume (Power, DRF, 2025)
 - ▶ Rapport entre le volume moyen sous climat futur et le volume moyen sous climat historique
- ▶ Basé sur des modèles publiés
 - ▶ Deux modèles de croissance (D'Orangeville et al. 2018, Wang et al. (2022))
 - ▶ Sénescence évaluée à l'aide d'un modèle de mortalité (Power et al. 2025)
- ▶ Les modificateurs sont incorporés *a priori* dans les intrants du modèle
- ▶ Lien avec les courbes BFEC du CPF 2023–2028

→→ Méthode : Dynamique de la TBE

- *Facteurs biologiques*

- **Essences hôtes** (vulnérabilité induite par l'âge et la présence de sapin baumier)

≥ 40 ans



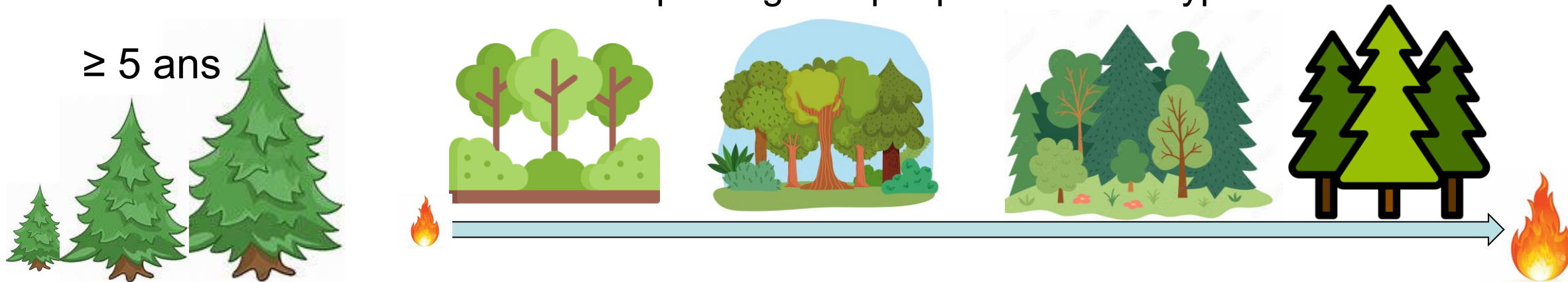
- **TBE**: Taux de croissance d'insecte et durée/intensité des épidémies



→ Méthode : Feux de forêt

- ▶ *Facteurs biologiques*

- ▶ Vulnérabilité des essences induite par l'âge du peuplement et le type de couvert



- ▶ *Environnement physique* : Dépôts de surface et unités de végétation homogènes

