

Impacts des changements climatiques sur la forêt boréale en relation avec les perturbations naturelles : Approche de modélisation avec LPJ-LMfire



Emeline Chaste

Ph.D.

Sciences de l'environnement (UQAM)

Systèmes intégrés, environnement et biodiversité (EPHE)

Chaire en Aménagement Forestier Durable (AFD)

Centre d'étude de la forêt (CEF)

emeline.chaste@canada.ca

Ma formation

Agronomie

L3: Biologie – Écologie

M1: Conservation – Écologie (CE)

M2: CE – Modélisation

*Modélisation dynamique forestière –
Changements climatiques*

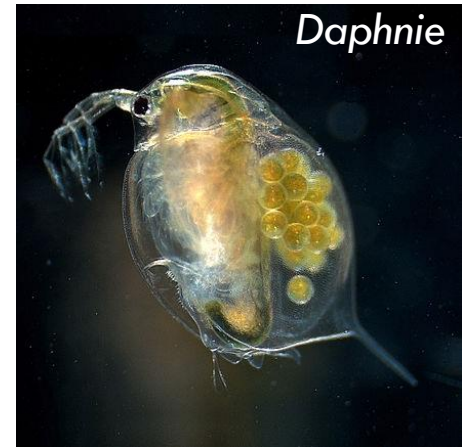
	France	Québec
CAP/BEP	Lycée Seconde	IV
	Première	V DES
BT / Bac. Pro	Terminale Dipl Baccalauréat	Enseignement ⁴⁸ Collégial 2 ans DEC pré-universitaire
DUT (université) / BTS (lycées)	Universitaire 1 ^{er} cycle	Enseignement ⁴⁸ Collégial 3 ans DEC technique
	Licence	Universitaire 1 ^{er} cycle (cursus de 3 ans sauf exceptions (génie, éducation : 4 ans)) Baccalauréat
	2 ^o cycle Master (ex Maîtrise + (DEA ou DESS))	2 ^o cycle Maîtrise
	3 ^o cycle Doctorat	3 ^o cycle Doctorat

▪ **M1 : Modélisation d'un système aquatique proies – prédateurs**

Présent

Dynamique de petites communautés

Système fermé



▪ **M2 : Nouvelle approche de reconstruction climatique en Afrique**

Passé et présent

Ecosystème Africain

Système ouvert



Impacts des changements climatiques sur la forêt boréale en relation avec les perturbations naturelles : Approche de modélisation avec LPJ-LMfire

France

Christelle Hély
Montpellier
Institut des Sciences de l'Évolution

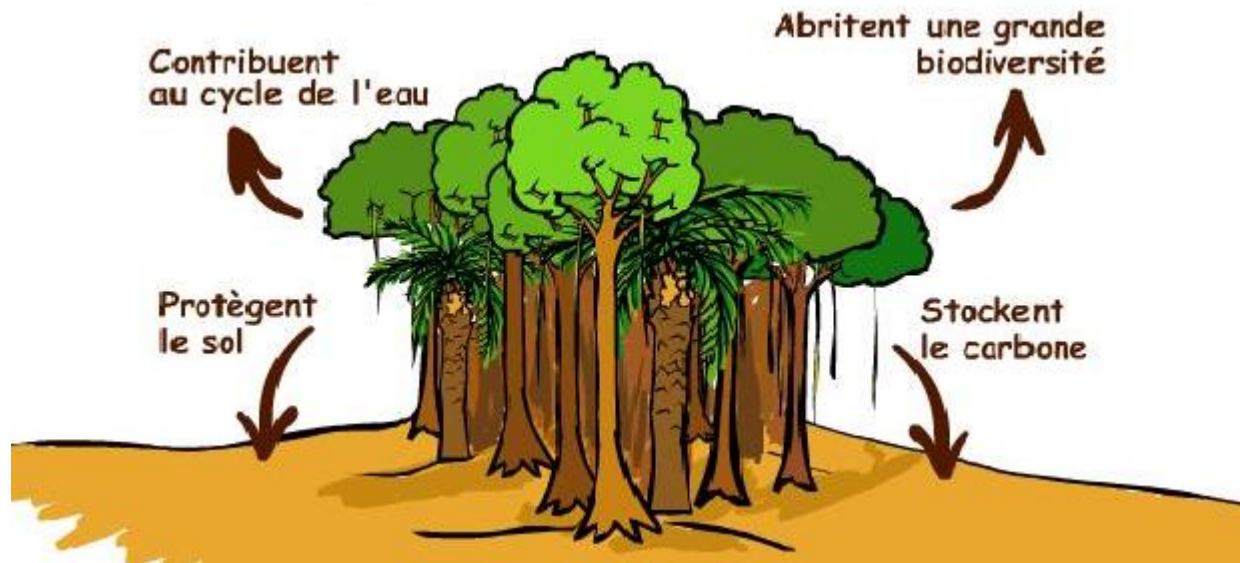
Canada

Martin Girardin et Yves Bergeron
Montréal
Institut des Sciences de l'Environnement

Suisse

Jed Kaplan
Lausanne
Institut de la dynamique des surfaces terrestres

Les forêts remplissent de nombreuses fonctions écologiques



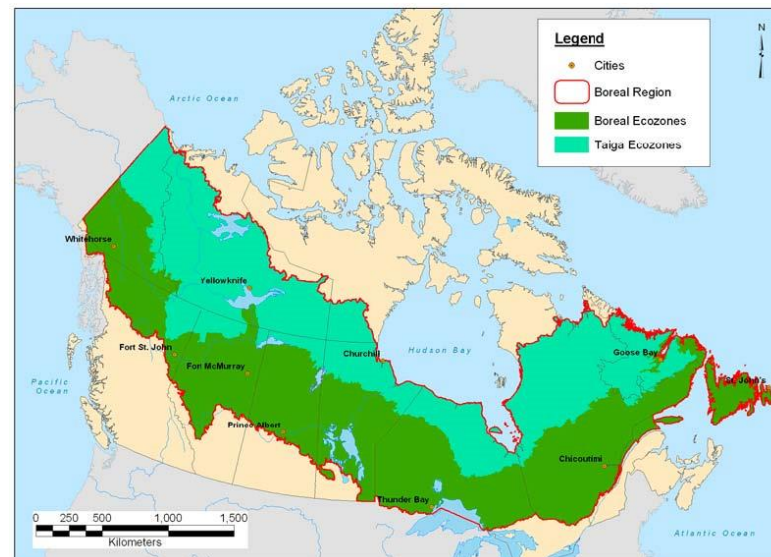
A l'échelle planétaire :

- Séquestration du carbone dans sa biomasse végétale et dans le sol
- Réduction de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (CO_2)
- Contribue donc à ralentir le réchauffement climatique

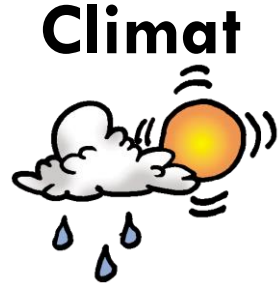
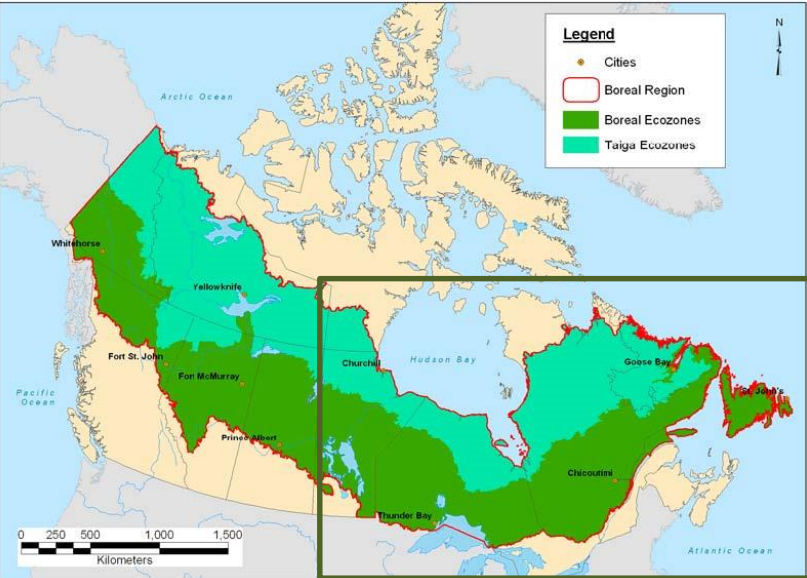
Le biome de la forêt boréale



- ~32% du carbone forestier planétaire
- ~28% au Canada (50% du territoire)
- Un des biomes les plus affectés par les changements climatiques



