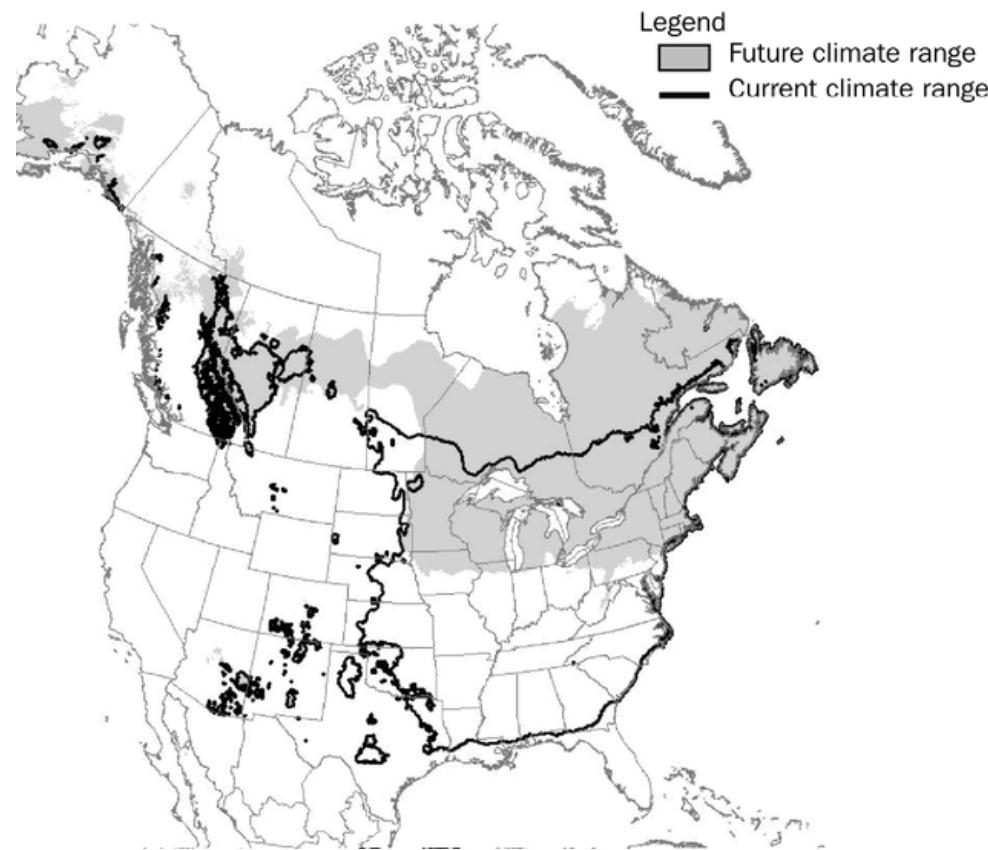


# Les perturbations modérées catalysent les transitions forestières dans l'écotone boréal-tempéré

Marie-Hélène Brice, Pierre Legendre & Marie-Josée Fortin

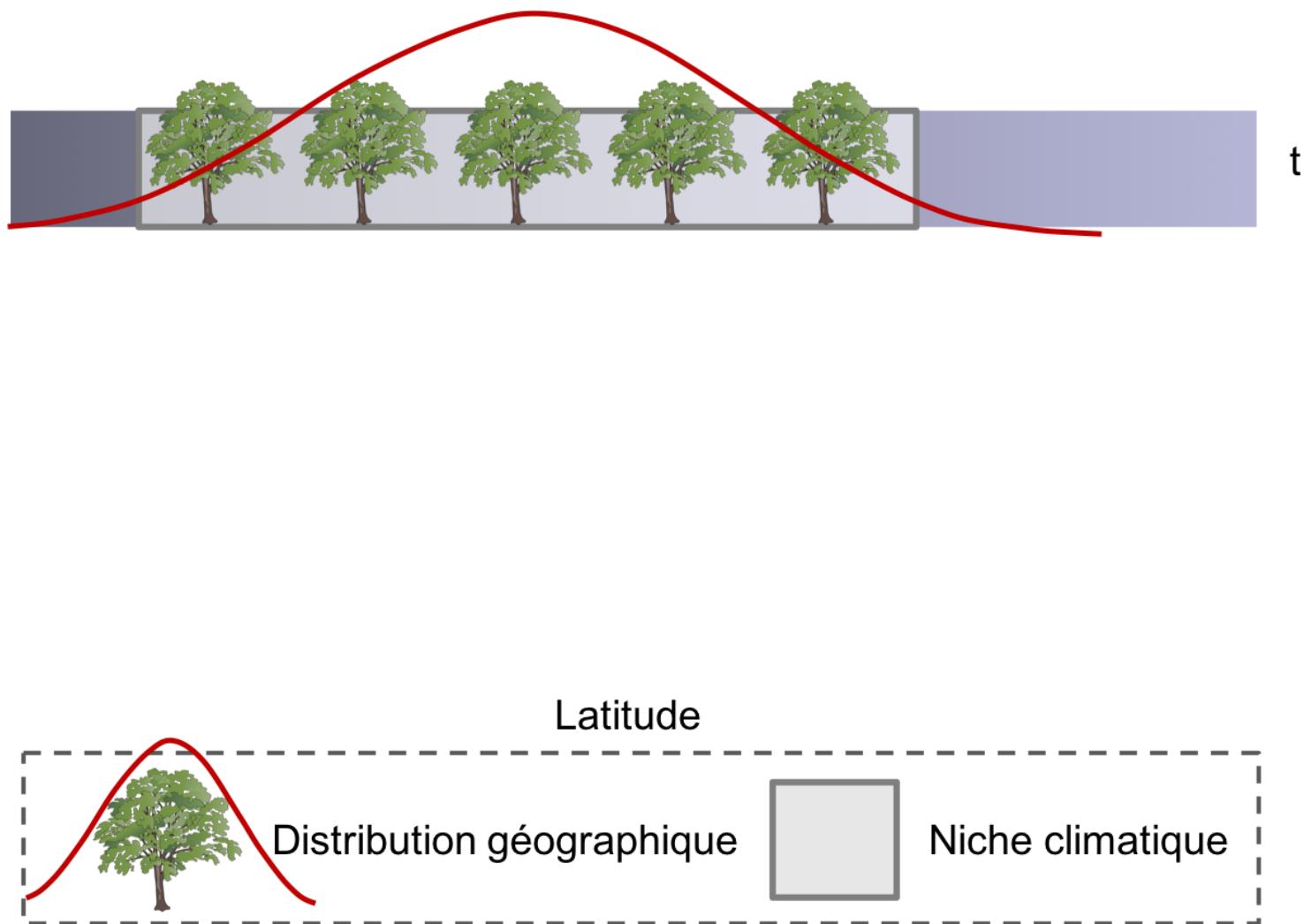
# Déplacement des niches

Future enveloppe climatique de l'Érable à sucre (2071-2100)

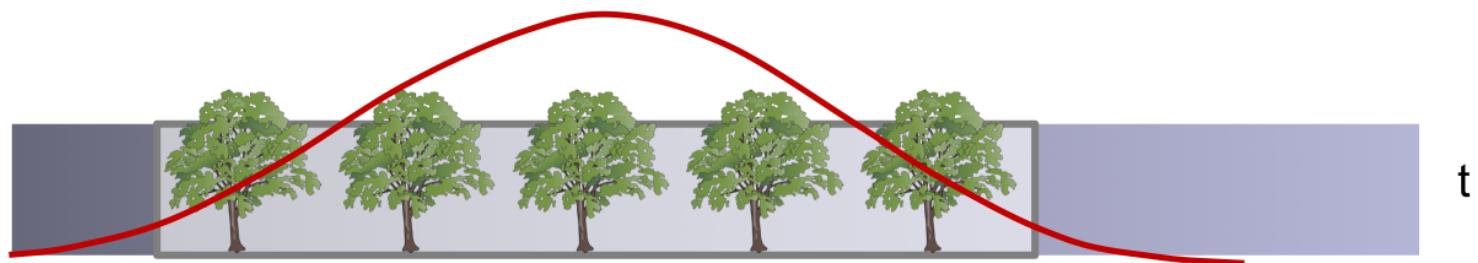


McKenney et al. 2007. BioScience.

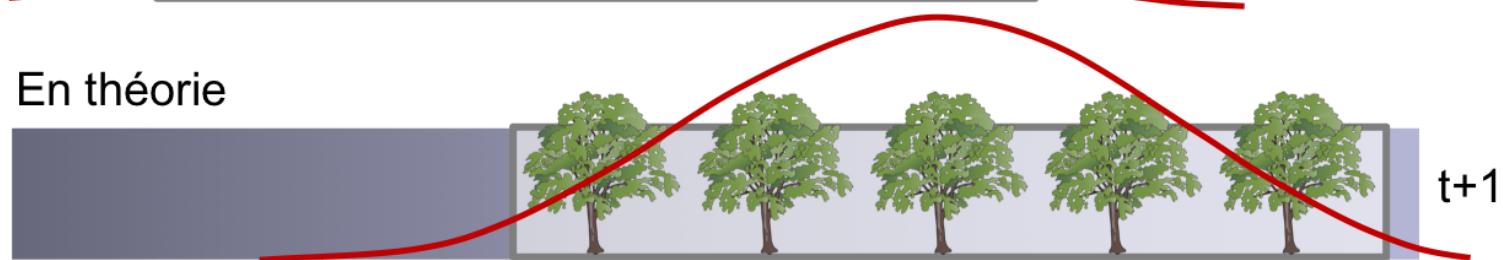
# Déplacement des niches



# Déplacement des niches



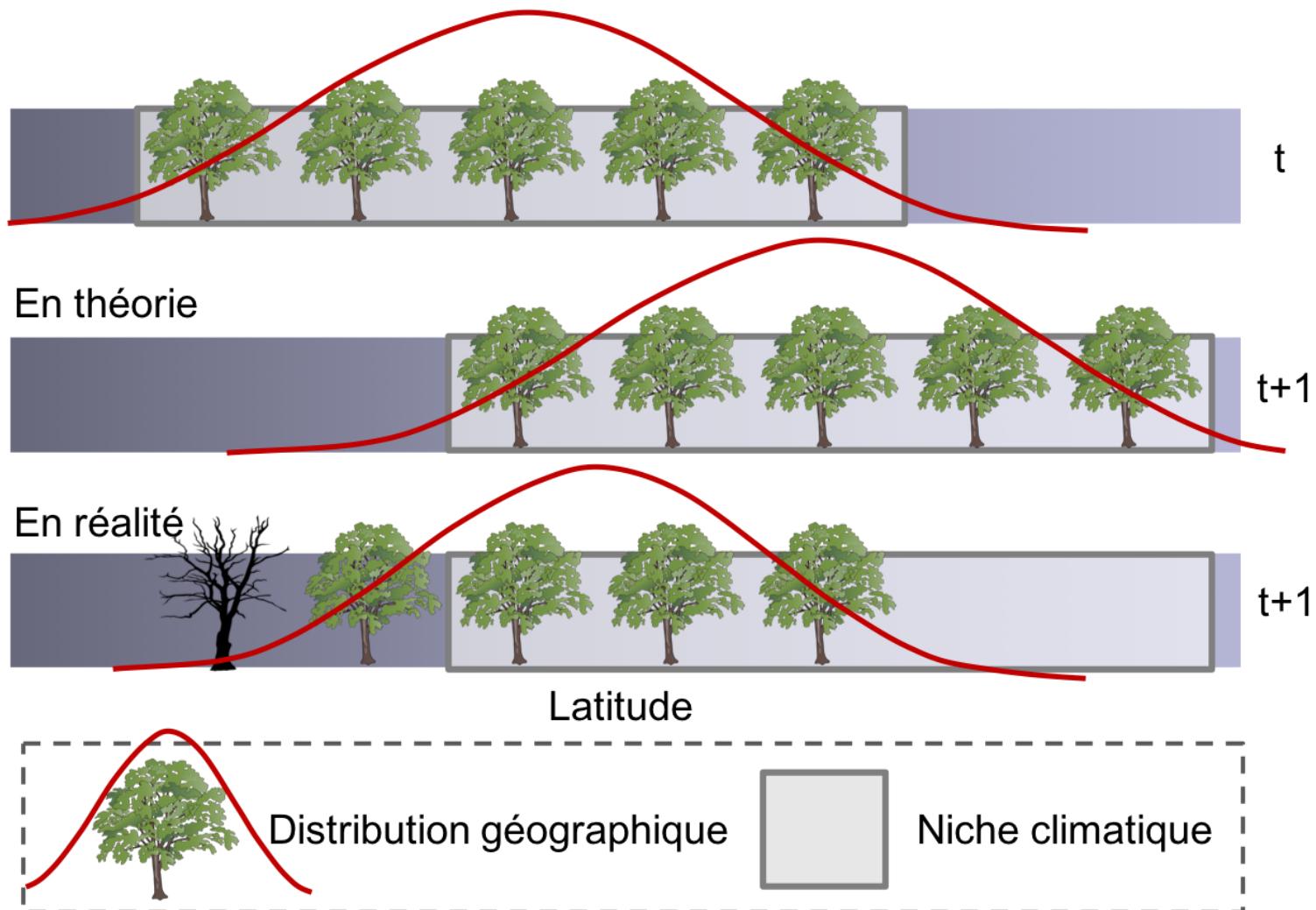
En théorie



Latitude



# Déplacement des niches



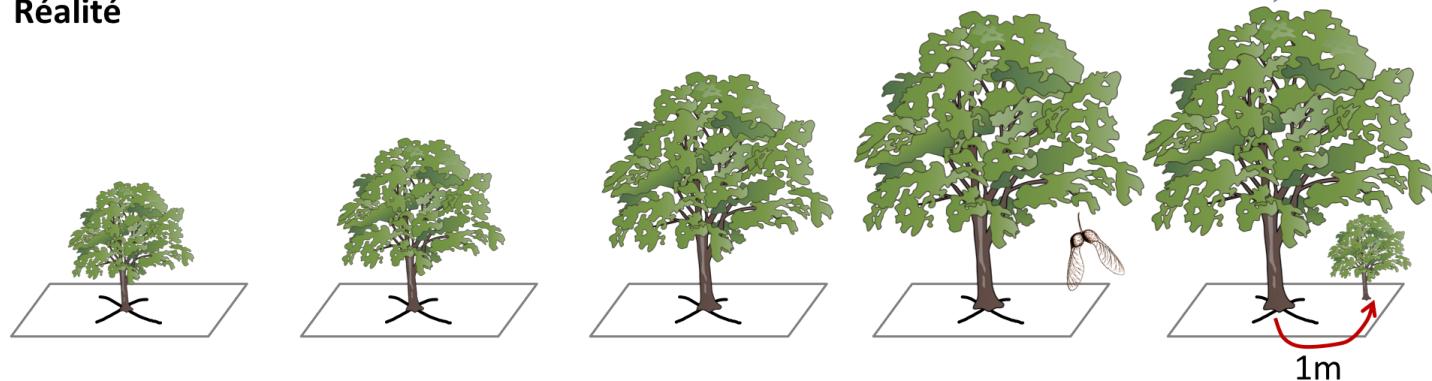
# Contraintes à la migration

- Démographie lente
- Dispersion limitée
- Compétition interspécifique
- Hétérogénéité du sol