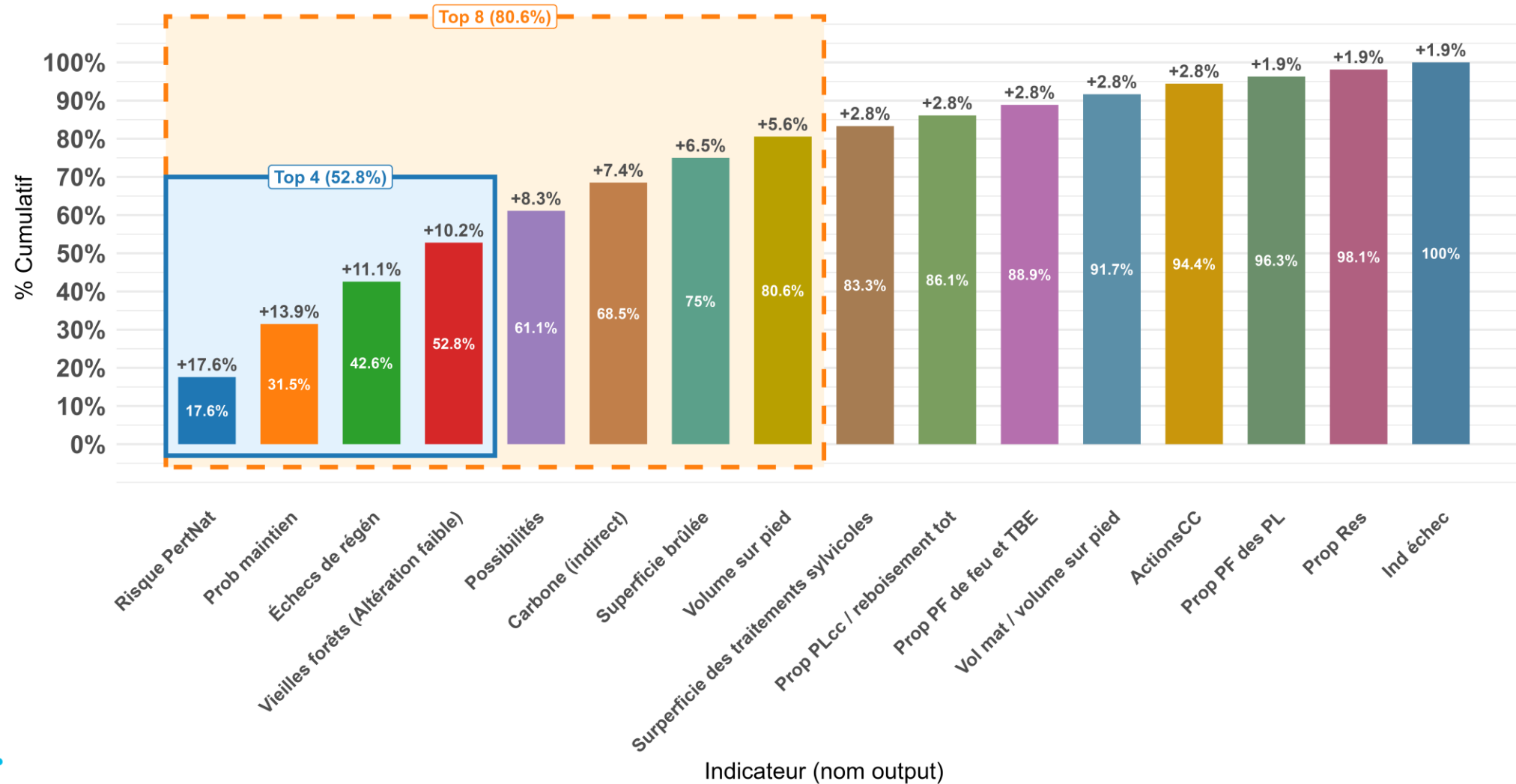
- ▶ *Facteurs inhérents aux feux de forêt*

- ▶ Historique des feux (taille et nombre),
- ▶ Zonage des régimes de feux au Québec (Couillard et al., 2022)
- ▶ Projection de la durée de la saison des feux sous RCP4.5 (NRCan, 2016, 2022)

→→ Résultats : Support à la décision

Contribution cumulée des indicateurs

Grille GADD : Grille_GADD_14082026

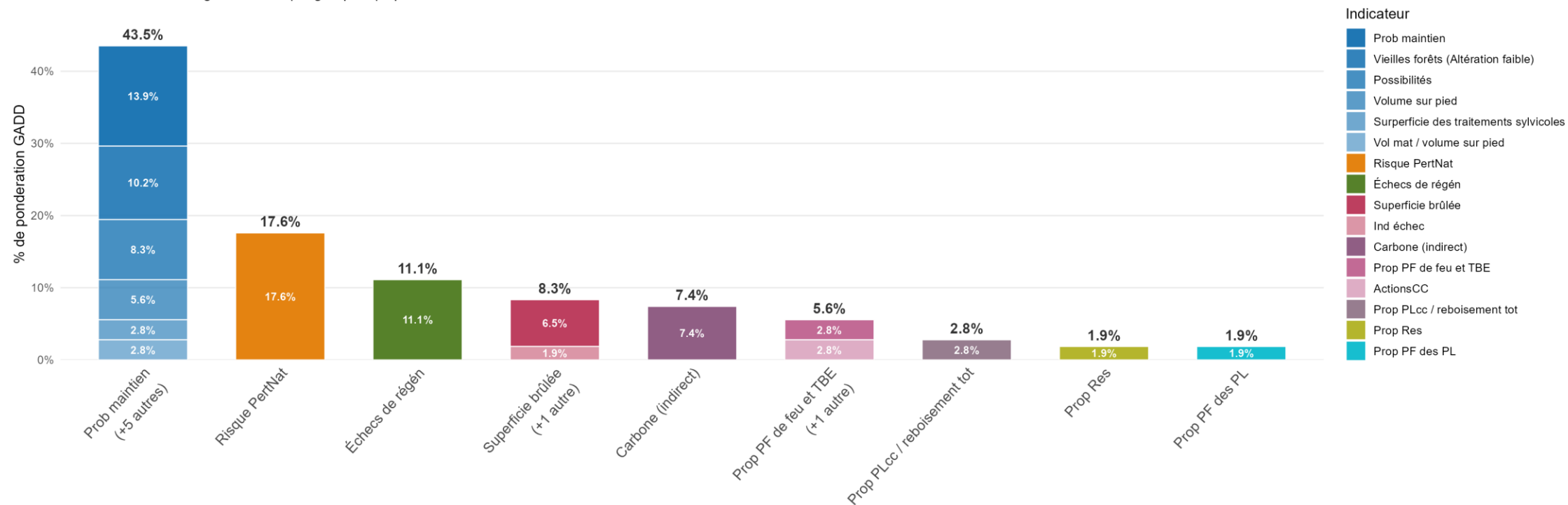


→→ Résultats : Support à la décision

Poids cumulés par groupe de corrélation (20 périodes)