Forêt boréale de l'est canadien



Perturbations

Naturelles

Anthropiques

Feux

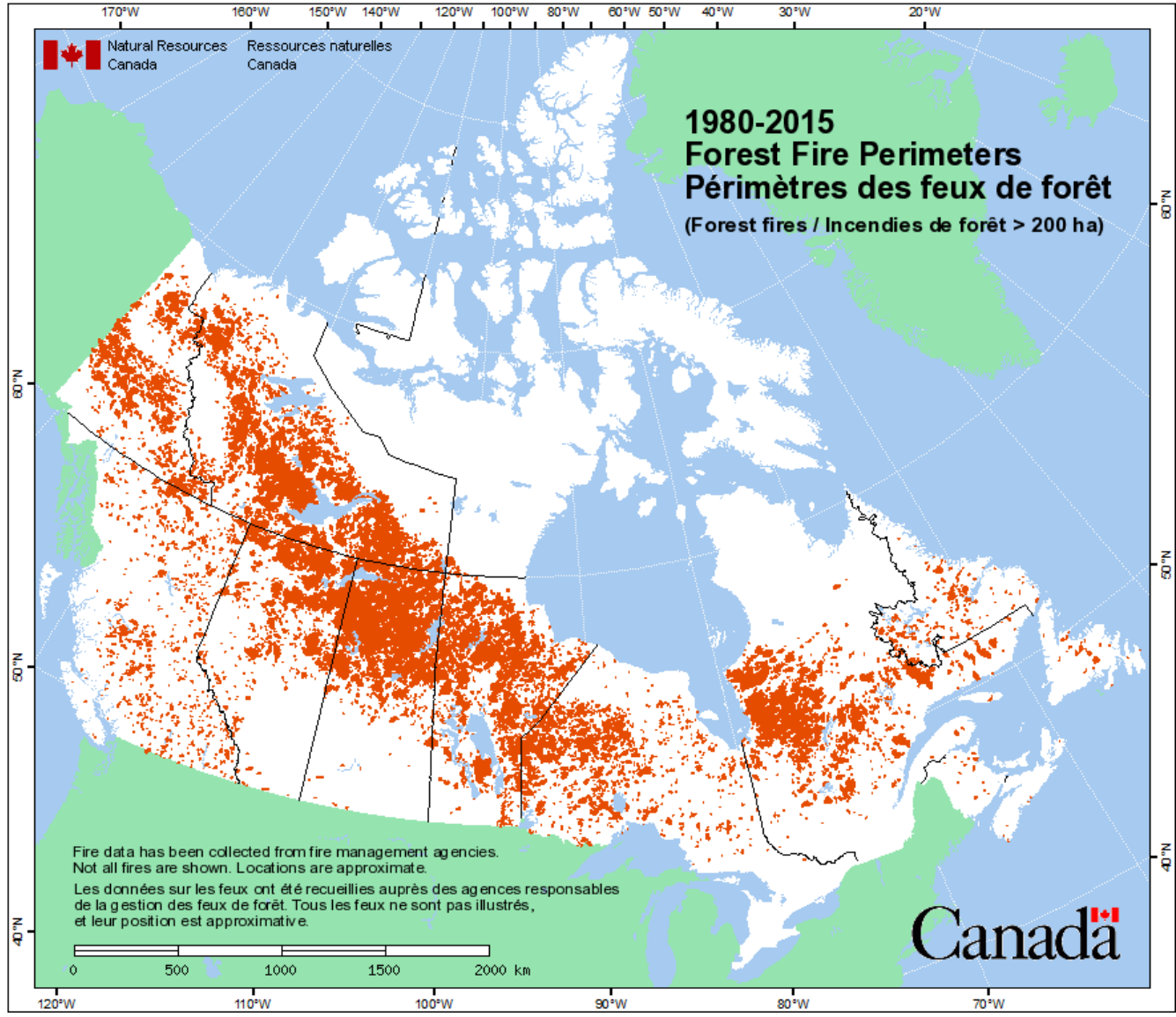


Épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE)

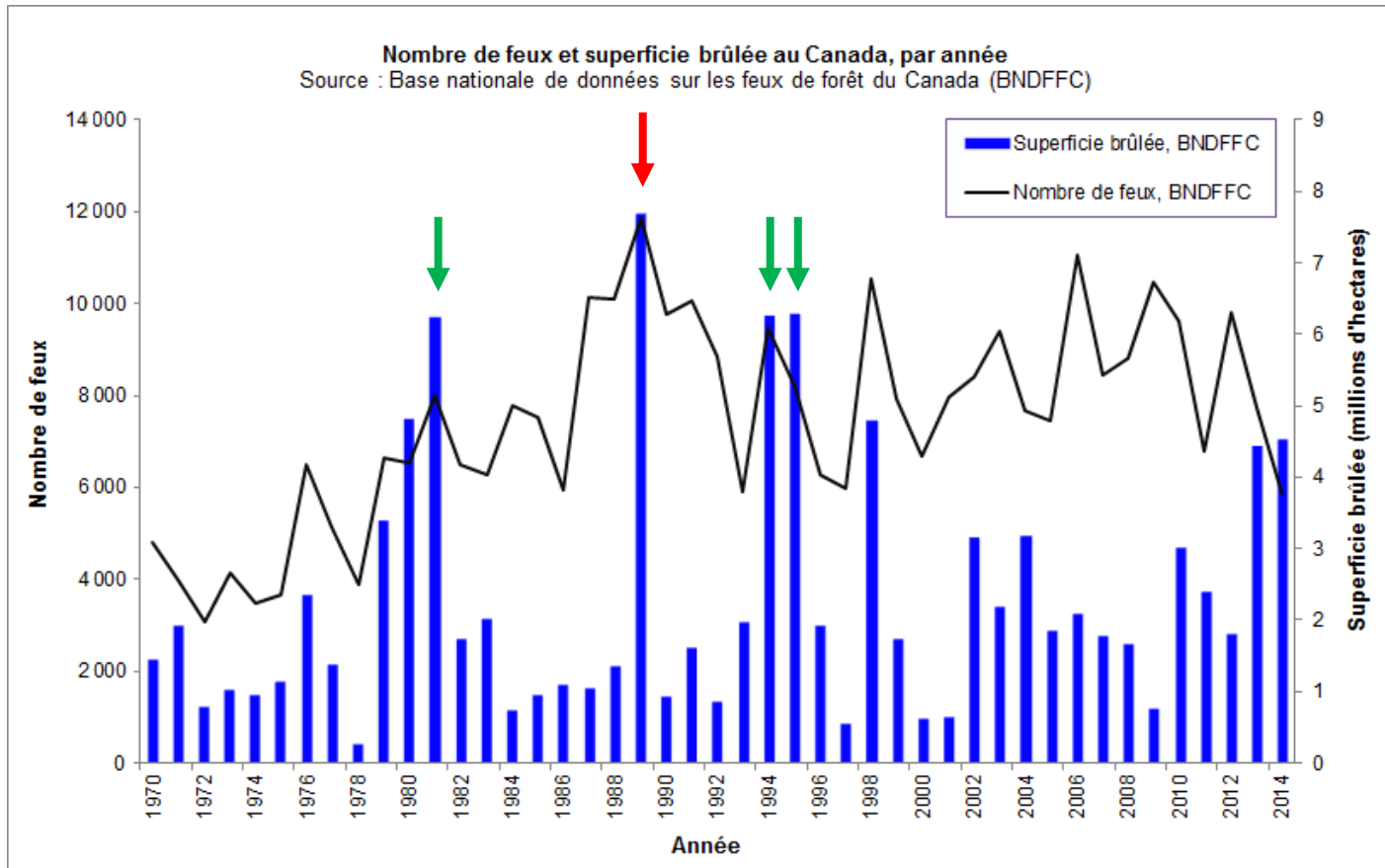


Coupe forestière

Les feux de forêts sont nombreux en forêt boréale



Forêt boréale au Canada : 270 millions d'hectares



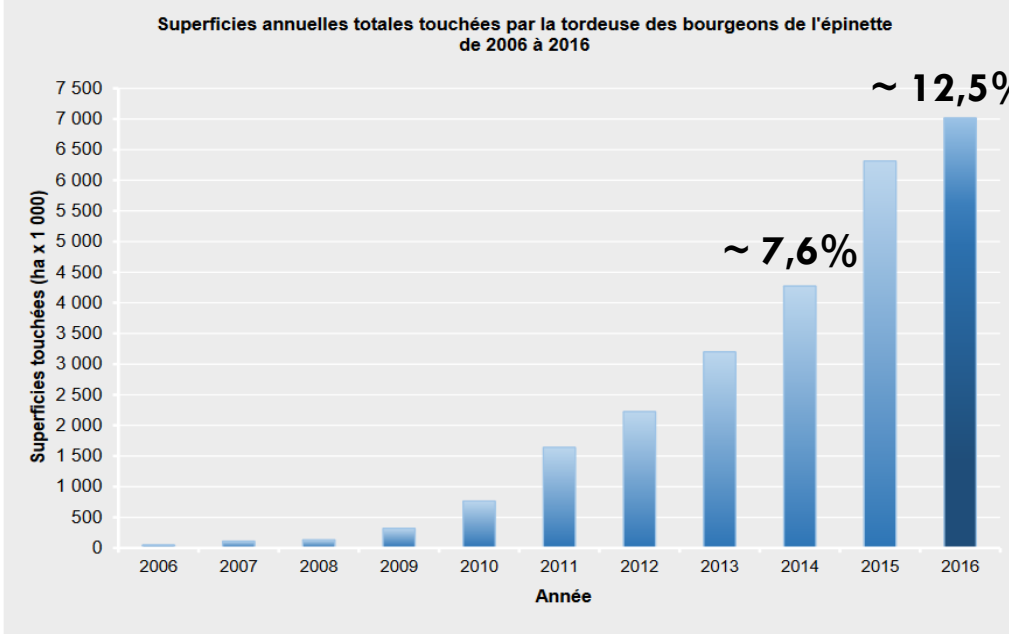
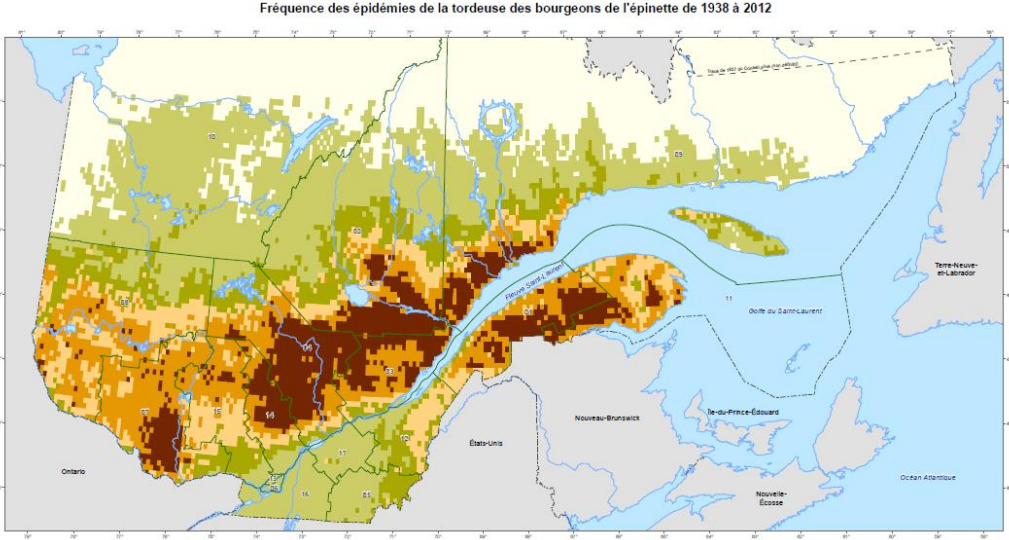
1989 : ~ 4,4%