Prédiction

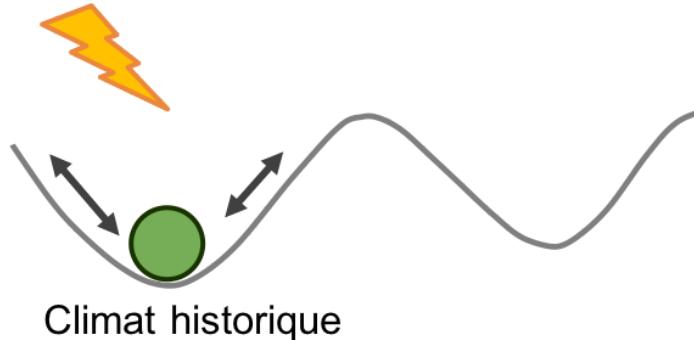


Réalité



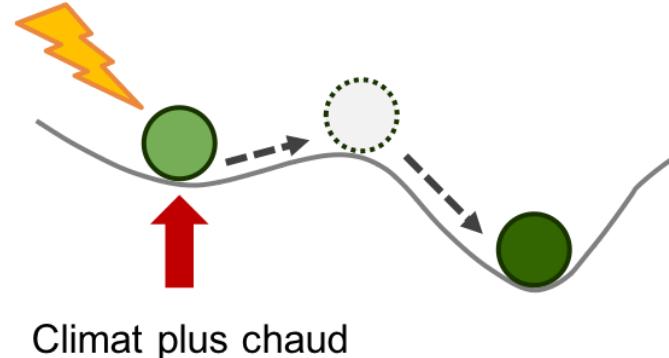
1m

# États alternatifs stables



**État 1**  
Ex: forêt mixte

**État 2**  
Ex: forêt tempérée



**État 1**  
Ex: forêt mixte

**État 2**  
Ex: forêt tempérée



État de l'écosystème



Perturbation



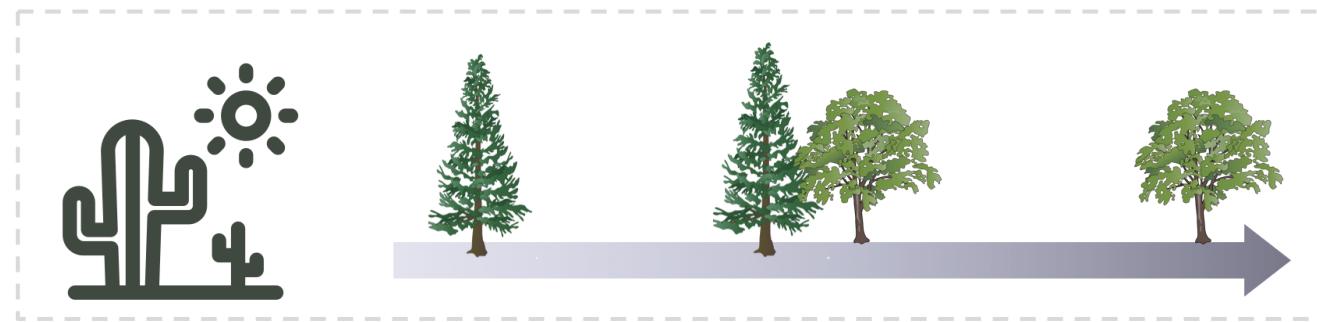
Domaine d'attraction

## Comprendre les contraintes et les moteurs sous-jacents de la dynamique de transition des communautés forestières du Québec.

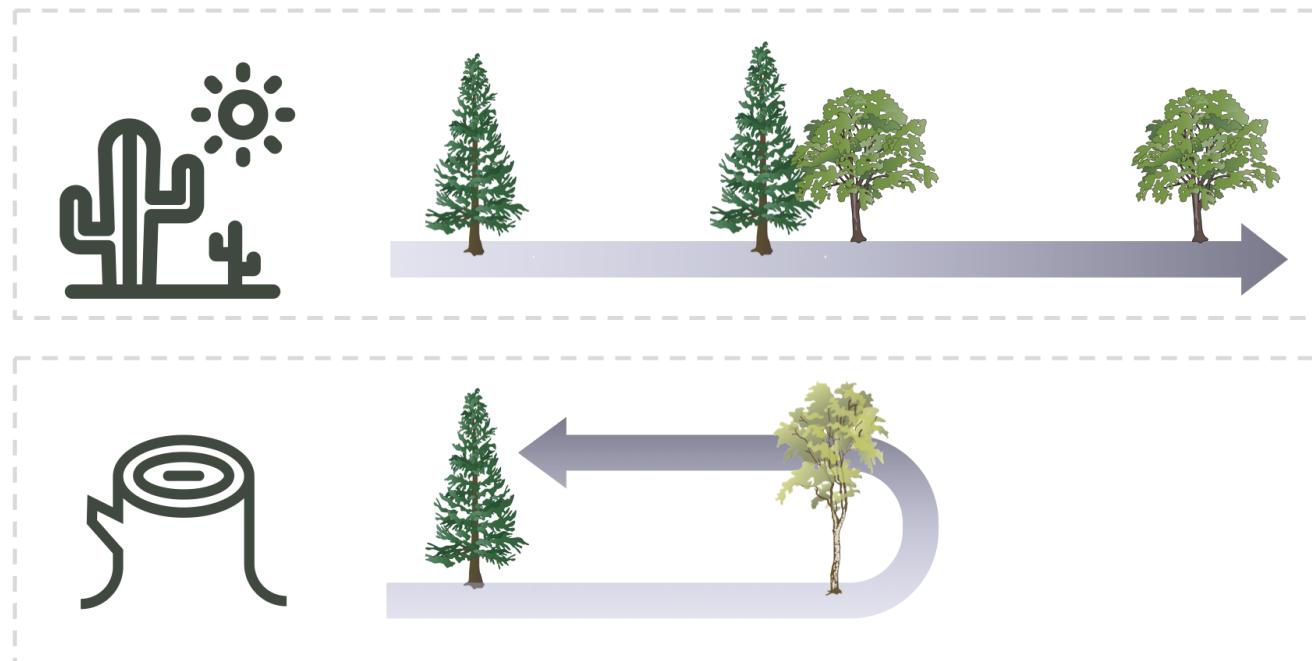
- ① Est-ce que la dynamique de transitions des forêts est influencée par le changement climatique récent?
- ② Est-ce que les perturbations peuvent accélérer certaines transitions?
- ③ Quel est l'impact de différentes intensités de perturbation sur l'équilibre potentiel et la dynamique transitoire ?