Region: R09 | Tous scenarios

Section 13 × Clustering section 14 | 9 groupes | spearman



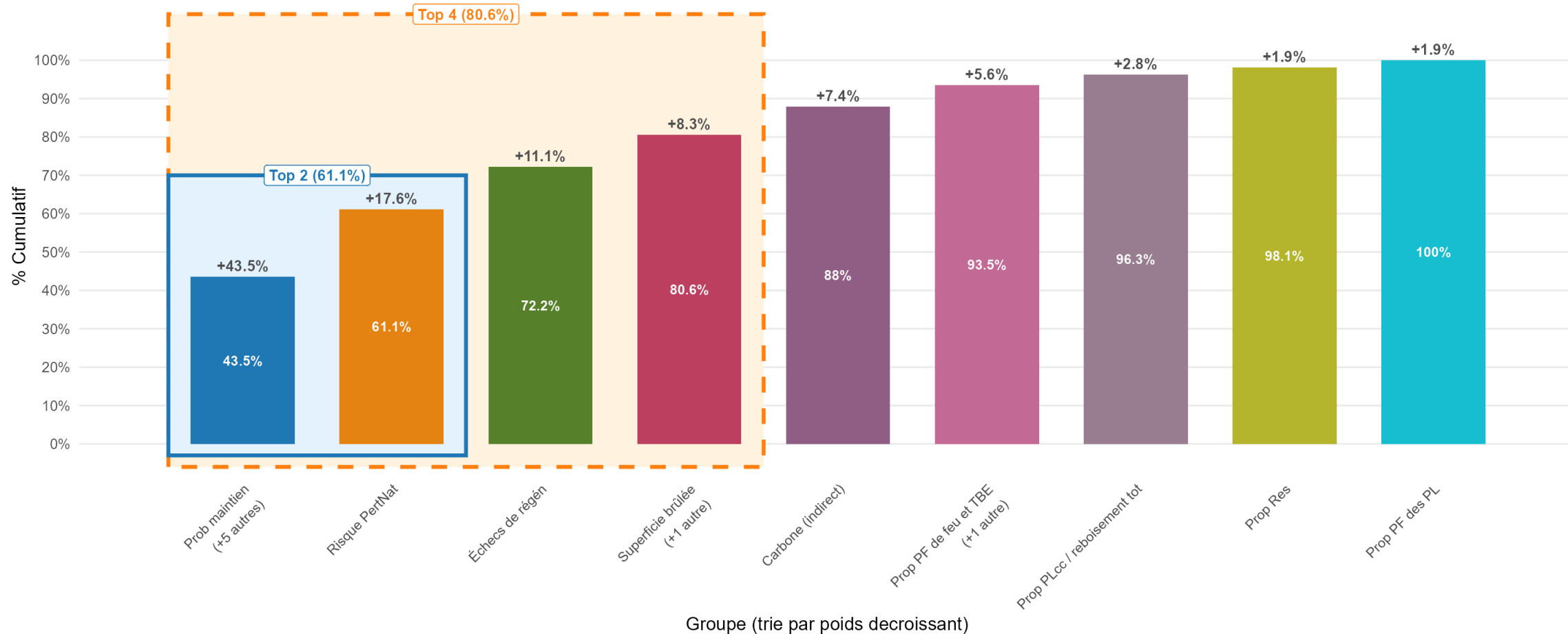
Un groupe = indicateurs fortement correles ($|r_{\text{mediane}}| \geq 0.8$).
La hauteur de chaque segment = poids individuel de l'indicateur.

→→ Résultats : Support à la décision

Contribution cumulée des groupes (20 périodes)

Region: R09 | Tous scenarios

Section 13 × Clustering section 14 | 9 groupes | spearman



Un groupe = indicateurs fortement corréles ($|r_{\text{mediane}}| \geq 0.8$).
+X% = apport du groupe | Valeur dans la barre = % cumulatif.