1981, 1994, 1995: ~ 3,7%

Épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE)

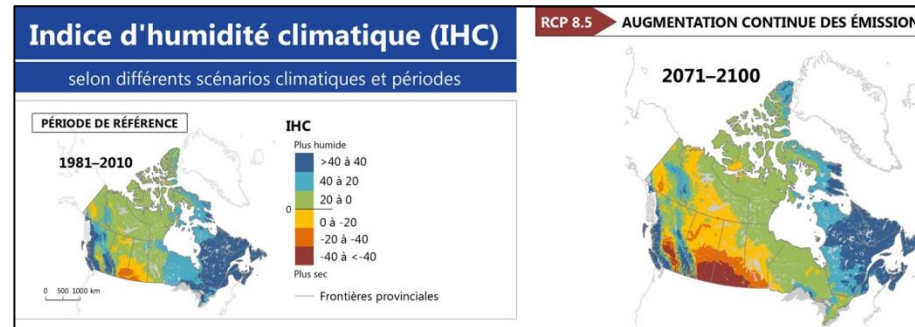


Fréquence des épidémies de TBE

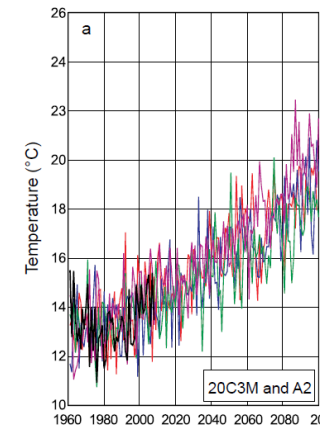


Forêt boréale au Québec : 56 millions d'hectares

Climat futur

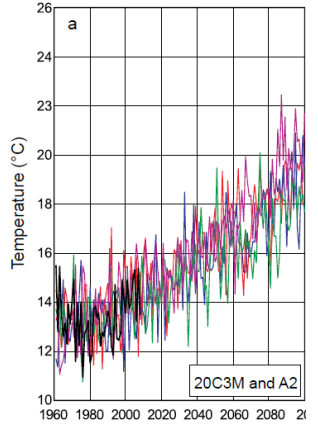
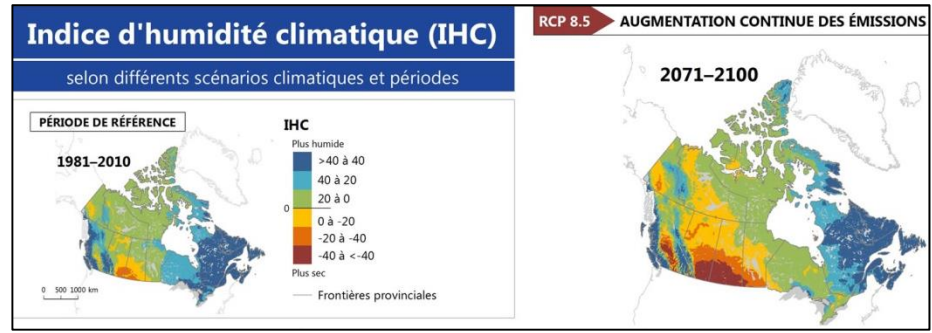


Augmentation de la sévérité et de la fréquence des épisodes de sécheresse



Impacts des changements climatiques

Climat futur

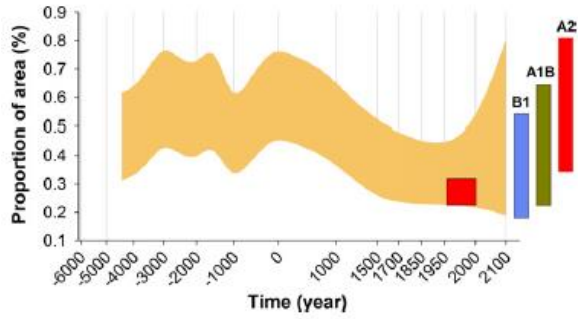


Perturbations naturelles

Feux

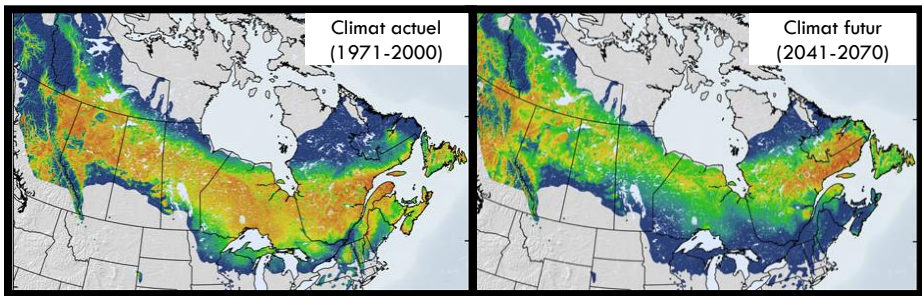


Changements futurs de l'activité de feux dans la forêt de conifères à l'Est du Canada (Girardin et al. 2013)



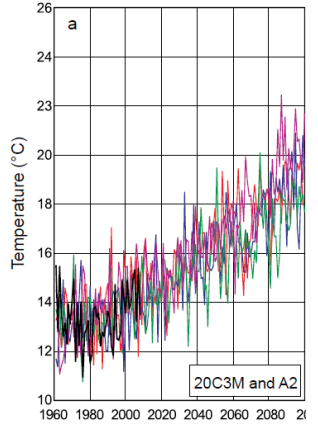
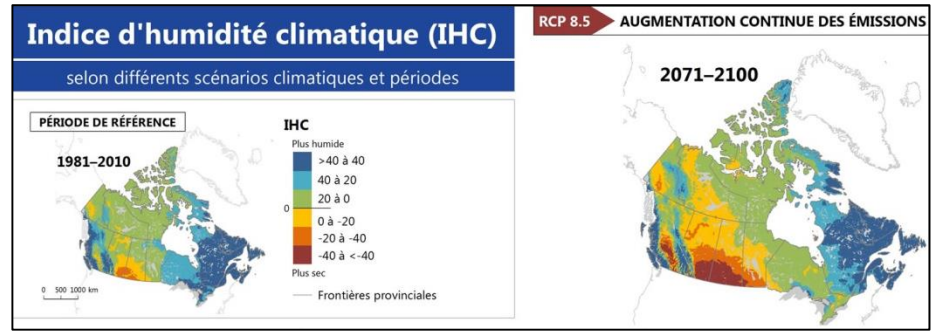
Carte du taux de croissance de la TBE modifiés par le % du couvert de la canopée (Régnière et al. 2012)

Épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE)



Impacts des changements climatiques

Climat futur



Perturbations naturelles

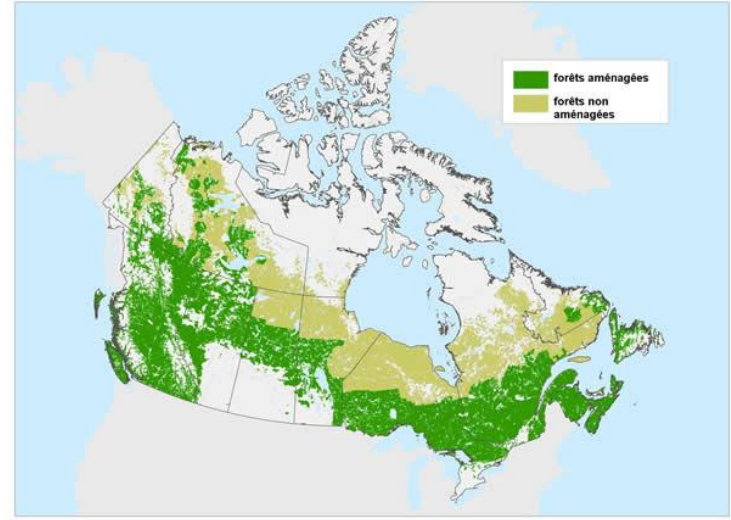
Feux



Épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE)