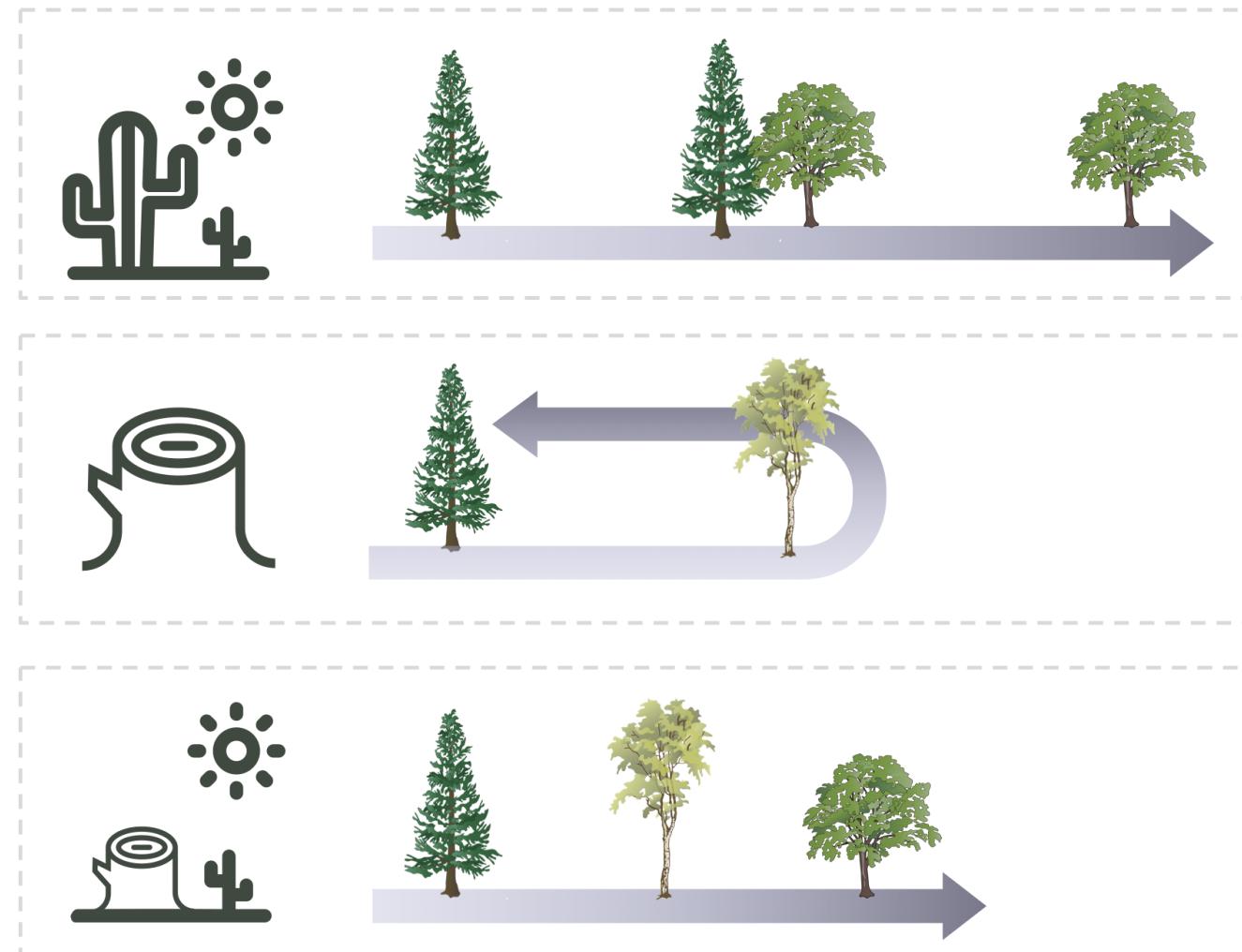
# Hypothèses



# Hypothèses



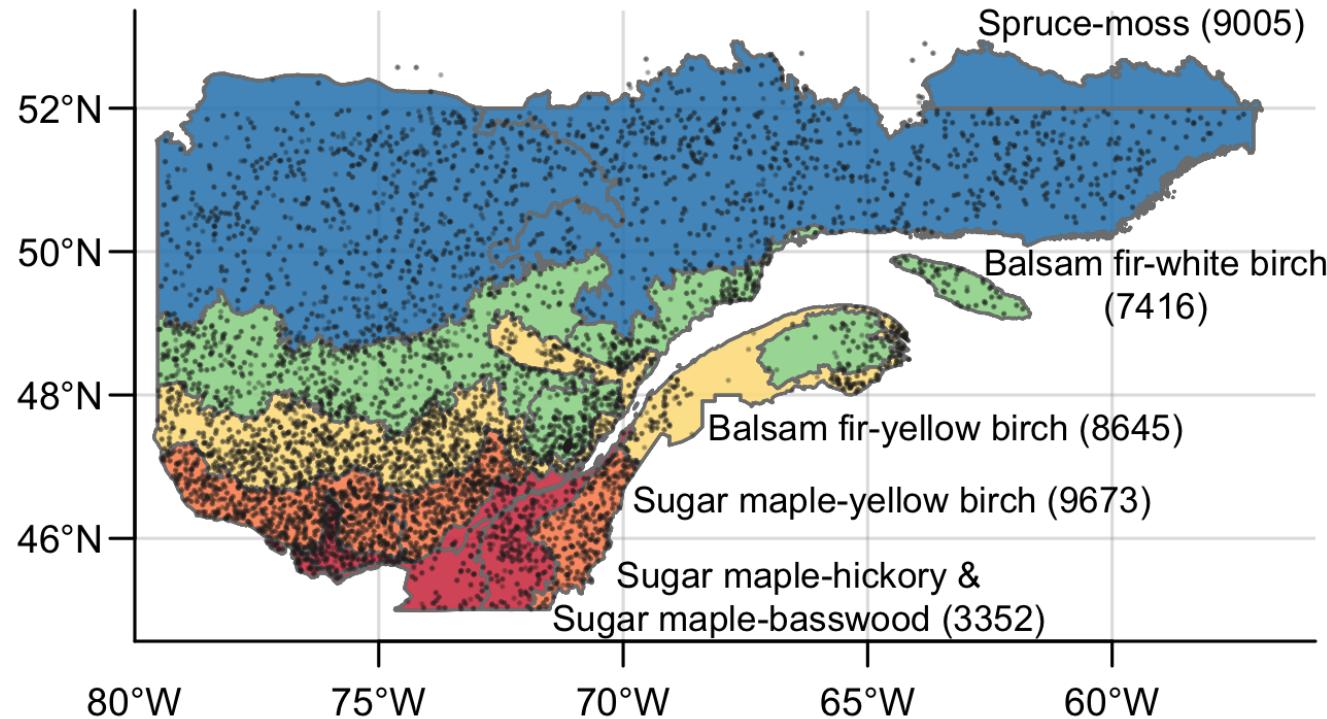
# Hypothèses



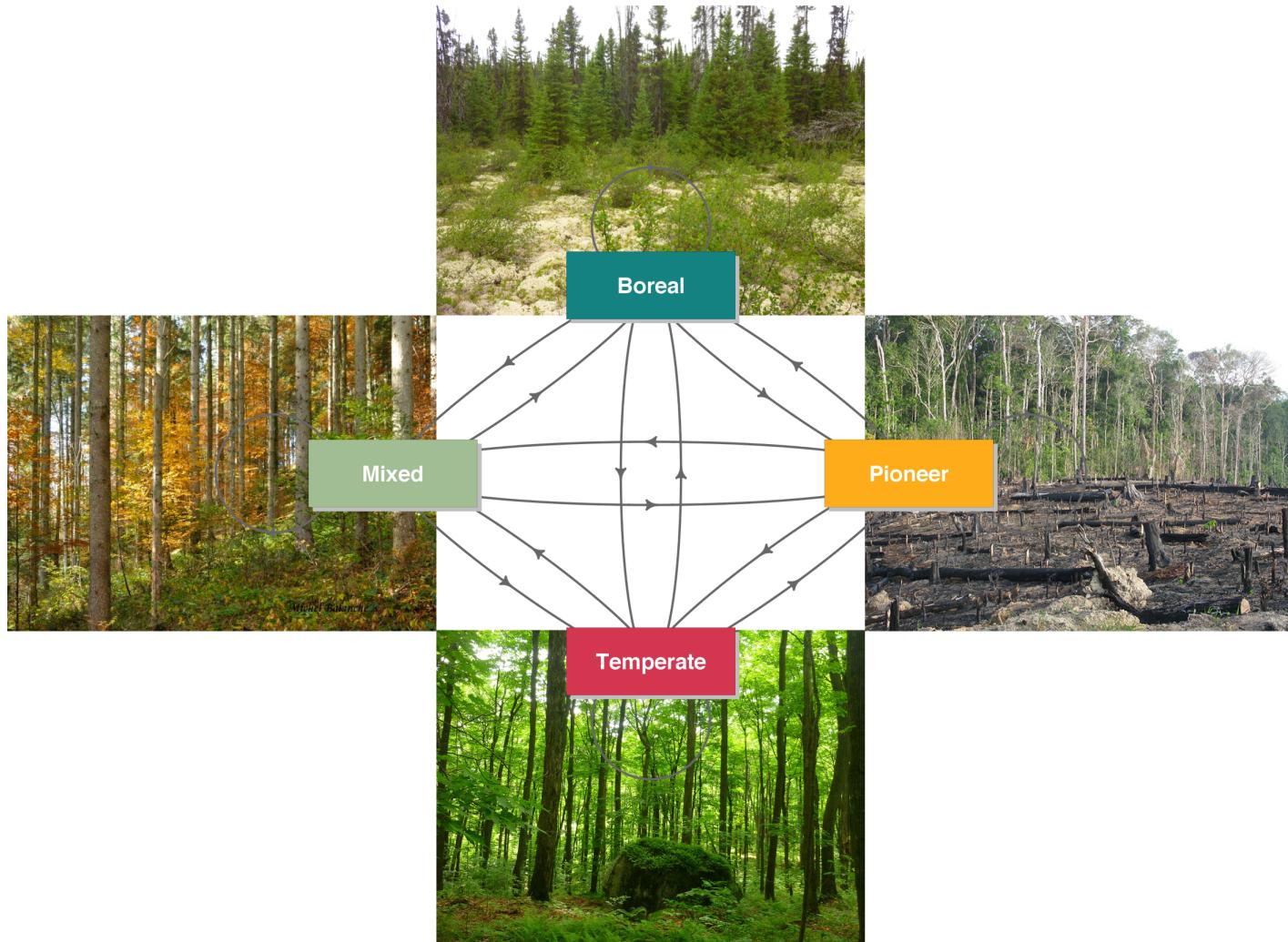
# Données

## Inventaires forestiers du Québec Méridional

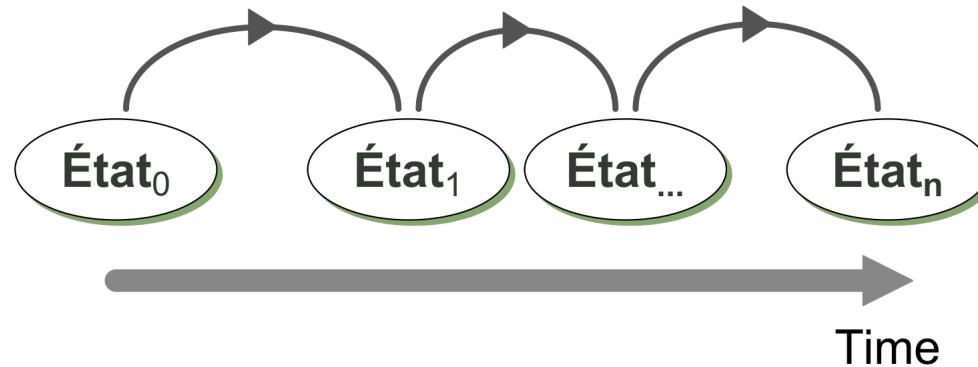
- 12000+ parcelles permanentes échantillonnées durant 5 grands inventaires entre 1970 et 2016 (par le MFFPQ)
- Sélection de 10,388 parcelles inventoriées au moins 2 fois chacune



# Données



## Modèle de Markov multi-états à temps continu



- Processus de Markov:
  - Les transitions dépendent de l'état actuel, pas des états antérieurs
- Temps continu:
  - intervalle de temps irrégulier, avec plusieurs transitions possibles durant un intervalle
  - le moment exact de la transition n'est pas connu

## Modèle de Markov multi-états à temps continu

Les transitions entre les états peuvent dépendre de l'environnement:

### Climat

 Température à  $t_{i-1}$

 Indice d'humidité climatique (CMI) à  $t_{i-1}$

### Perturbations

 Perturbations naturelles entre  $t_{i-1}$  et  $t_i$

 Coupes entre  $t_{i-1}$  et  $t_i$

### Sol

 pH du sol

 Drainage du sol

# Modèle

$$Q = \begin{pmatrix} -\sum_{s \neq B} q_{Bs} & q_{BM} & q_{BP} & 0 \\ q_{MB} & -\sum_{s \neq M} q_{Ms} & q_{MP} & q_{MT} \\ q_{PB} & q_{PM} & -\sum_{s \neq P} q_{Ps} & q_{PT} \\ 0 & q_{TM} & q_{TP} & -\sum_{s \neq T} q_{Ts} \end{pmatrix}$$

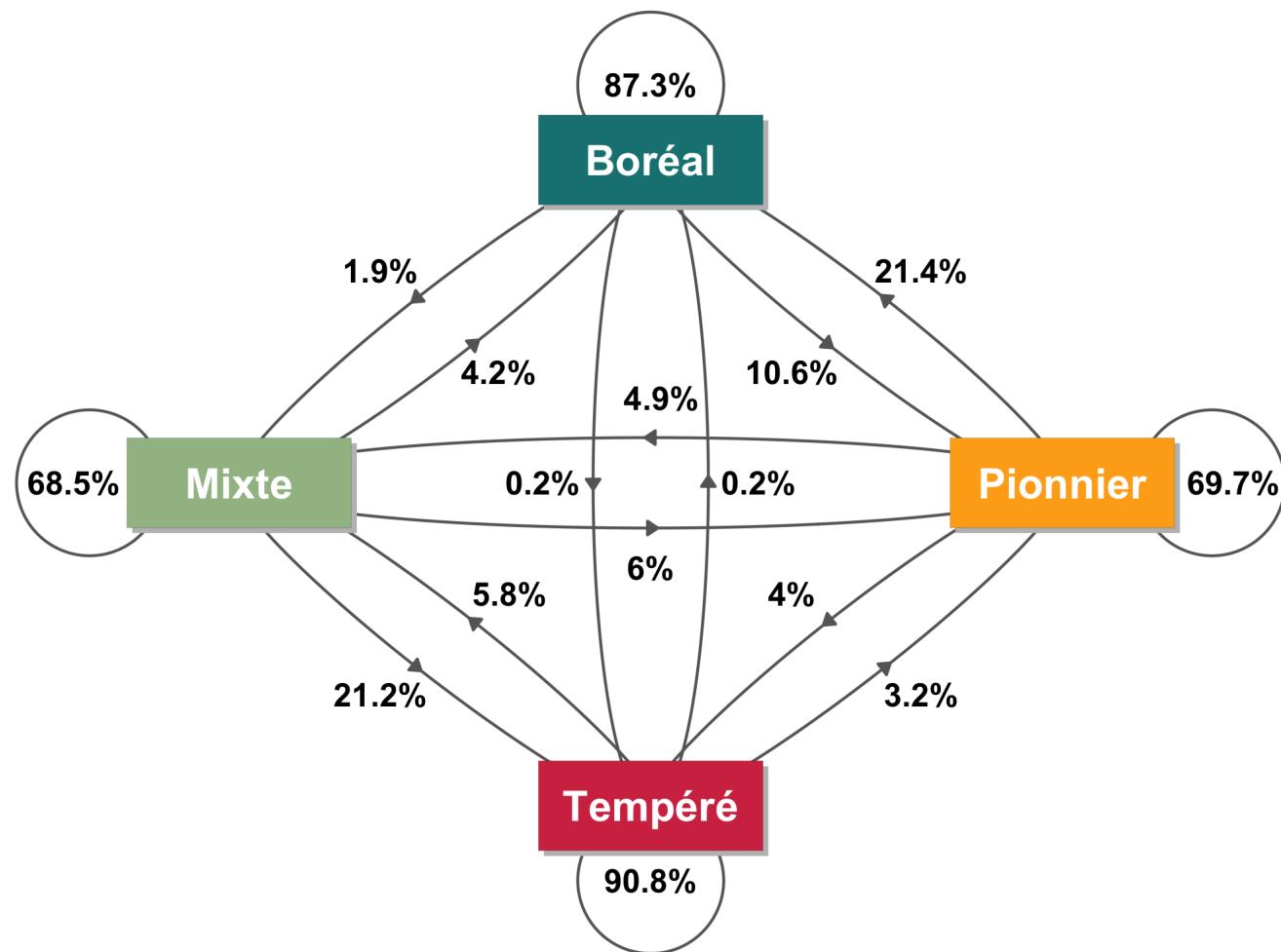
Pour les transitions entre tous les états sauf vers Pionnier:

$$q_{rs} = \text{baseline} \times \exp(\beta_c \times \text{climat} + \beta_p \times \text{perturbation} + \beta_s \times \text{sol})$$

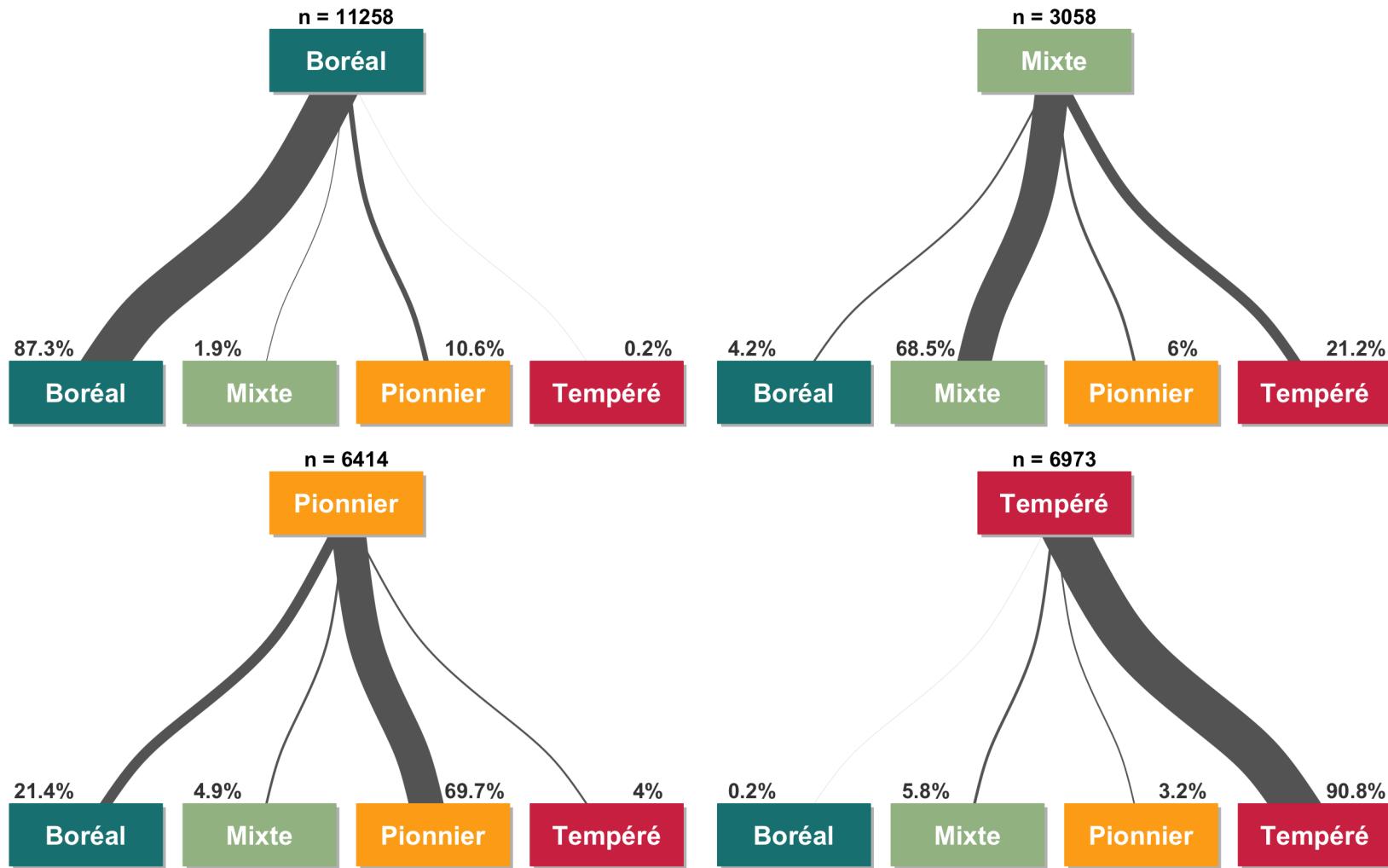
Pour les transitions vers Pionnier:

$$q_{rs} = \text{baseline} \times \exp(\beta_p \times \text{perturbation})$$

# Transitions observées

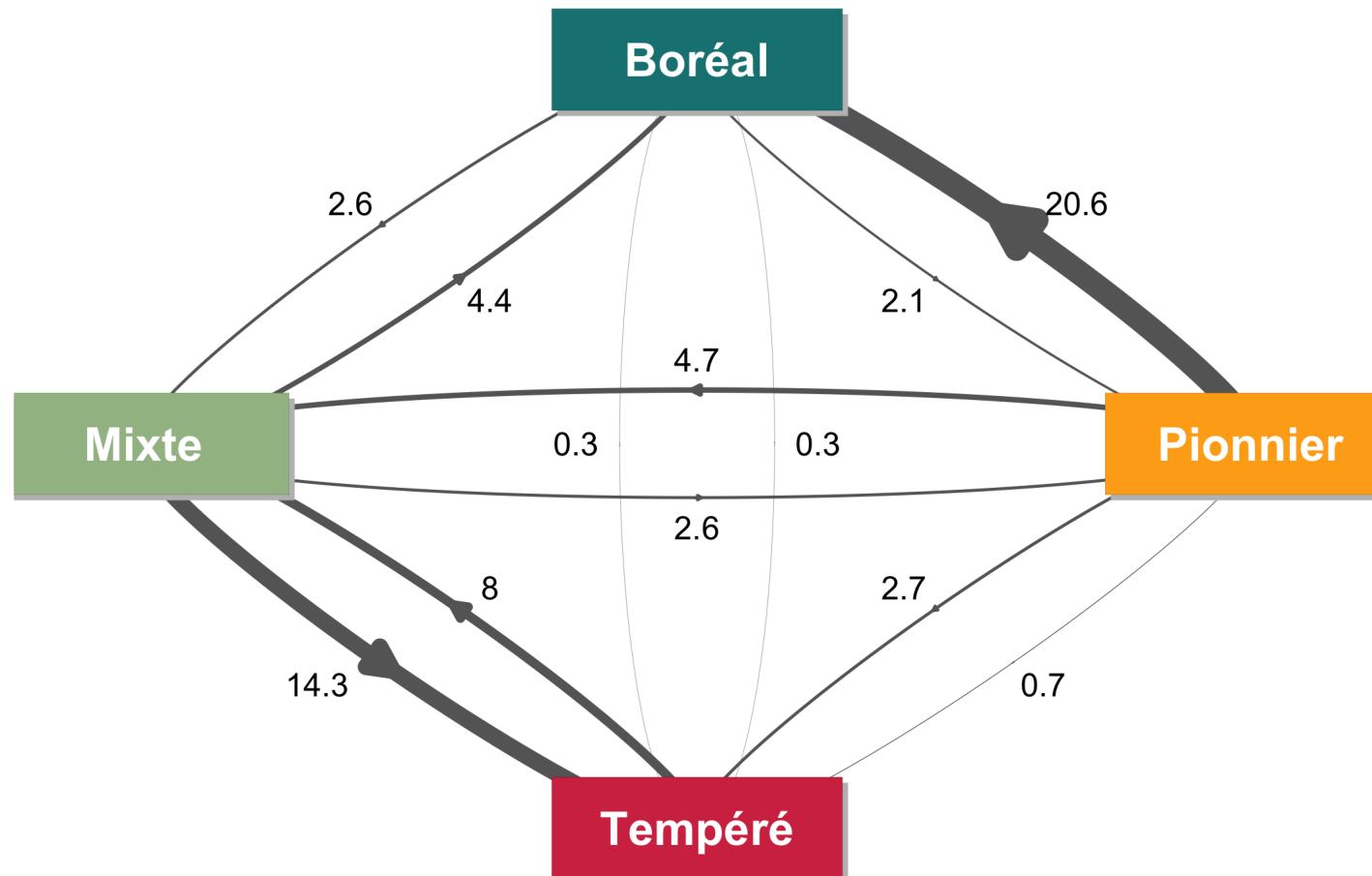


# Transitions observées



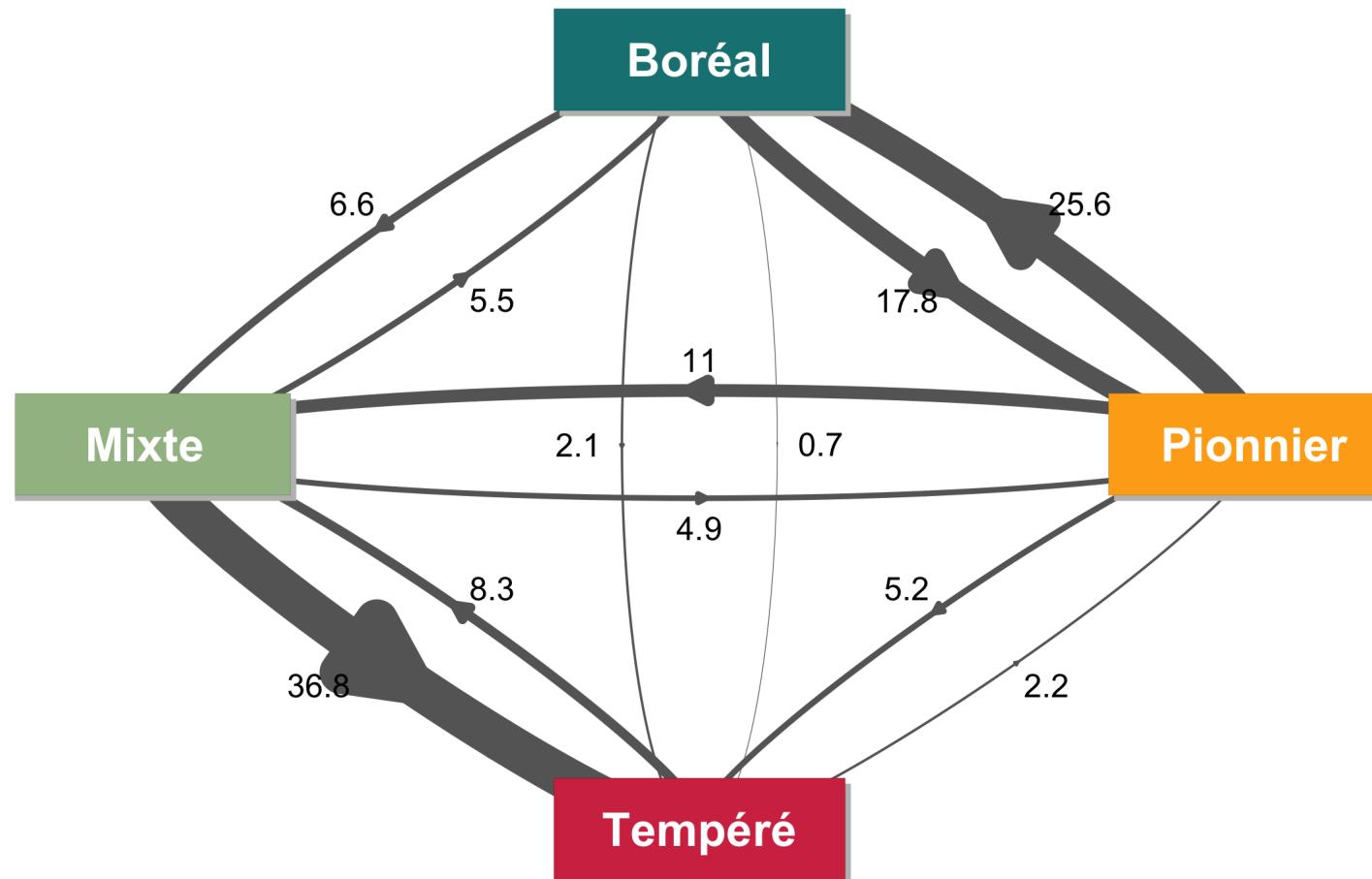
# Probabilités de transitions

Coupe mineure ou absente



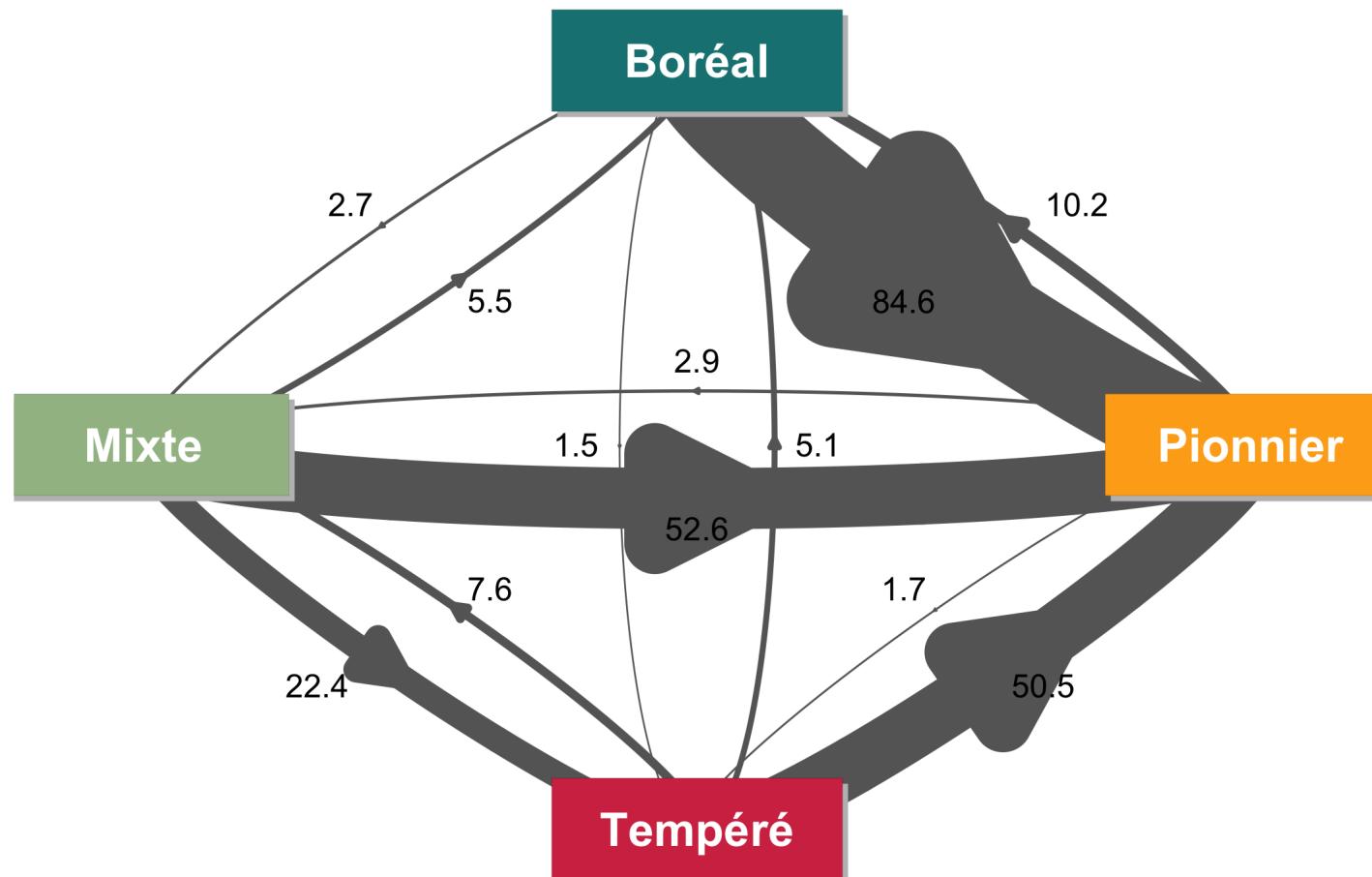
# Probabilités de transitions

## Coupes modérées



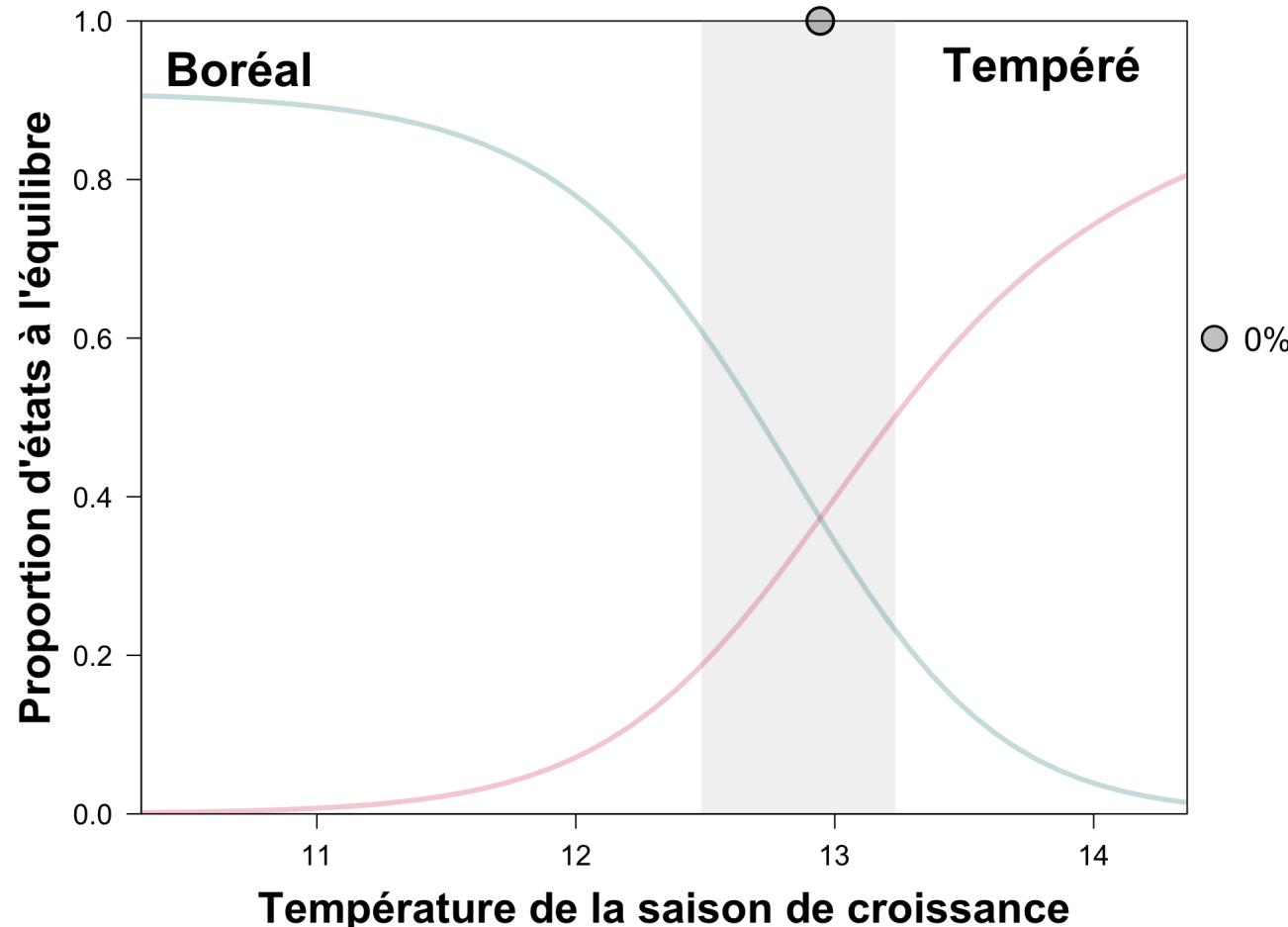
# Probabilités de transitions

## Coupes majeures



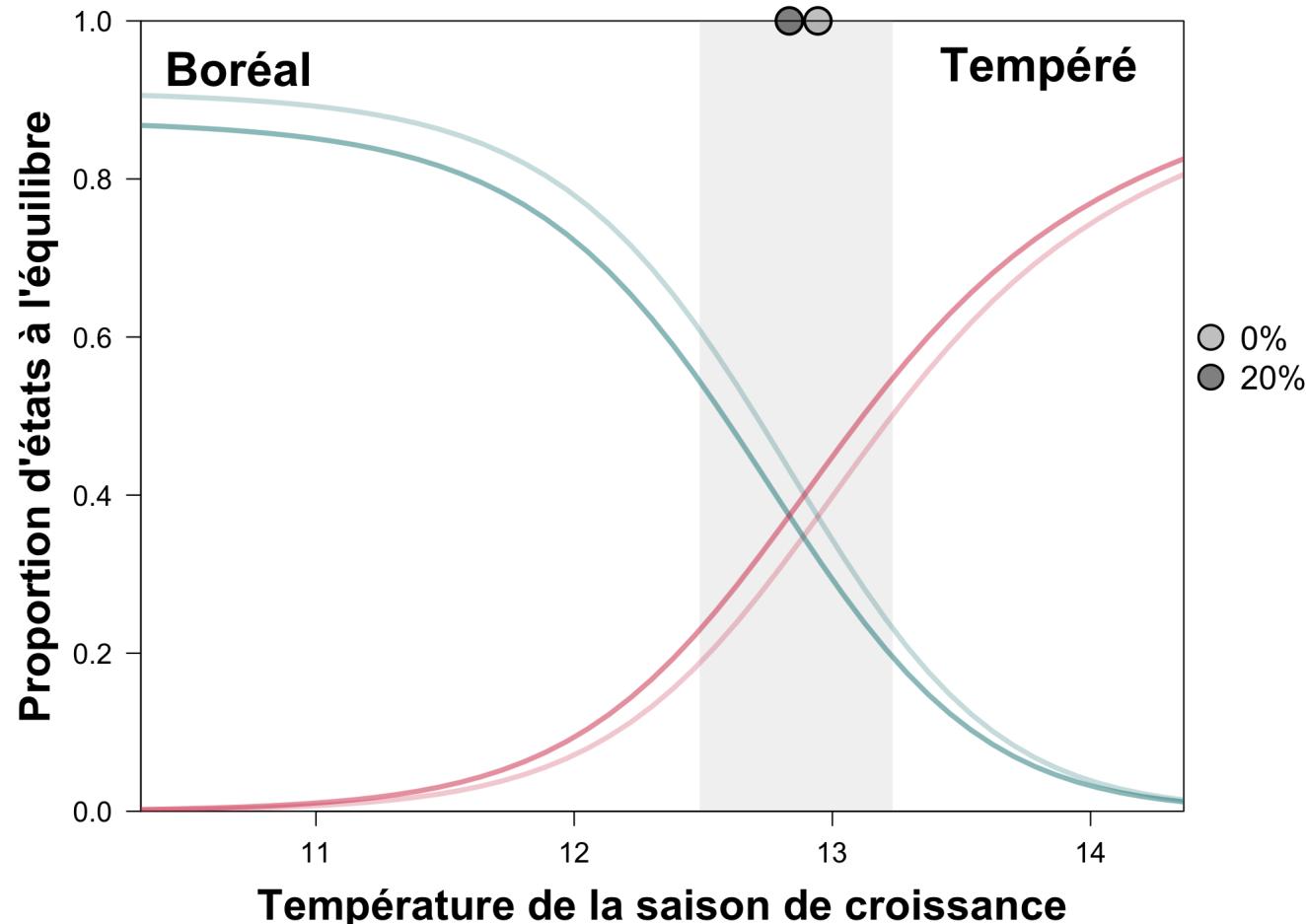