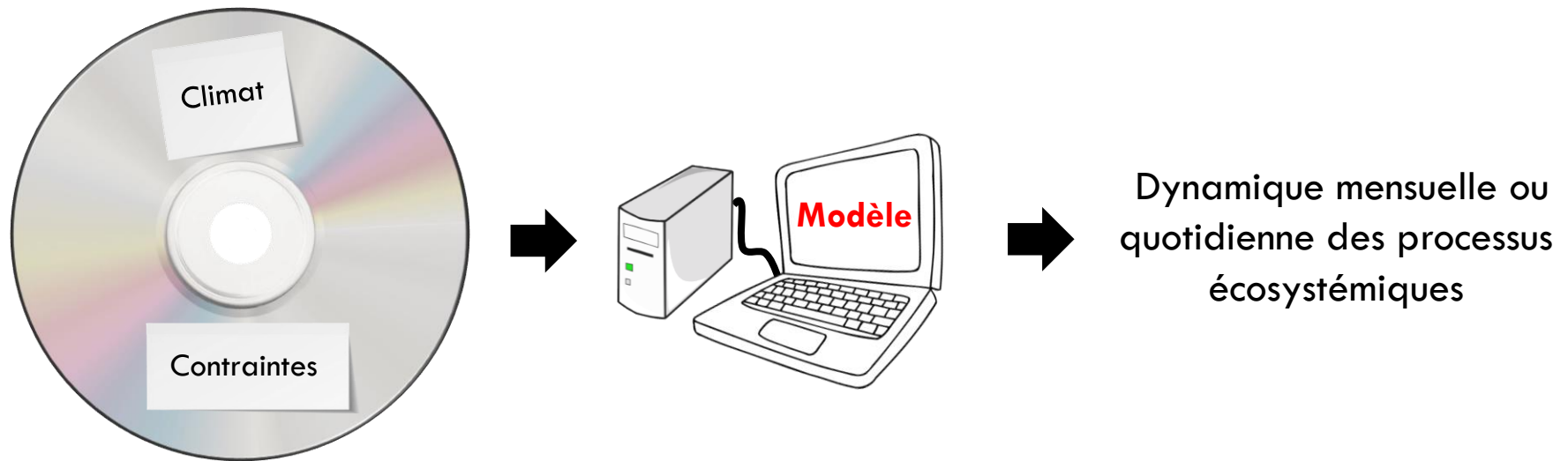
Perturbations anthropiques



Aménagement forestier: Résilience?

Qu'est-ce qu'un modèle de végétation?

- Programme informatique qui simule les changements dans la végétation potentielle et les cycles biogéochimiques et hydrologiques associés en réponse aux changements de climat.



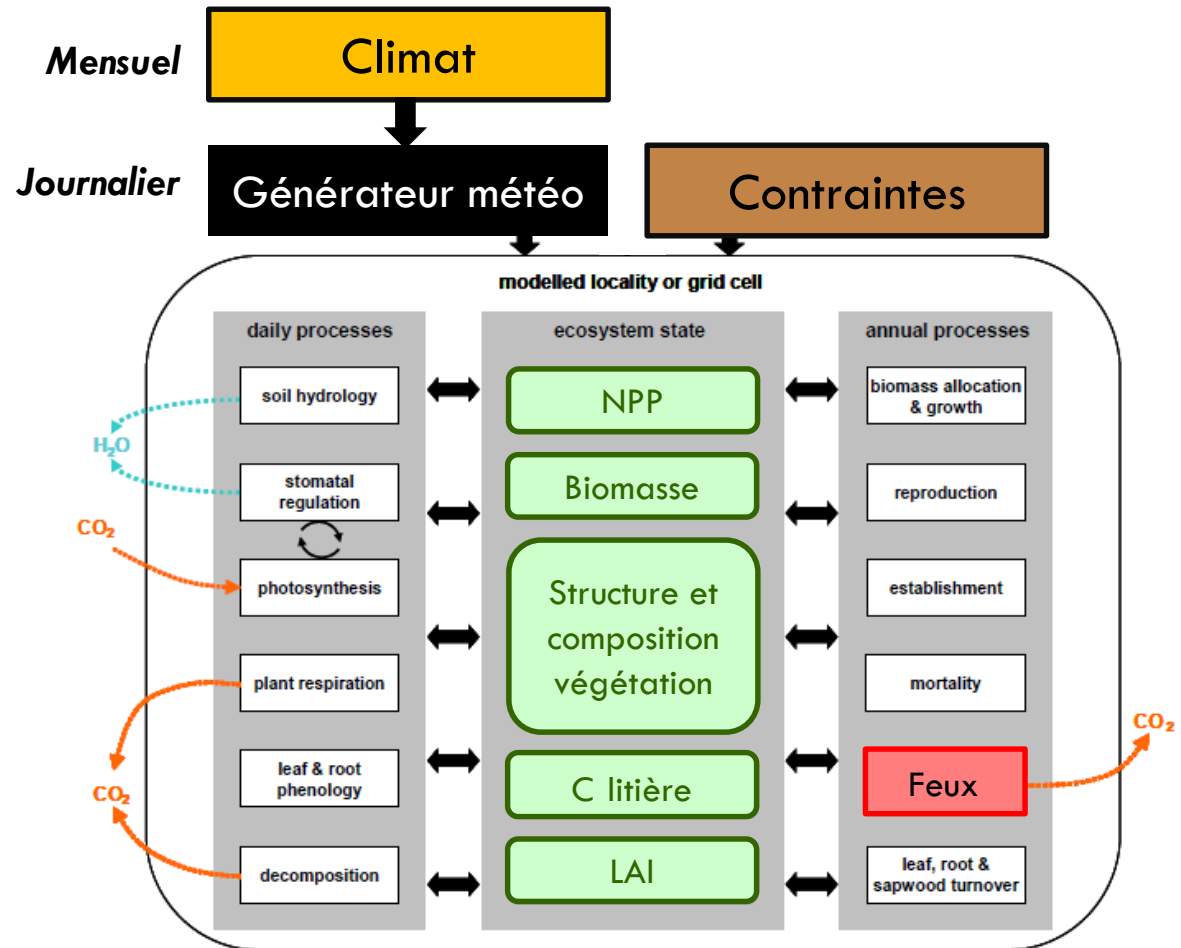
Objectifs de thèse

Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?



Objectifs de thèse

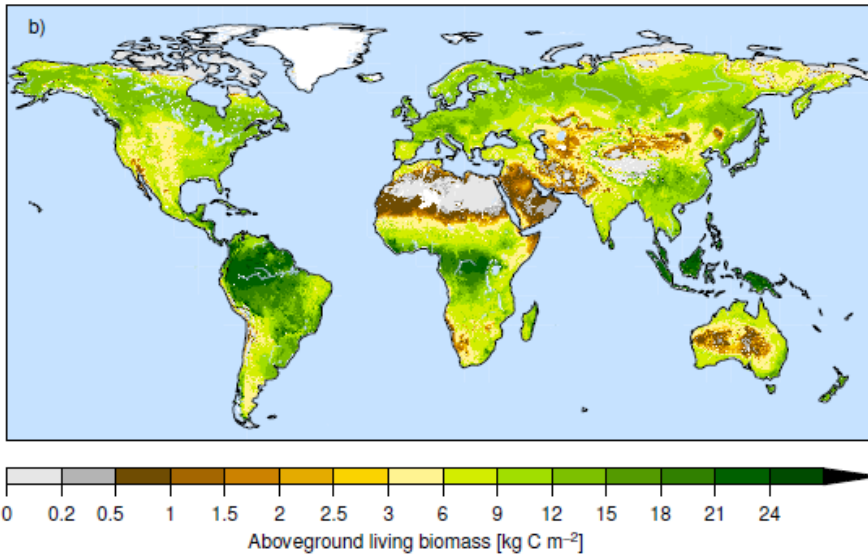
Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?



Mon outils:
Le modèle LPJ-LMfire

Objectifs de thèse

Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?

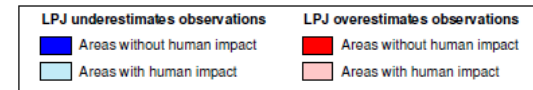
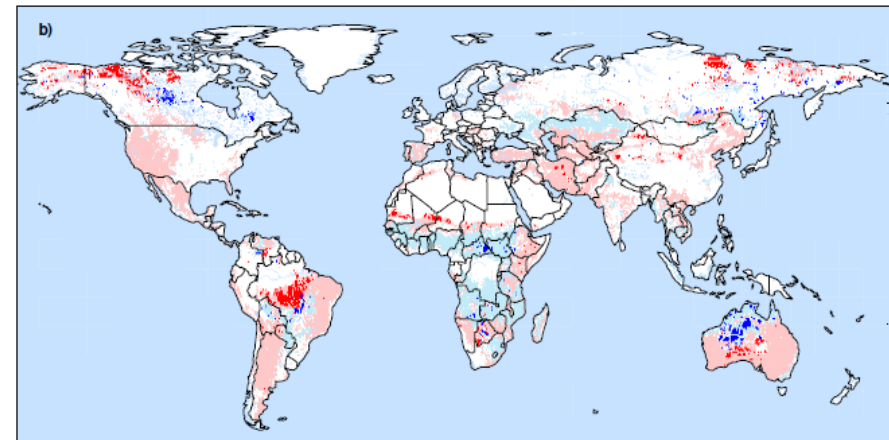
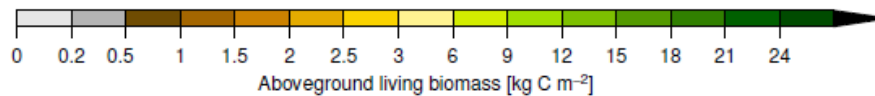
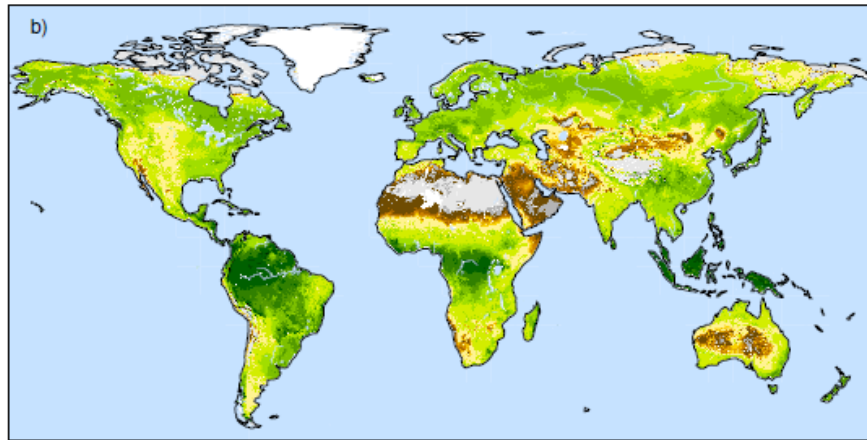


Problèmes:

- Paramétrer pour des grands groupes de plantes en zone boréale (conifères, feuillus)

Objectifs de thèse

Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?

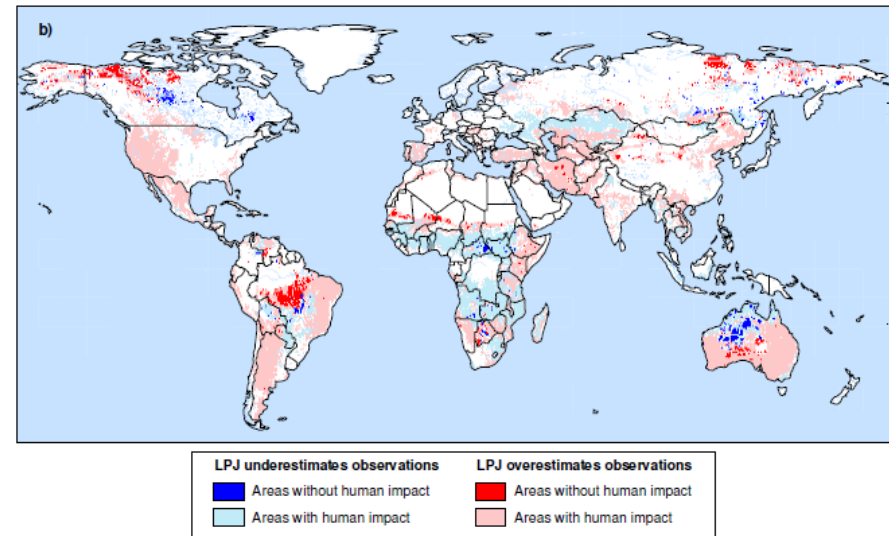
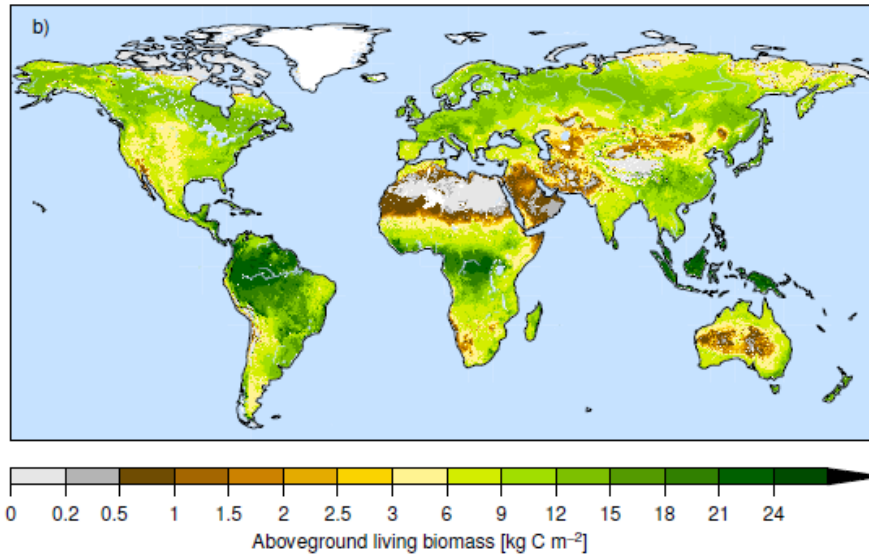


Problèmes:

- Paramétrer pour des grands groupes de plantes en zone boréale (conifères, feuillus)
- Pas assez de feux dans notre zone d'étude

Objectifs de thèse

Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?



Problèmes:

- Paramétrer pour des grands groupes de plantes en zone boréale (conifères, feuillus)
- Pas assez de feux dans notre zone d'étude
- Pas de prise en compte des épidémies de TBE

Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?



Objectif 1

**Paramétrisation pour notre zone d'étude
Amélioration des simulations de feux
Histoire sur le passé récent**

= Calibration - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des feux naturels au cours des 100 dernières années, et leurs impacts sur la productivité et la croissance de la forêt.



Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?

Objectif 1

**Paramétrisation pour notre zone d'étude
Amélioration des simulations de feux
Histoire sur le passé récent**

= Calibration - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des feux naturels au cours des 100 dernières années, et leurs impacts sur la productivité et la croissance de la forêt.

Objectif 2

**Implémentation d'un module de TBE
et validation dans le passé**

= Développement - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des épidémies de TBE au cours des 6000 dernières années



Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?

Objectif 1

Paramétrisation pour notre zone d'étude
Amélioration des simulations de feux
Histoire sur le passé récent

= Calibration - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des feux naturels au cours des 100 dernières années, et leurs impacts sur la productivité et la croissance de la forêt.

Objectif 2

Implémentation d'un module de TBE
et validation dans le passé

= Développement - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des épidémies de TBE au cours des 6000 dernières années

Objectif 3

Simulations futures

= Application

Méthodologie

Évaluer les changements spatio-temporels des feux naturels au cours des 100 dernières années et leurs impacts sur la productivité et la croissance de la forêt.



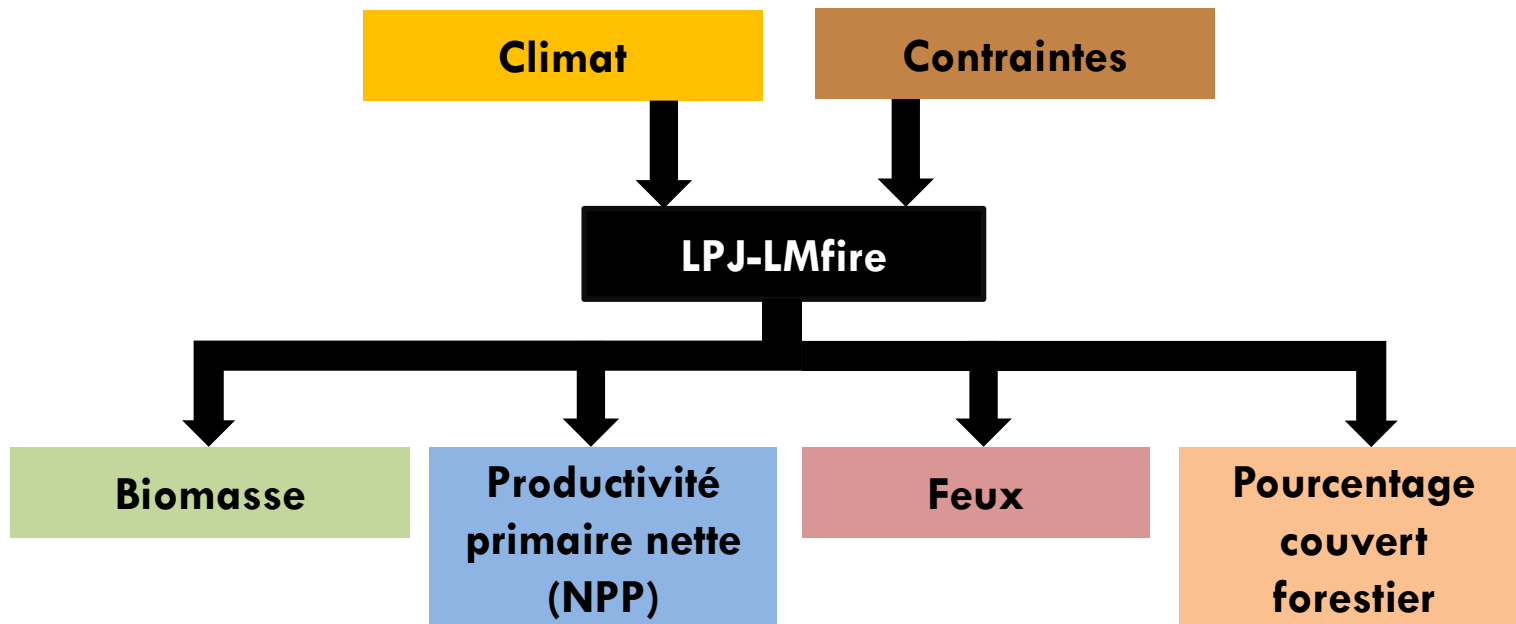
1901 - 2012

Méthodologie

Évaluer les changements spatio-temporels des feux naturels au cours des 100 dernières années et leurs impacts sur la productivité et la croissance de la forêt.