# Proportion potentielle à l'équilibre

Différentes fréquences de coupes modérées



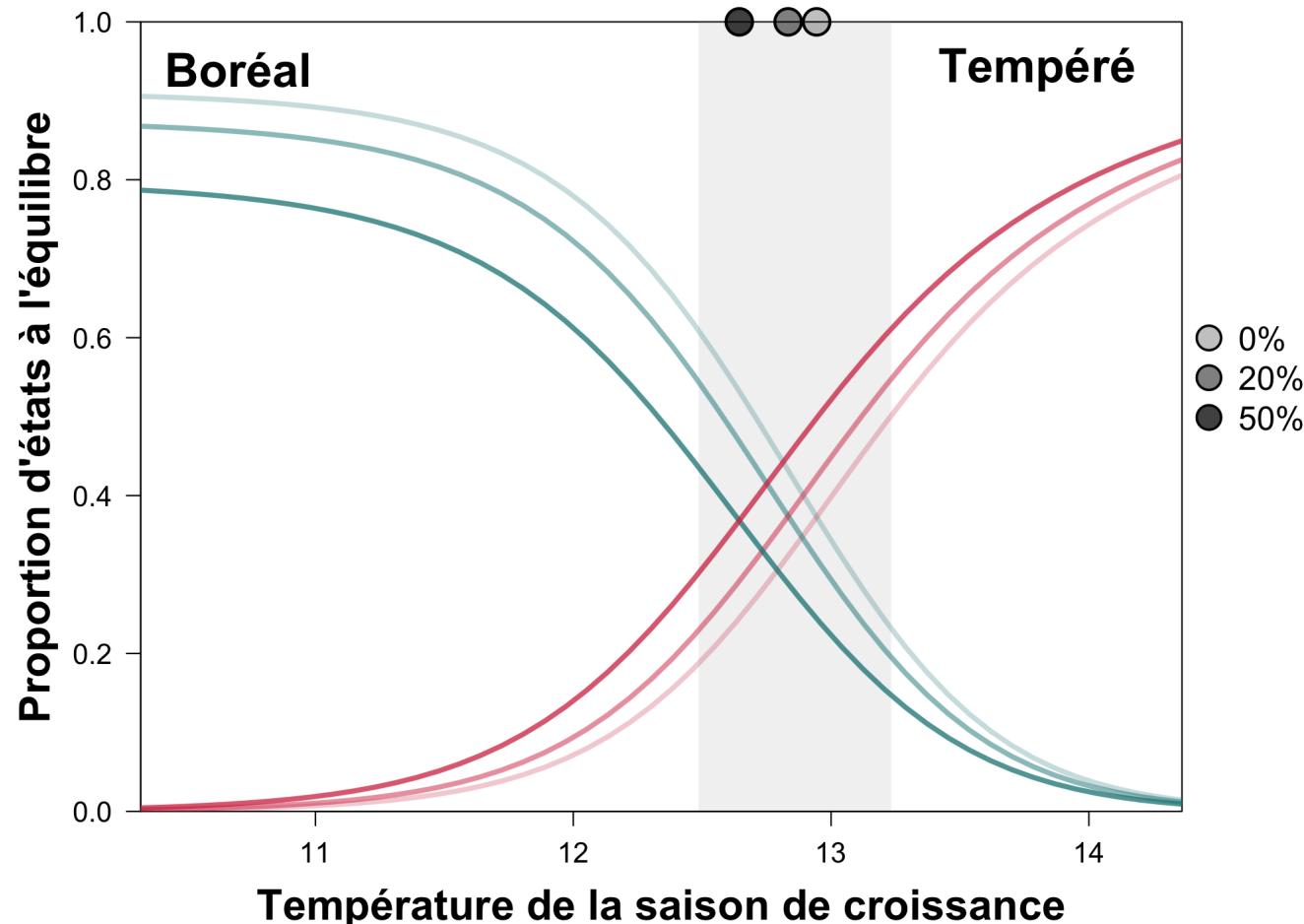
# Proportion potentielle à l'équilibre

Différentes fréquences de coupes modérées



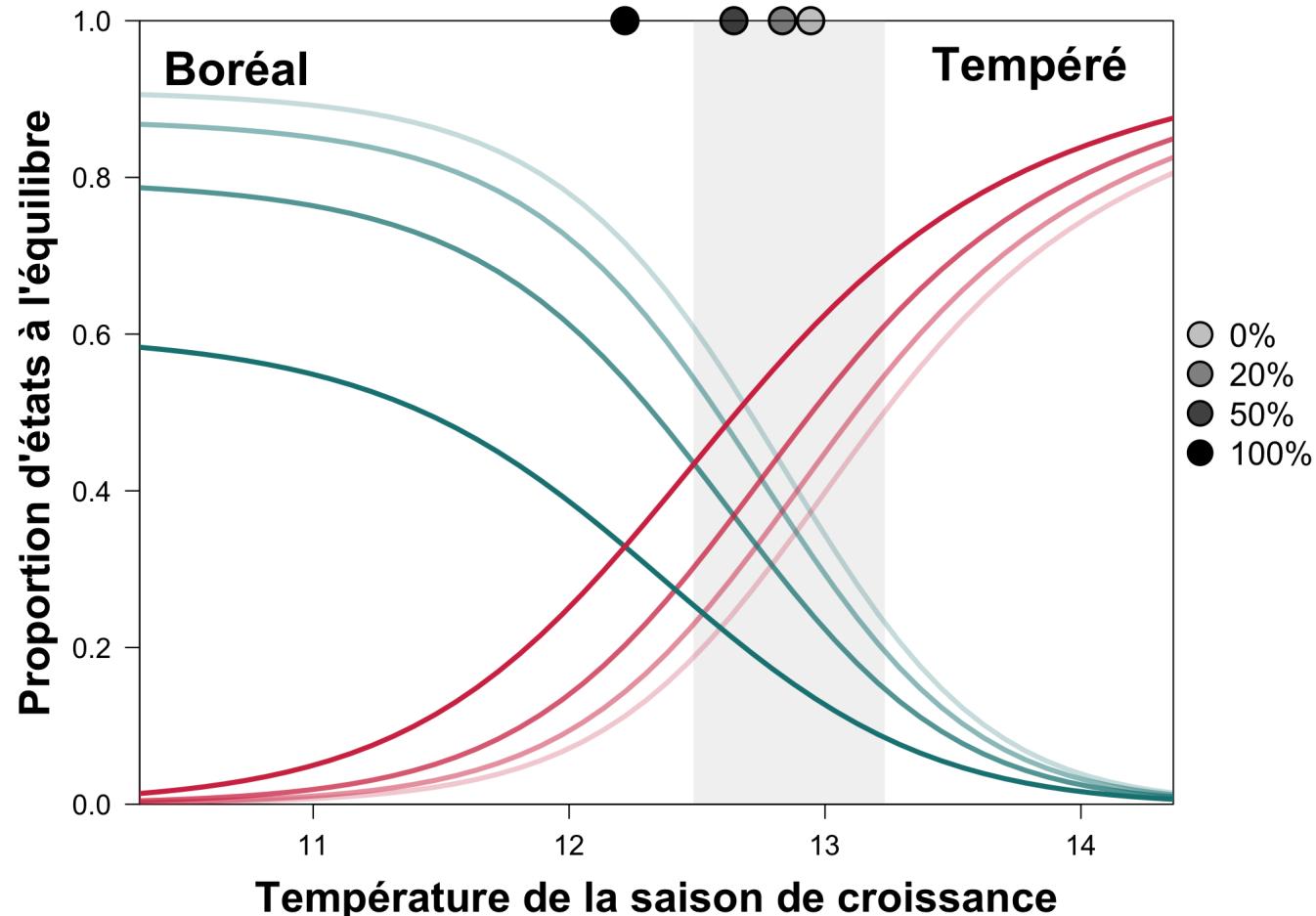
# Proportion potentielle à l'équilibre

Différentes fréquences de coupes modérées



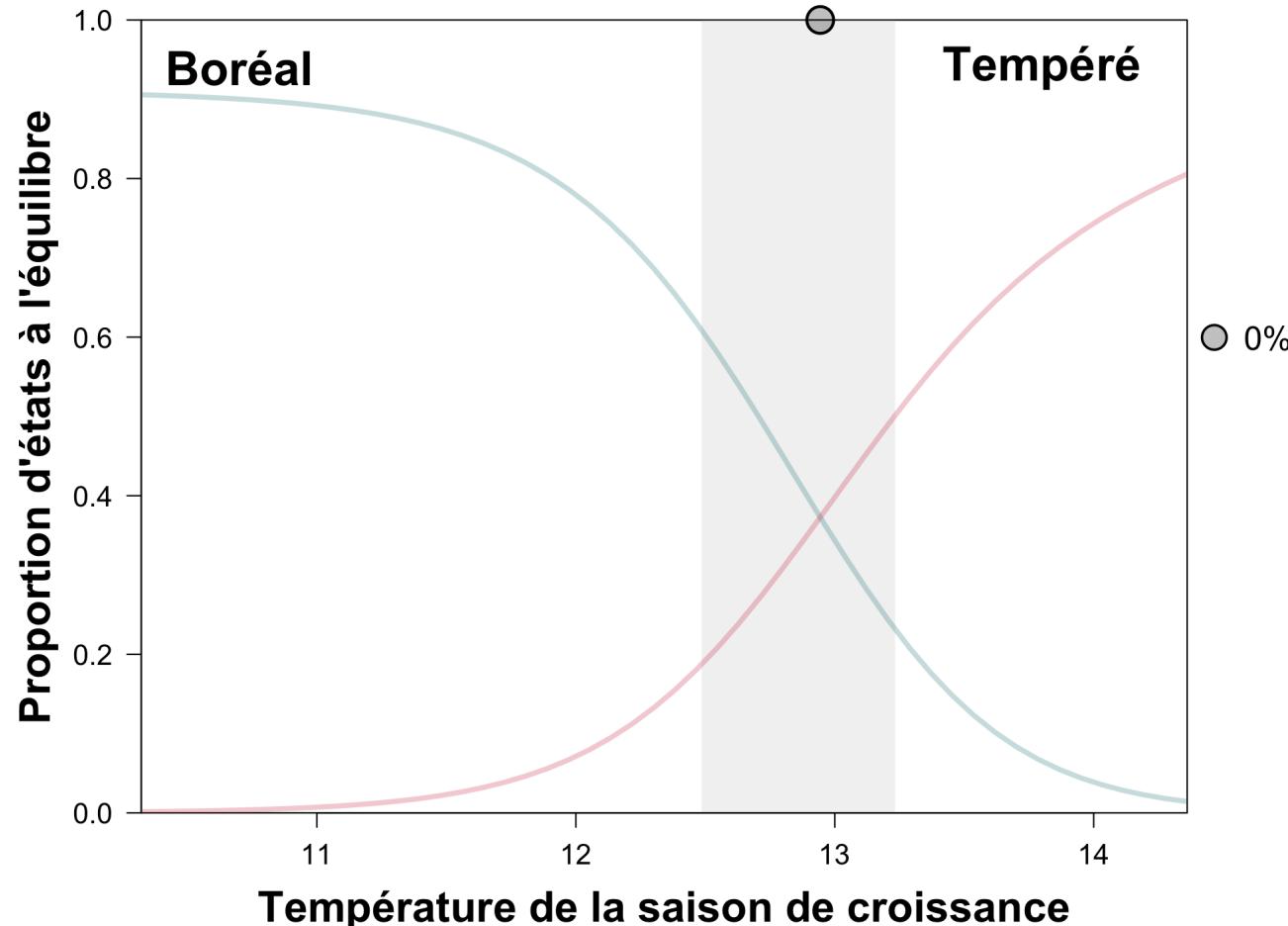
# Proportion potentielle à l'équilibre

Différentes fréquences de coupes modérées



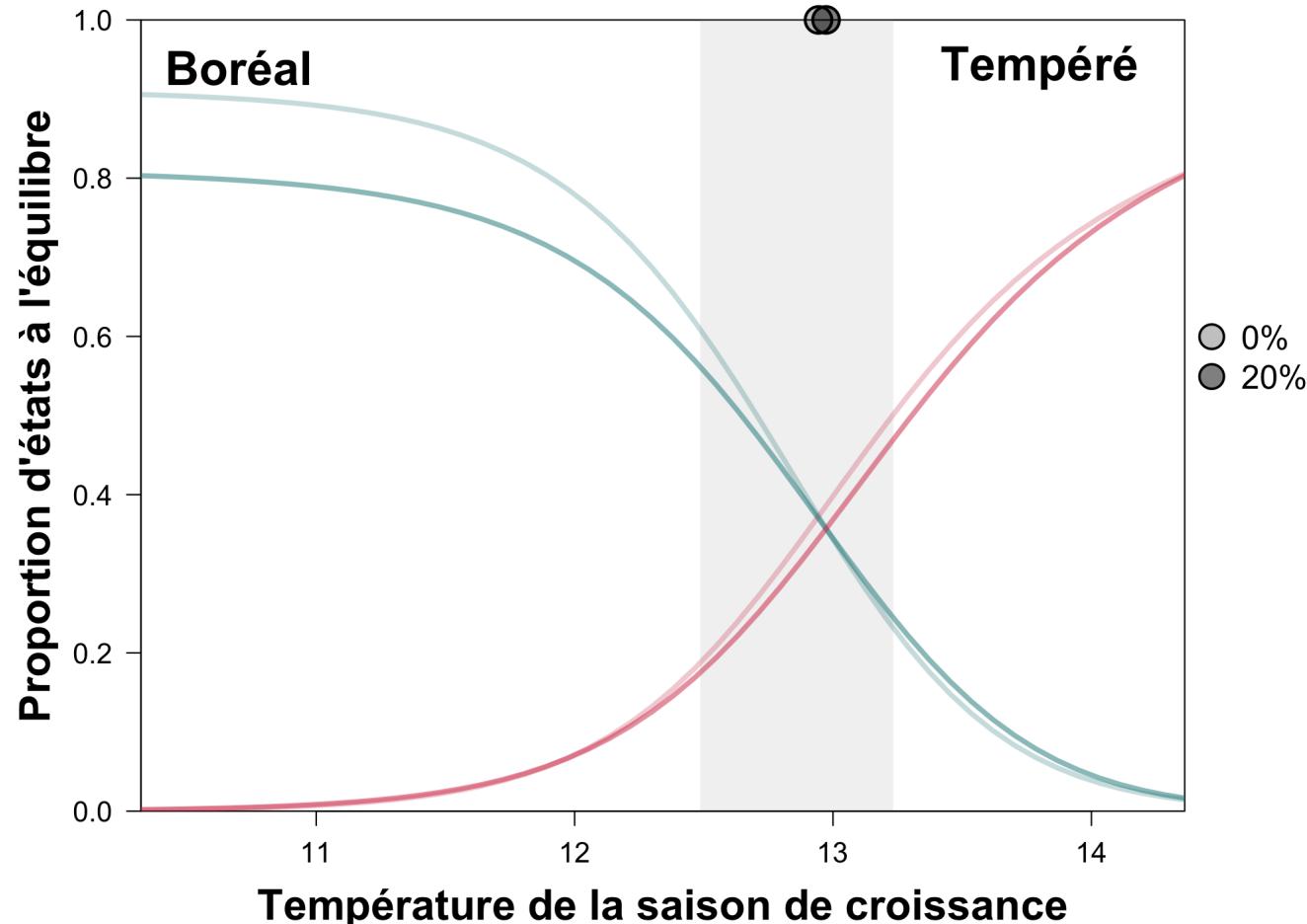