1901 - 2012

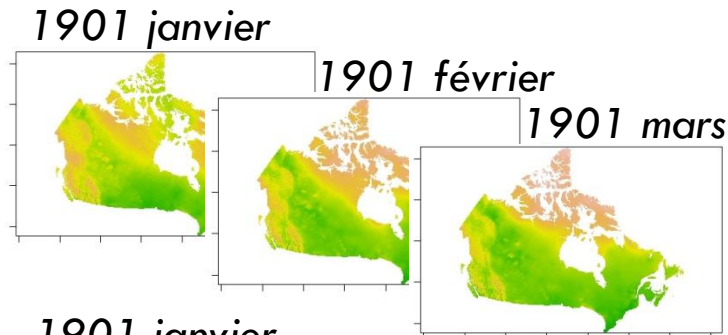


Méthodologie : Données climatiques

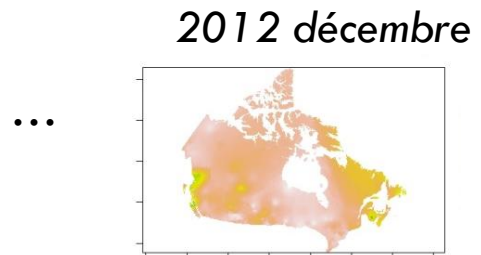
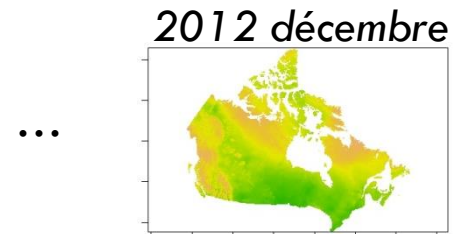
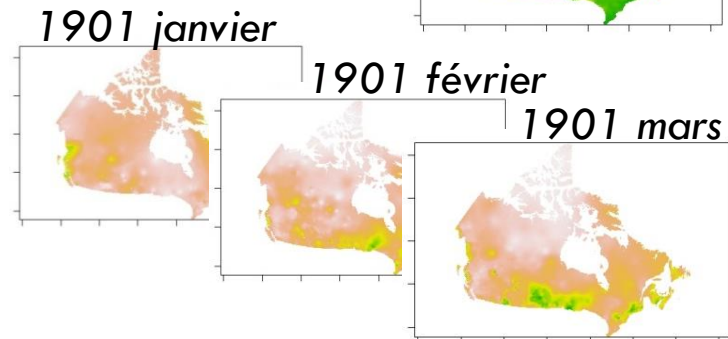
- 1 - T°C mensuelle (moyenne, minimum et maximum)
- 2 - Précipitation moyenne mensuelle
- 3 - Nombre de jour de pluie mensuel

- 4 - Vitesse du vent
- 5 - Taux d'ennuagement
- 6 - Densité de foudre

Température



Précipitation



...

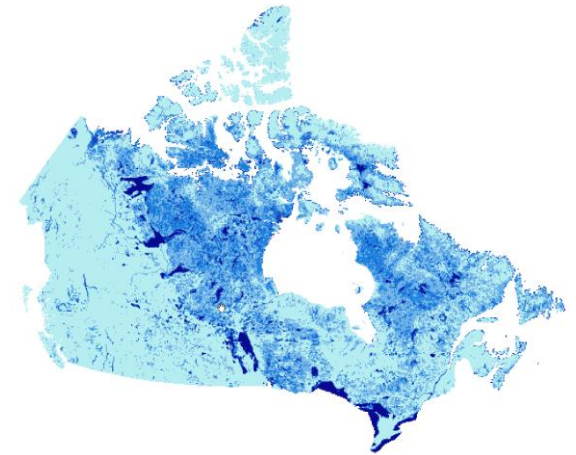
Méthodologie : Contraintes environnementales

- 1 – Texture du sol (argile, sable et couche organique)
- 2 – Pourcentage d'eau
- 3 – Altitude
- 4 – Concentration CO₂ atmosphérique

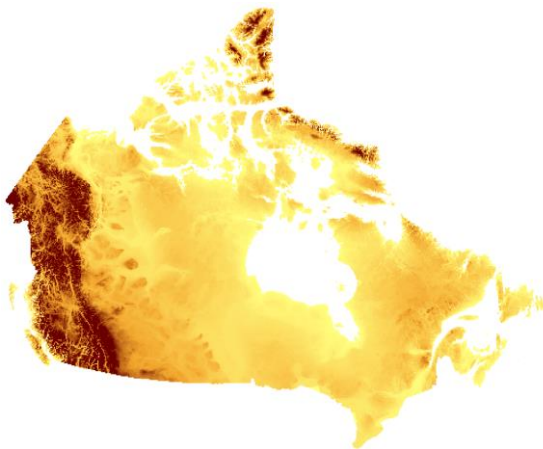
(1)



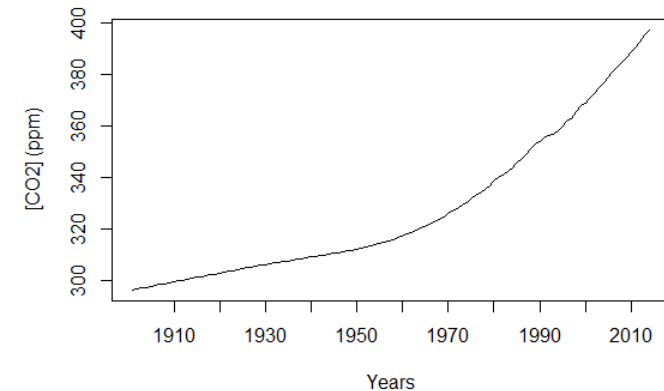
(2)



(3)

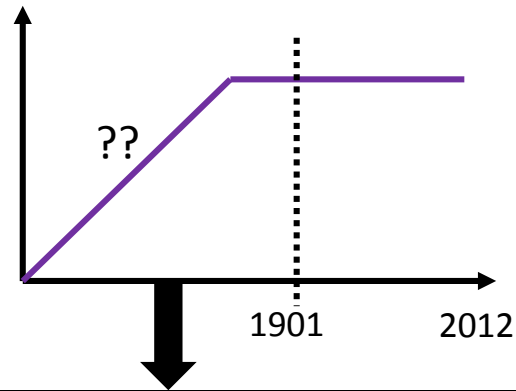


(4)

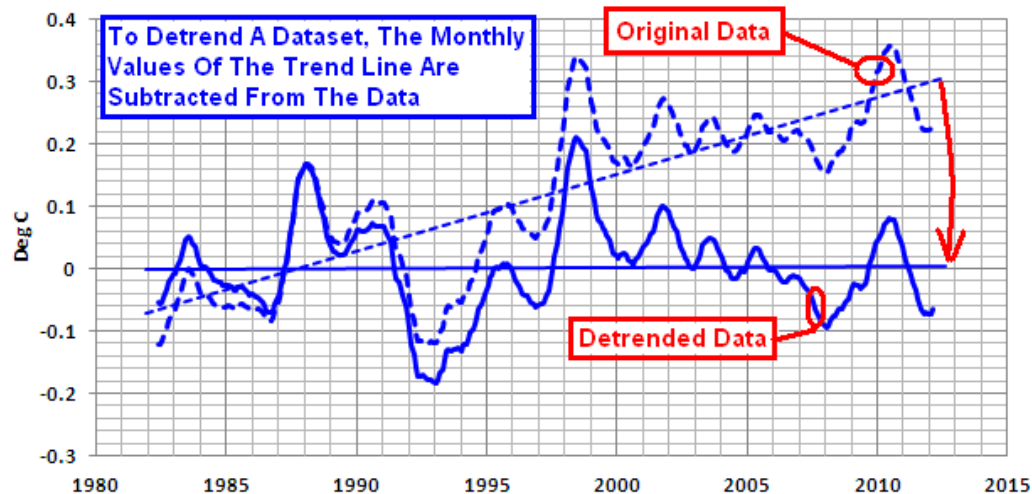


Méthodologie : Protocole simulation

Hypothèse : La végétation est à l'équilibre avec le climat



$$Spinup_{1120ans} = Climat(1901 - 2012)_{detrend} * 10$$



Méthodologie : Paramétrisation pour 4 groupes d'espèces boréales



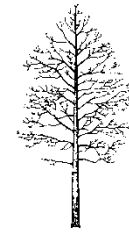
Picea



Abies



Pinus



Populus

Méthodologie : Paramétrisation pour 4 groupes d'espèces boréales



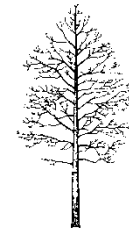
Picea



Abies



Pinus



Populus

Croissance et phénologie

Limites bioclimatiques

Morphologie

...

Méthodologie : Paramétrisation pour 4 groupes d'espèces boréales



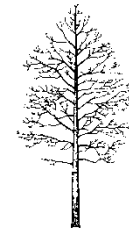
Picea



Abies



Pinus



Populus

Croissance et phénologie

Fraction des racines dans la couche supérieure du sol

0.9 / 0.5 / 0.5 / 0.3

Limites bioclimatiques

Morphologie

...