# Proportion potentielle à l'équilibre

Différentes fréquences de coupes majeures



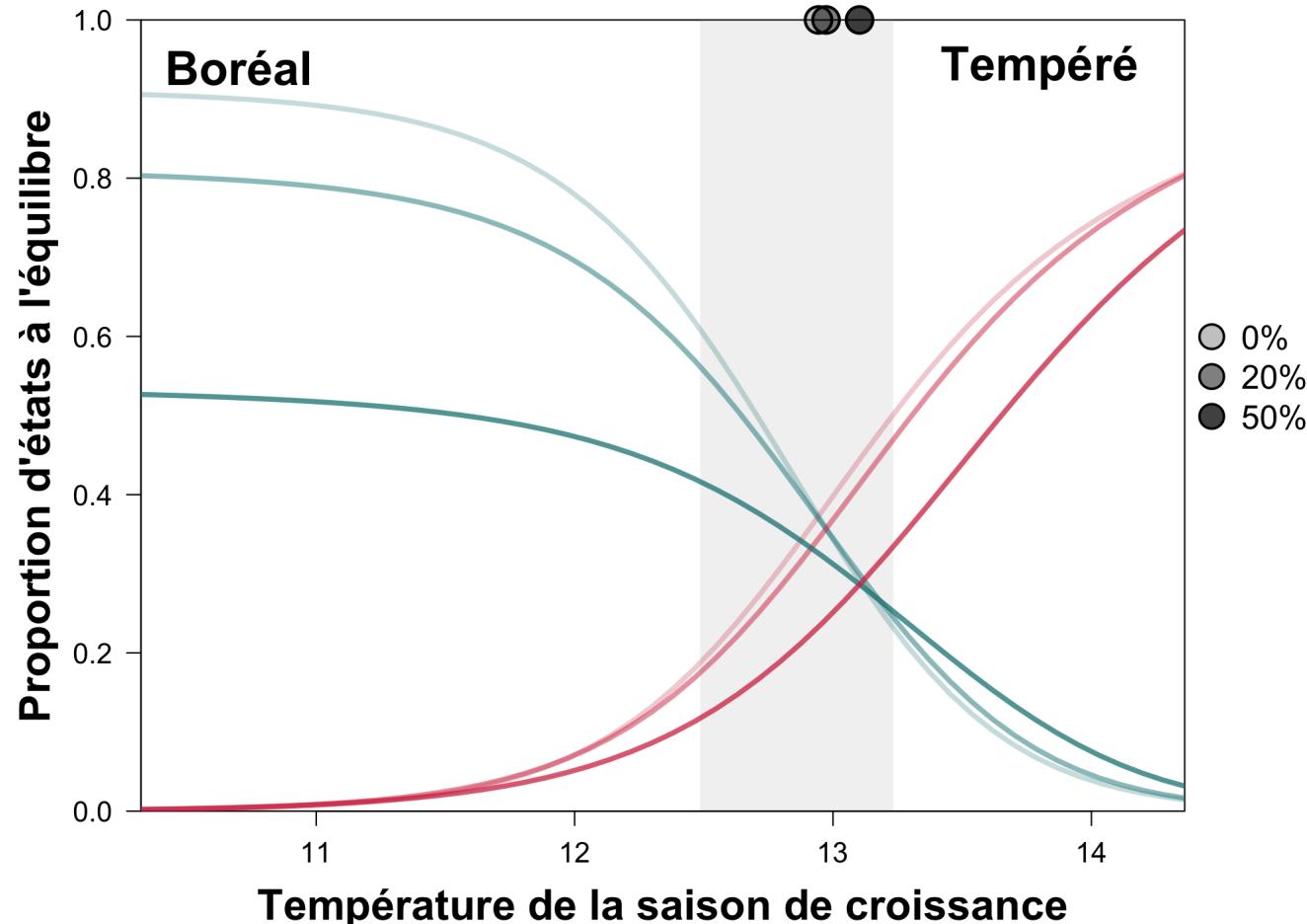
# Proportion potentielle à l'équilibre

Différentes fréquences de coupes majeures



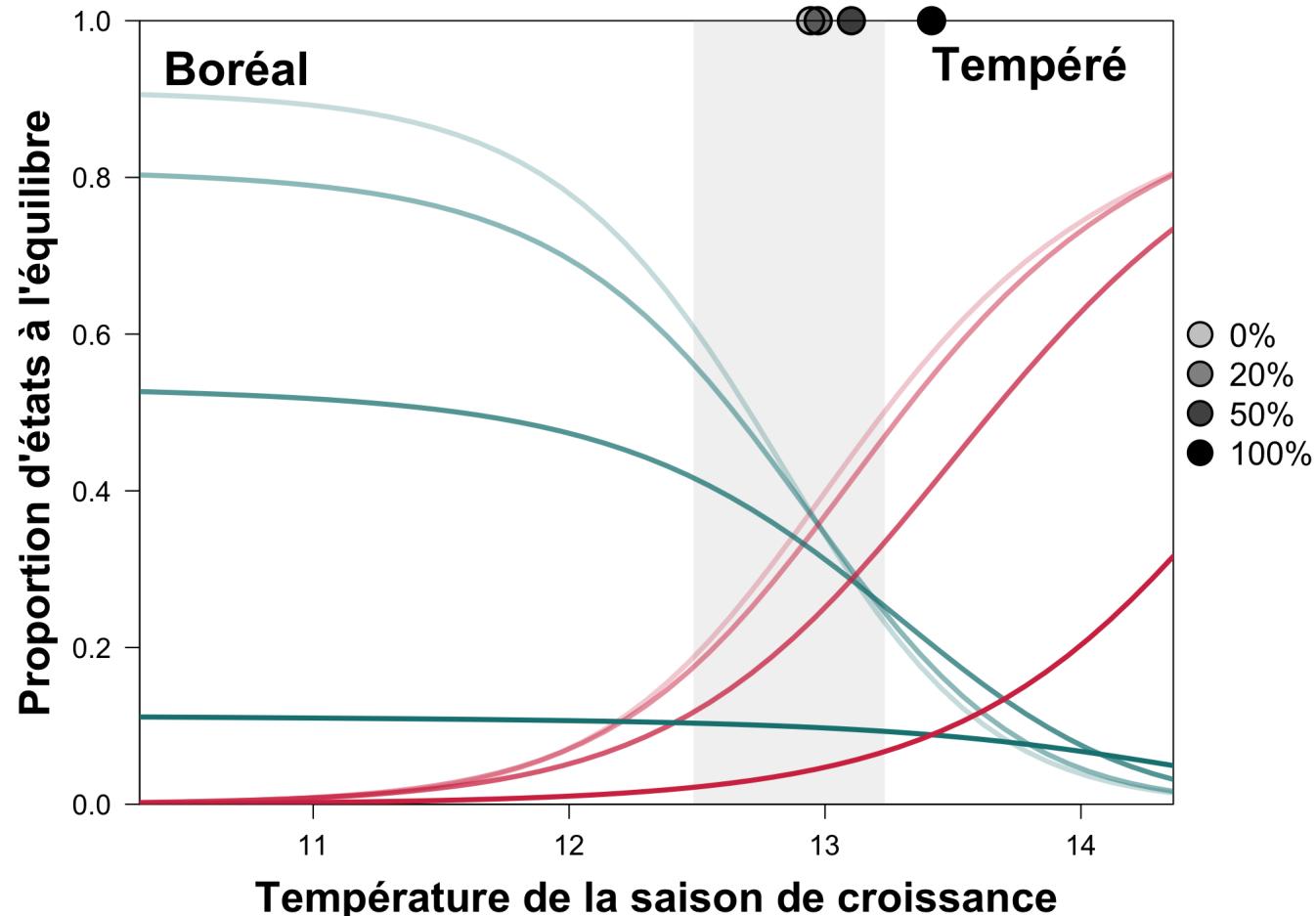
# Proportion potentielle à l'équilibre

Différentes fréquences de coupes majeures

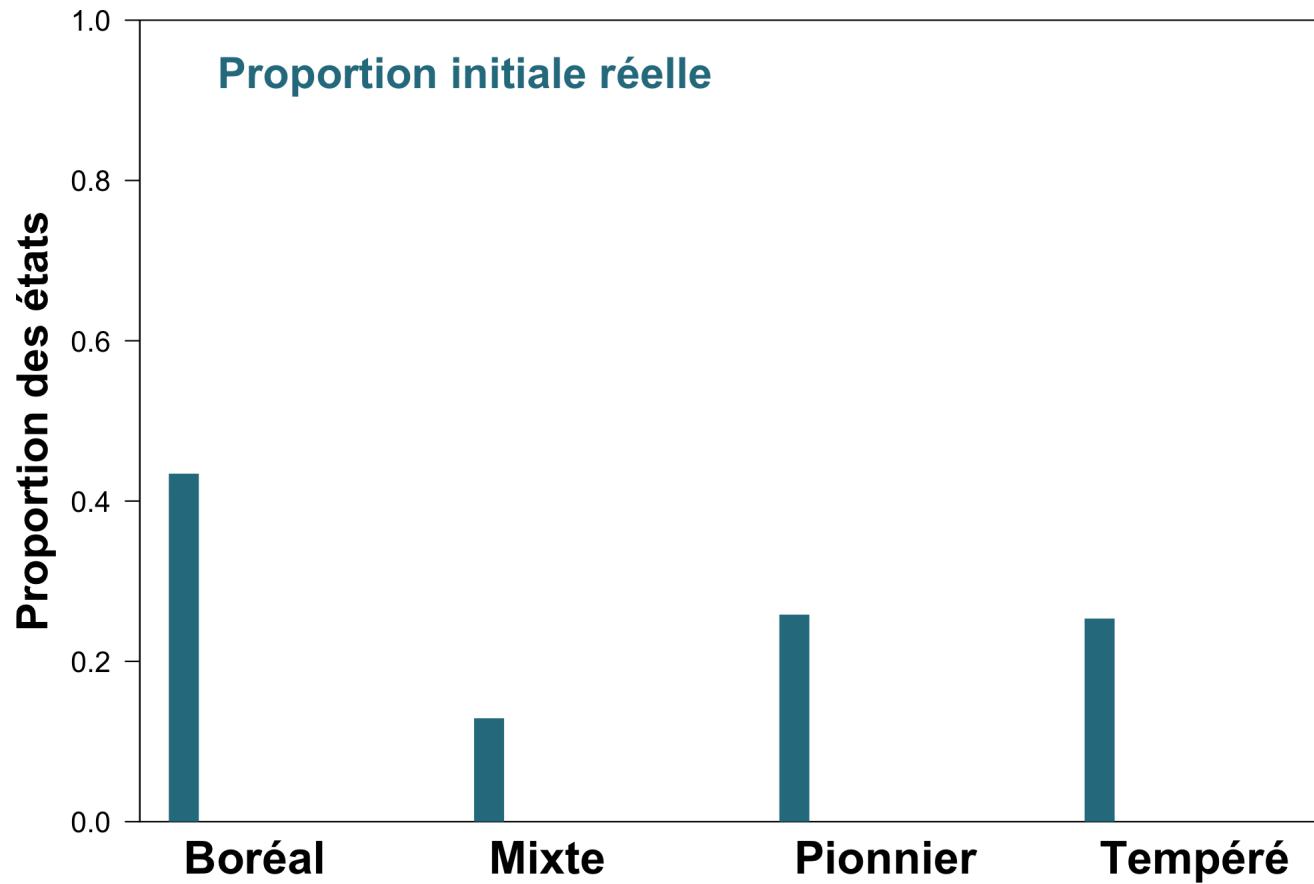


# Proportion potentielle à l'équilibre

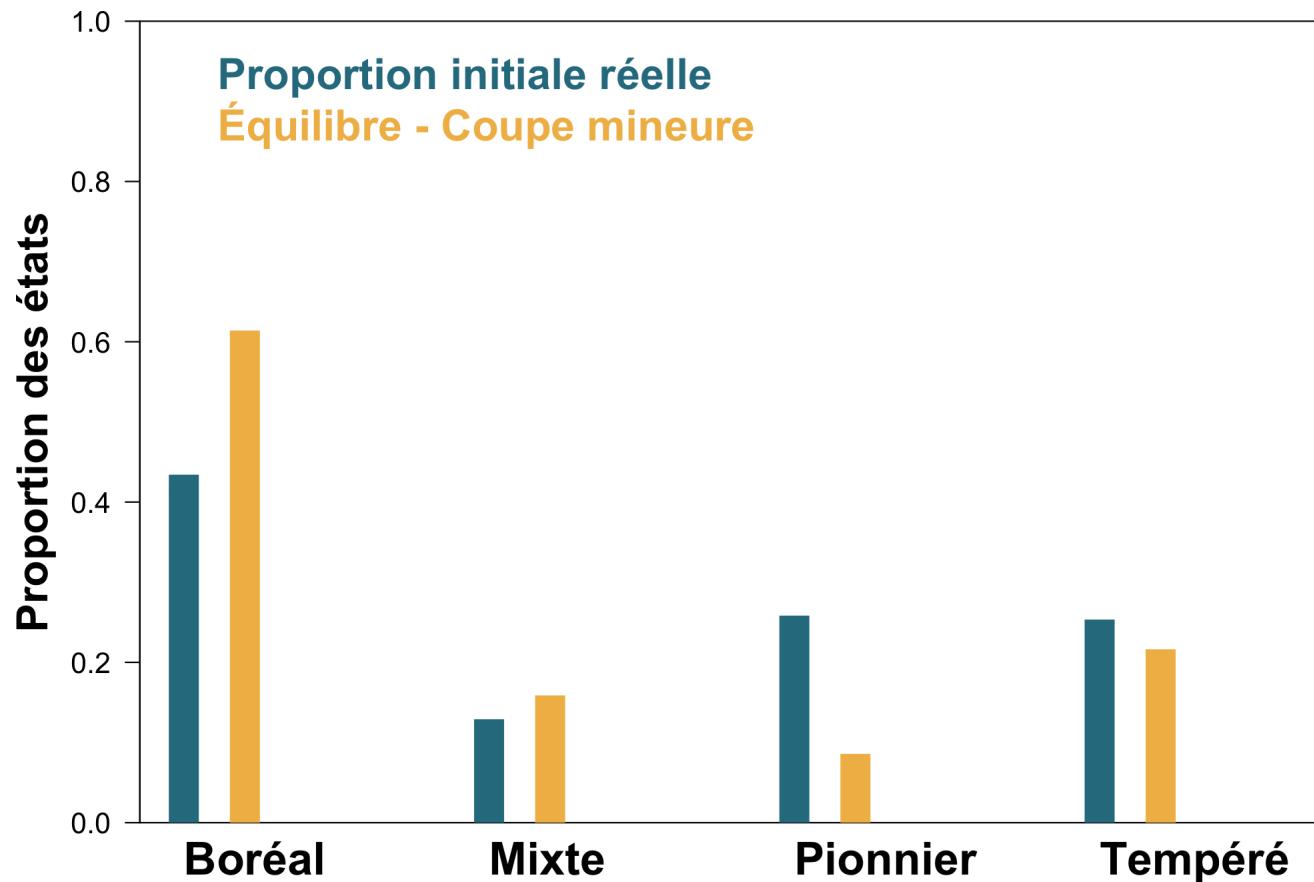
Différentes fréquences de coupes majeures



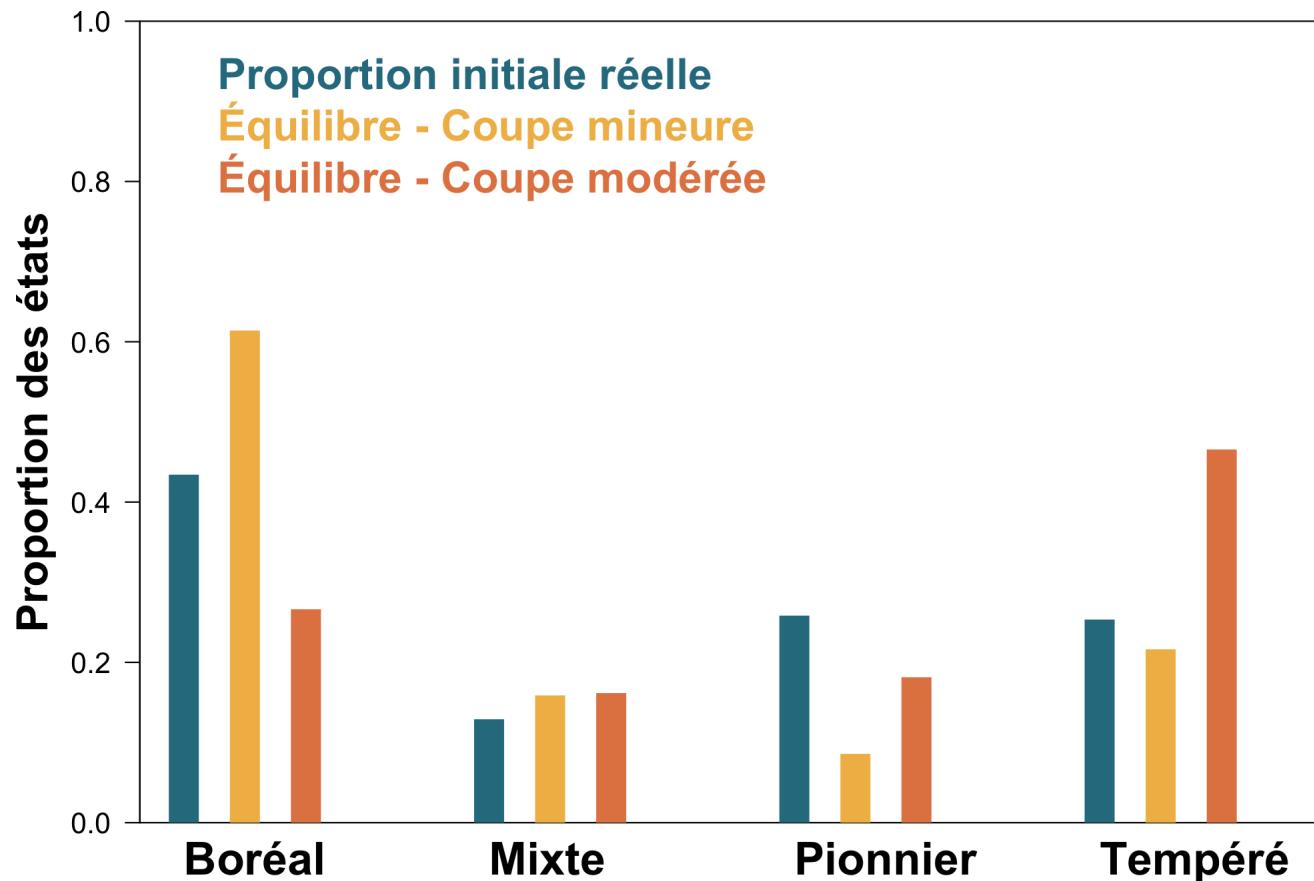
# Proportion potentielle à l'équilibre



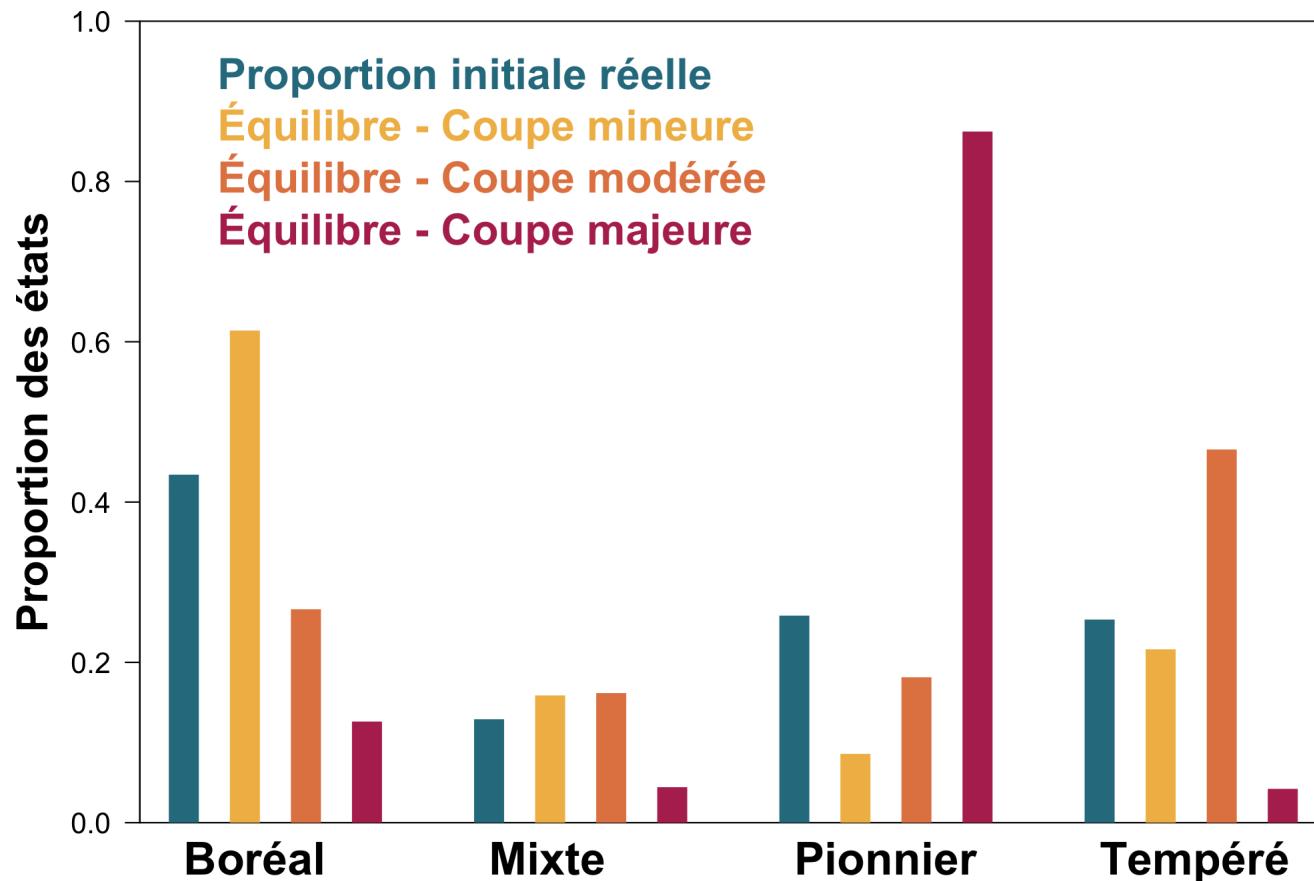
# Proportion potentielle à l'équilibre



# Proportion potentielle à l'équilibre



# Proportion potentielle à l'équilibre



# Dynamique transitoire

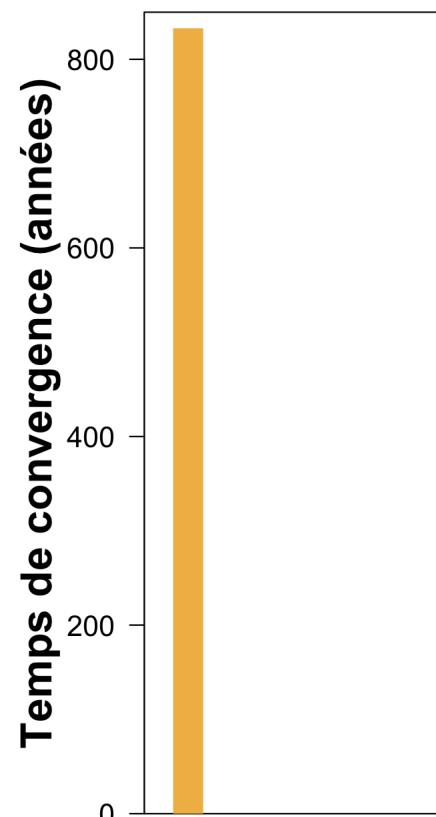
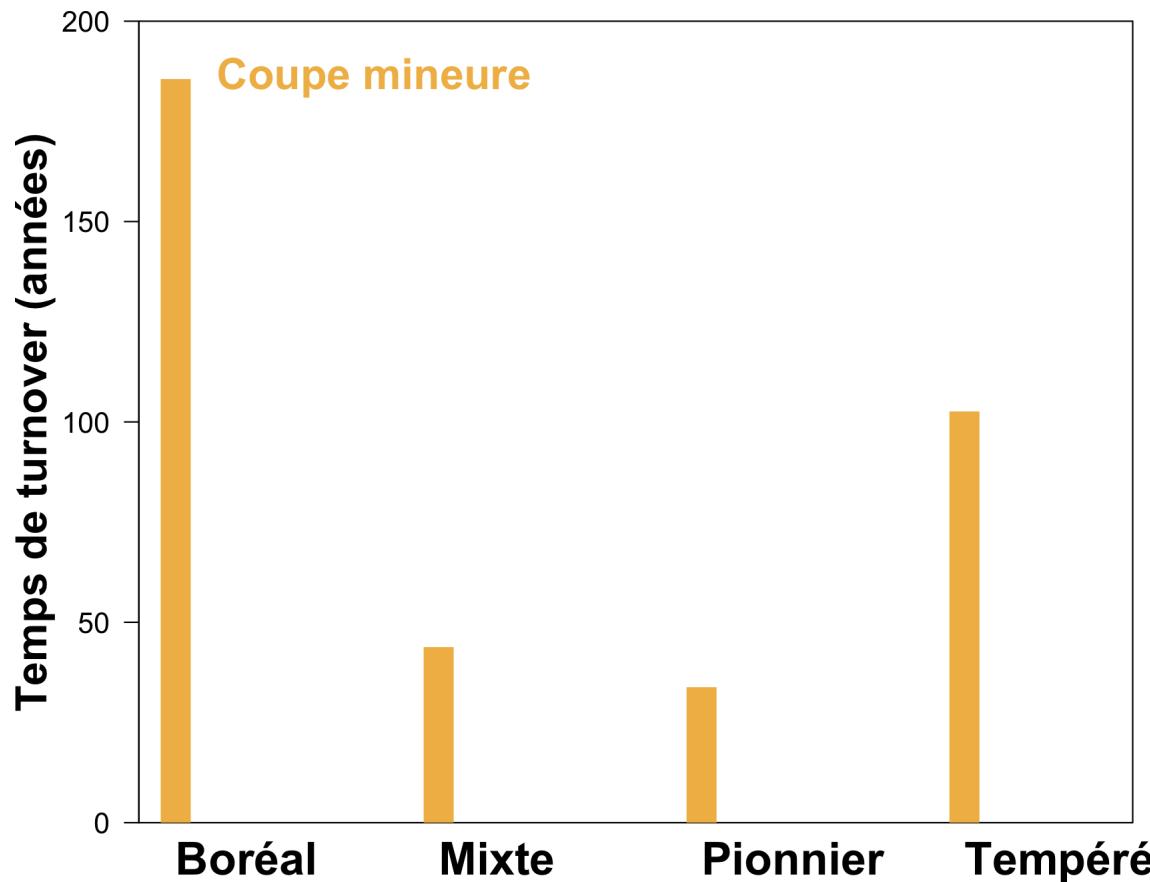
Temps de turnover → temps de séjour dans un état avant de faire une transition