Méthodologie : Paramétrisation pour 4 groupes d'espèces boréales



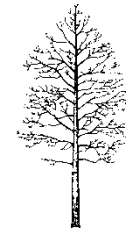
Picea



Abies



Pinus



Populus

Croissance et phénologie

Fraction des racines dans la couche supérieure du sol

0.9 / 0.5 / 0.5 / 0.3

Limites bioclimatiques

Max. T°C du mois le plus froid pour l'établissement

-6.80 / -4.85 / -9.15 / 3.70

Morphologie

...

Méthodologie : Paramétrisation pour 4 groupes d'espèces boréales



Picea



Abies



Pinus



Populus

Croissance et phénologie

Fraction des racines dans la couche supérieure du sol

0.9 / 0.5 / 0.5 / 0.3

Limites bioclimatiques

Max. T°C du mois le plus froid pour l'établissement

-6.80 / -4.85 / -9.15 / 3.70

Morphologie

Ratio de la hauteur du houppier

1 / 1 / 0.4 / 0.5

...

Méthodologie : Amélioration des simulations de feux

- Pas assez de feux : manque de données de foudre



- représentent 45 % de tous les feux

- représentent 81 % des superficies brûlées



Méthodologie : Amélioration des simulations de feux

- Pas assez de feux : manque de données de foudre



- représentent 45 % de tous les feux

- représentent 81 % des superficies brûlées

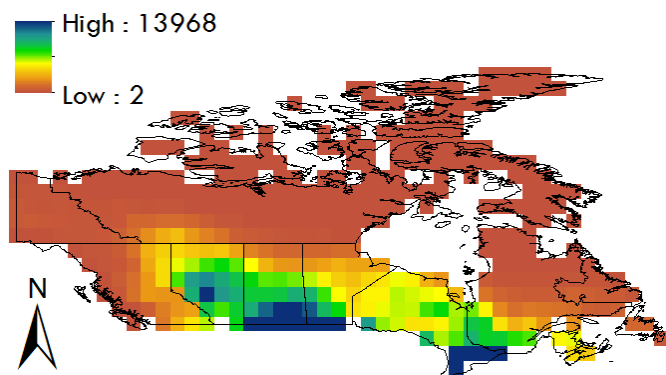


La foudre qu'est ce que c'est?

Étincelle géante d'électricité dans l'atmosphère entre les nuages, l'air ou le sol.

La foudre se forme quand les forces négatives s'accumulent dans un nuage d'orage: condition instable.

Les forces négatives qui sont créées veulent revenir au sol chargé positivement pour équilibrer la charge: **un éclair!!**



Nombre de **foudres** pour les mois d'avril à septembre entre 1999 et 2010

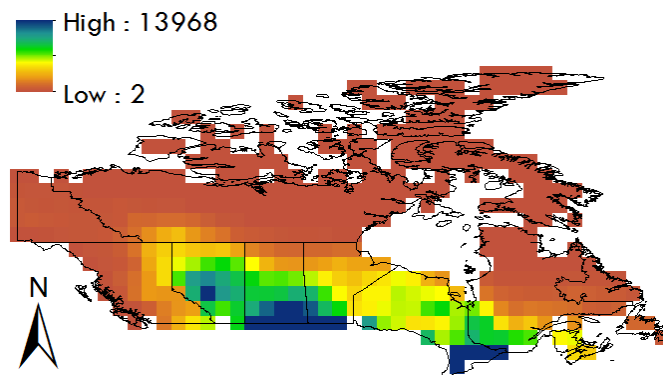
Méthodologie : Amélioration des simulations de feux

- Pas assez de feux : manque de données de foudre

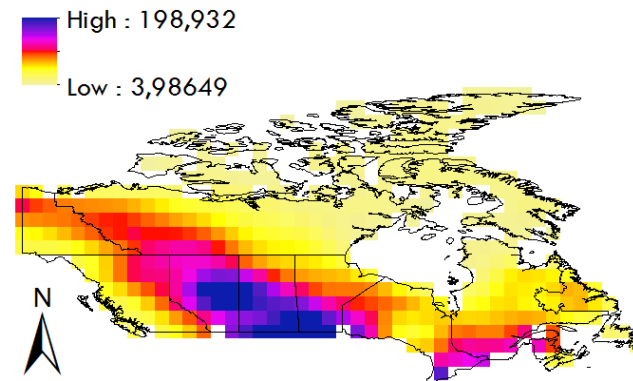


- représentent 45 % de tous les feux

- représentent 81 % des superficies brûlées



Nombre de **foudres** pour les mois d'avril à septembre entre 1999 et 2010



Moyenne du **CAPE** pour les mois d'avril à septembre entre 1999 et 2010

Méthodologie : Étape de validation

Histoire sur le passé récent :

Feux

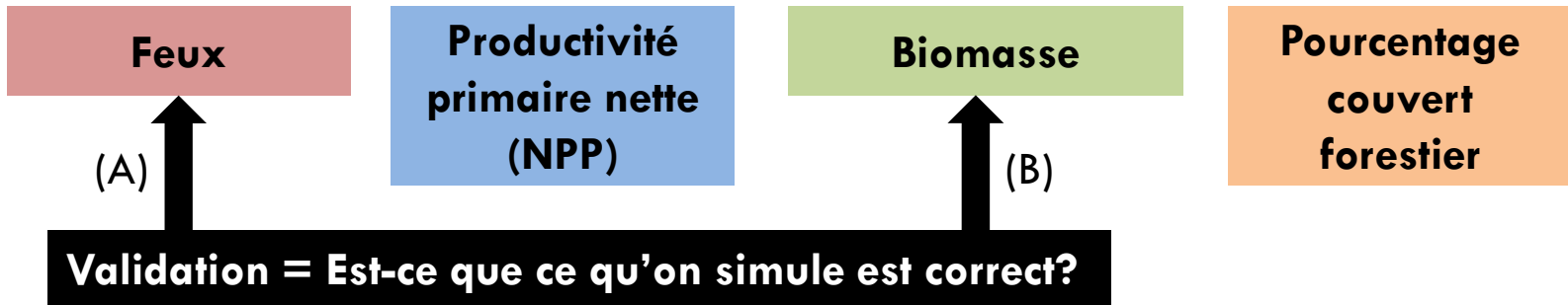
**Productivité
primaire nette
(NPP)**

Biomasse

**Pourcentage
couvert
forestier**

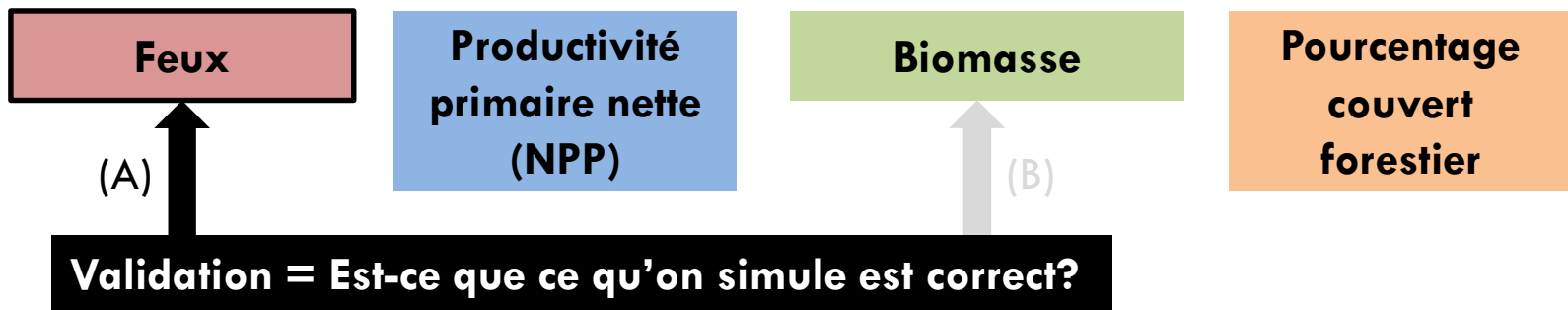
Méthodologie : Étape de validation

Histoire sur le passé récent :



Méthodologie : Étape de validation

Histoire sur le passé récent :

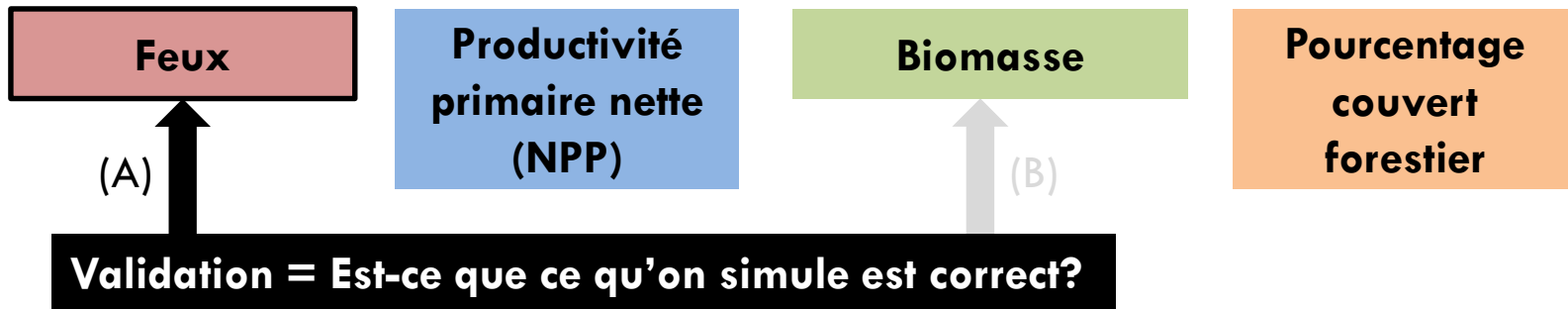


- **Taux annuels de brûlage (BurnRate) :**
proportion de territoire brûlée annuellement