Temps de convergence → temps pour atteindre 90% de l'équilibre

# Dynamique transitoire

Temps de turnover → temps de séjour dans un état avant de faire une transition

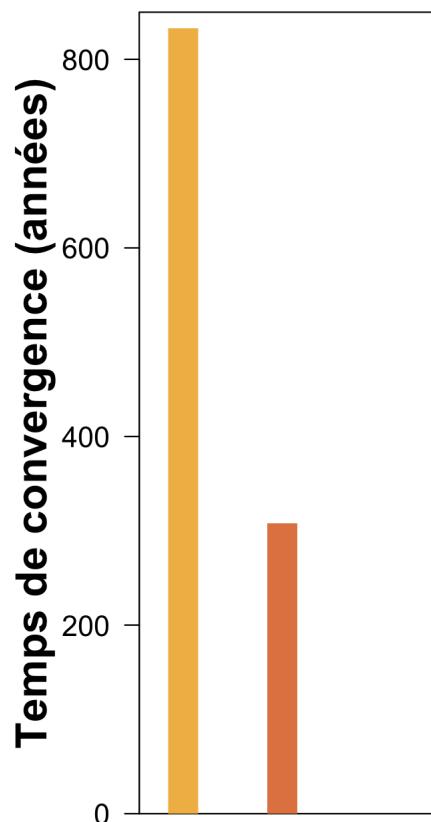
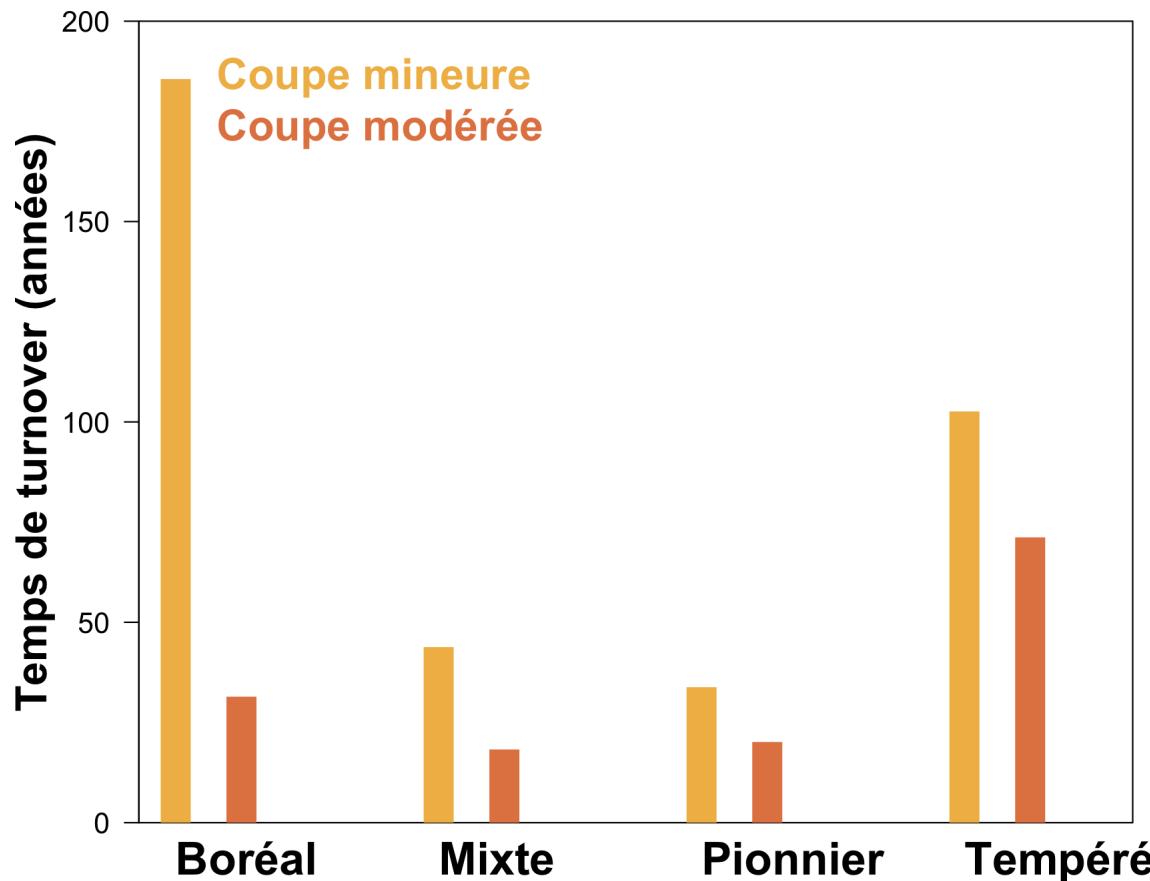
Temps de convergence → temps pour atteindre 90% de l'équilibre



# Dynamique transitoire

Temps de turnover → temps de séjour dans un état avant de faire une transition

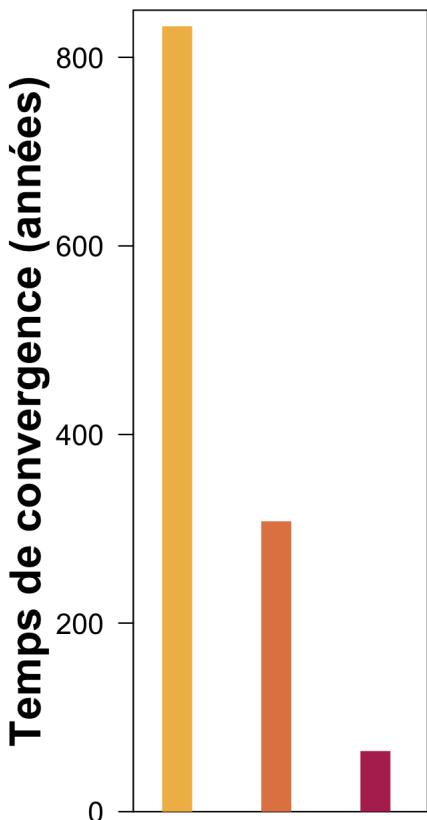
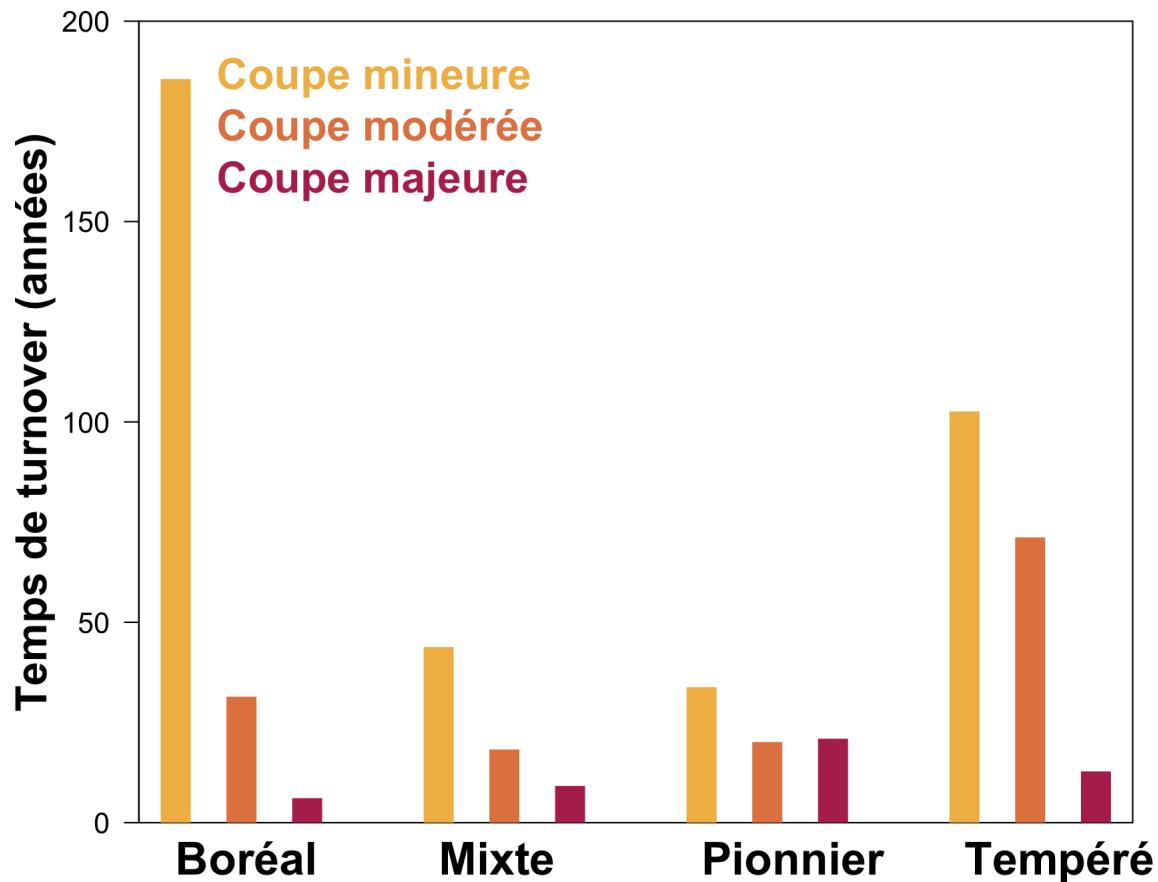
Temps de convergence → temps pour atteindre 90% de l'équilibre



# Dynamique transitoire

Temps de turnover → temps de séjour dans un état avant de faire une transition

Temps de convergence → temps pour atteindre 90% de l'équilibre



# Conclusions

- ① Est-ce que la dynamique de transitions des forêts est influencée par le changement climatique récent?

Oui, mais difficilement sans perturbations.

- ② Est-ce que les perturbations peuvent accélérer certaines transitions?

Oui. Les perturbations modérées, pas majeures, favorisent les transitions Mixte-Tempéré et Boréal-Mixte.

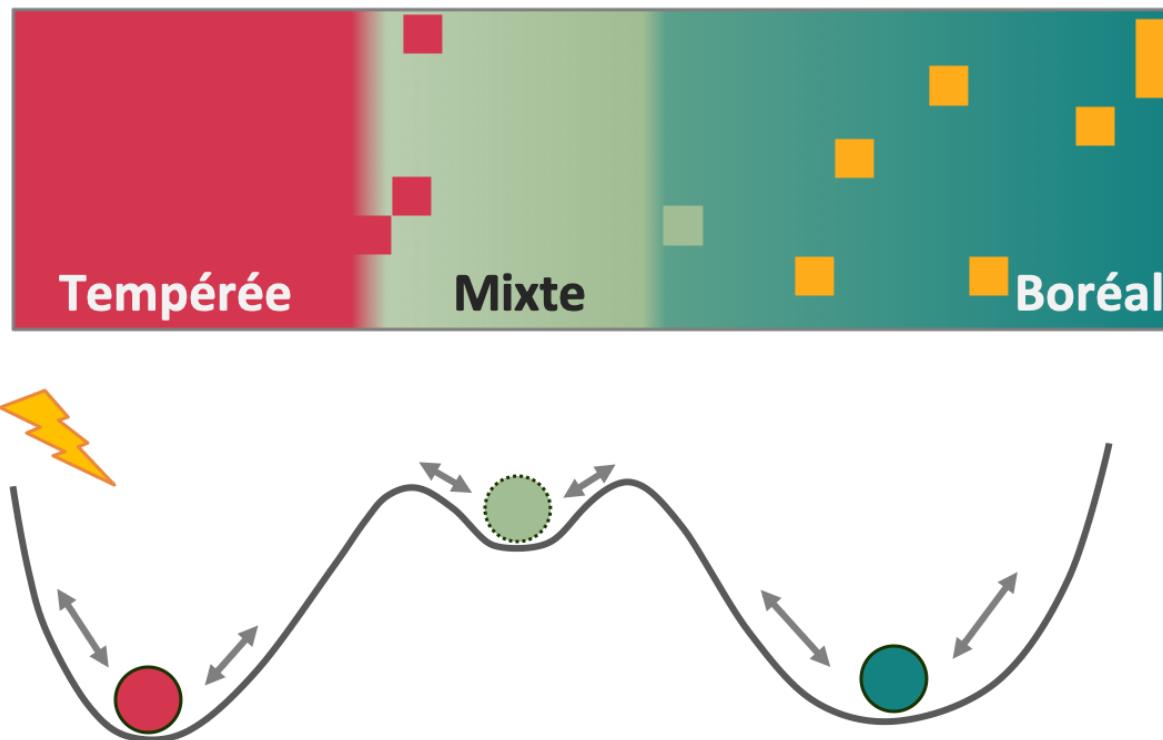
- ③ Quel est l'impact de différentes intensités de perturbation sur l'équilibre et la dynamique transitoire ?

Les perturbations modérées, pas majeures, tendent à faire augmenter la proportion de Tempéré à l'équilibre, déplaçant l'écotone vers le nord.

Les perturbations modérées, pas majeures, accélèrent la dynamique transitoire.

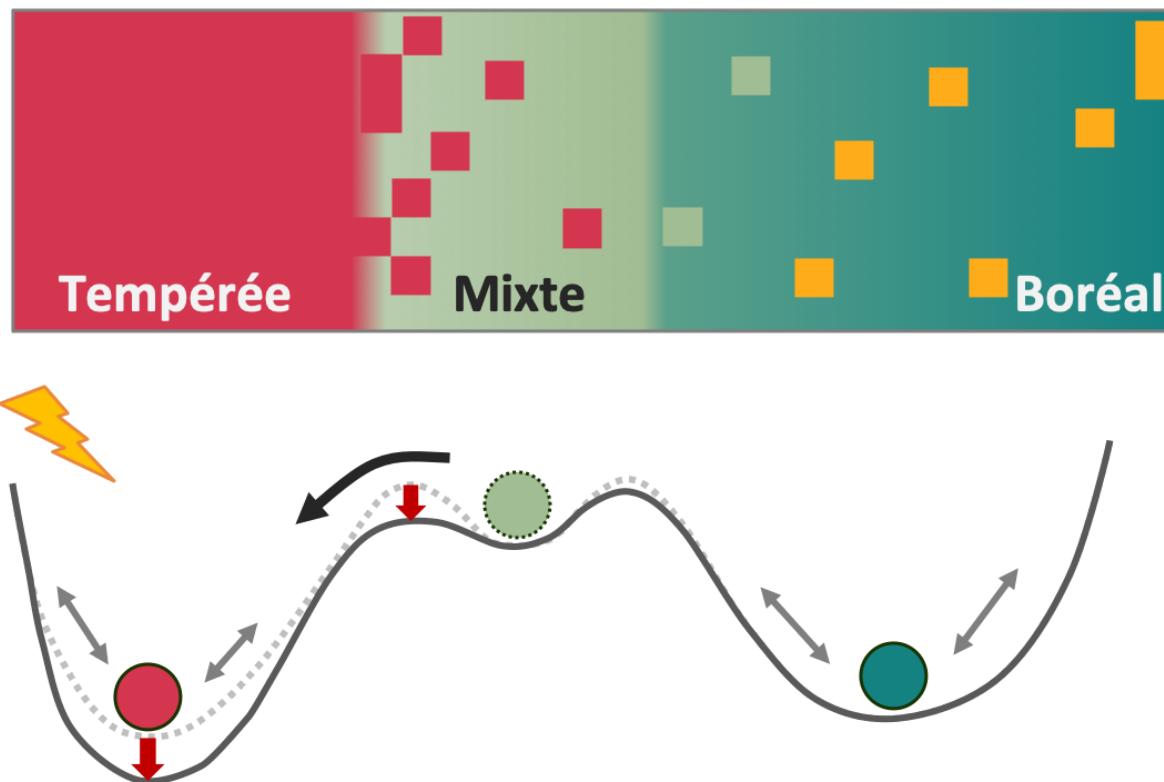
# Conclusions

États alternatifs stables sans changements climatiques



# Conclusions

États alternatifs stables avec changements climatiques



# Résultats du modèle msm