- **Somme des aires brûlées annuellement**

Méthodologie : Étape de validation

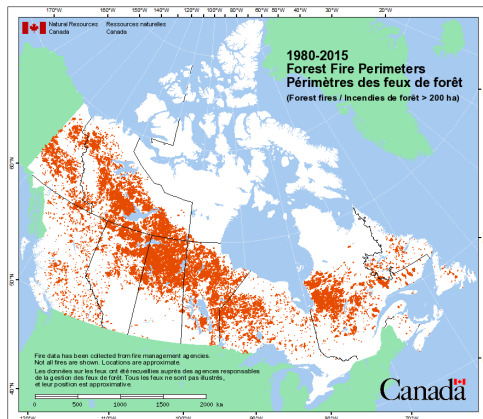
Histoire sur le passé récent :



- **Taux annuels de brûlage (BurnRate) :**
proportion de territoire brûlée annuellement

- **Somme des aires brûlées annuellement**

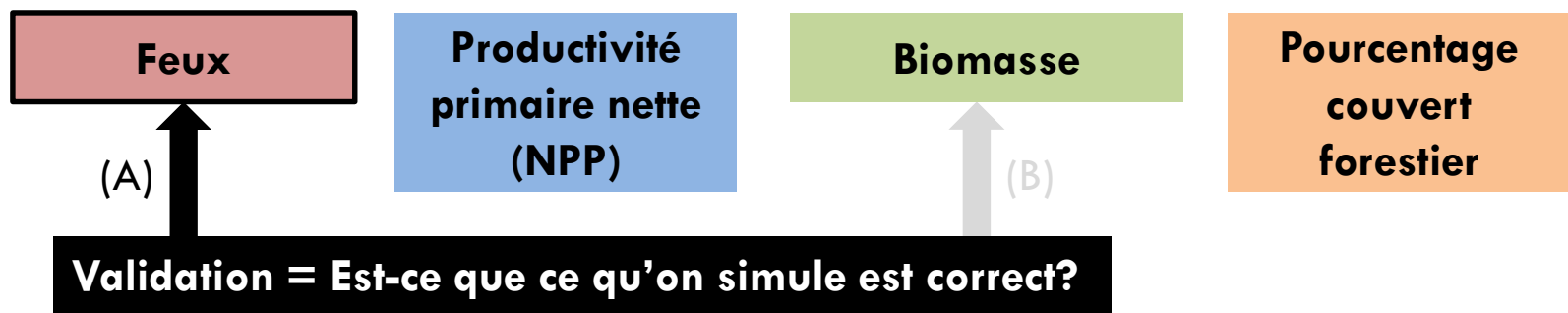
1980 - 2012



VALIDATION (1)

Méthodologie : Étape de validation

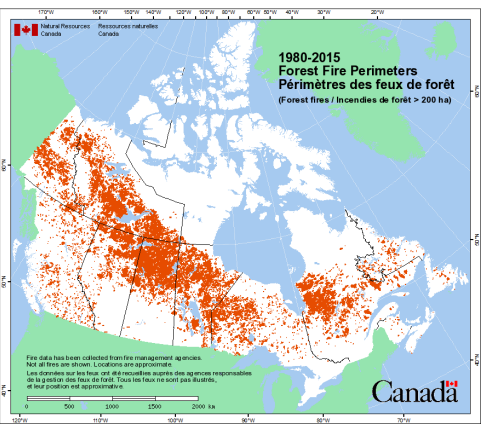
Histoire sur le passé récent :



- Taux annuels de brûlage (BurnRate) : proportion de territoire brûlée annuellement

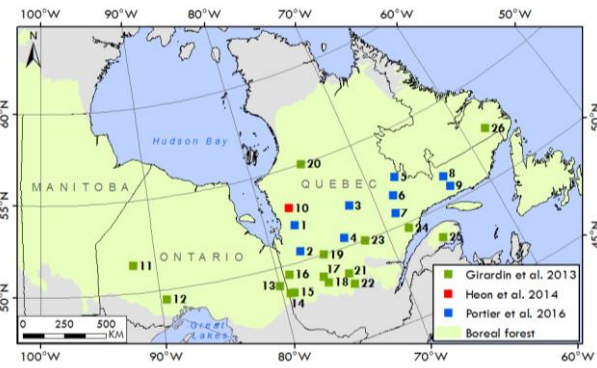
- Somme des aires brûlées annuellement

1980 - 2012



VALIDATION (1)

1911 - 2012

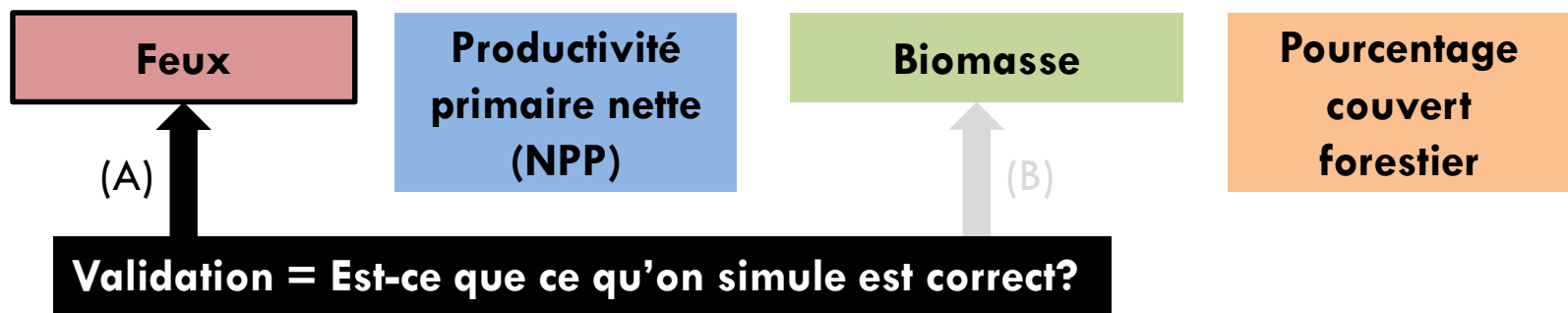


Reconstructions feux : distribution de classe d'âge des peuplements après feux

VALIDATION (2)

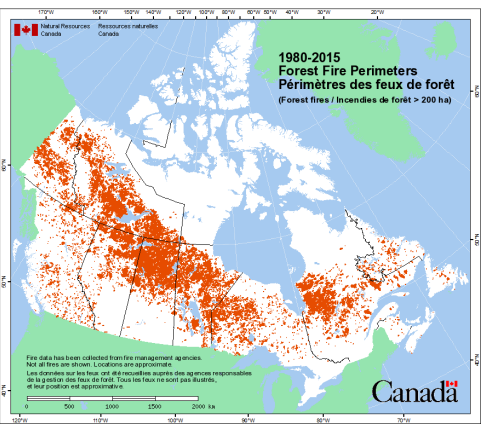
Méthodologie : Étape de validation

Histoire sur le passé récent :



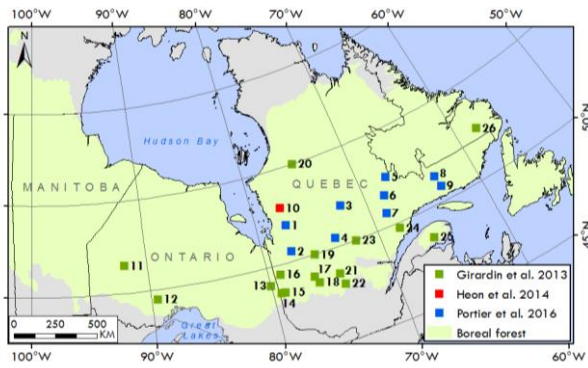
- Taux annuels de brûlage (BurnRate) : proportion de territoire brûlée annuellement

1980 - 2012



VALIDATION (1)

1911 - 2012

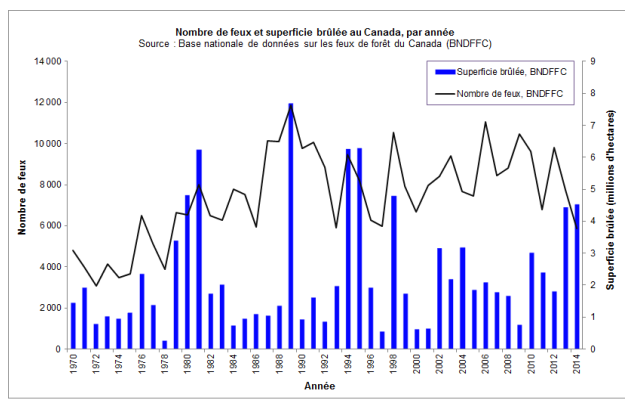


Reconstructions feux : distribution de classe d'âge des peuplements après feux

VALIDATION (2)

- Somme des aires brûlées annuellement

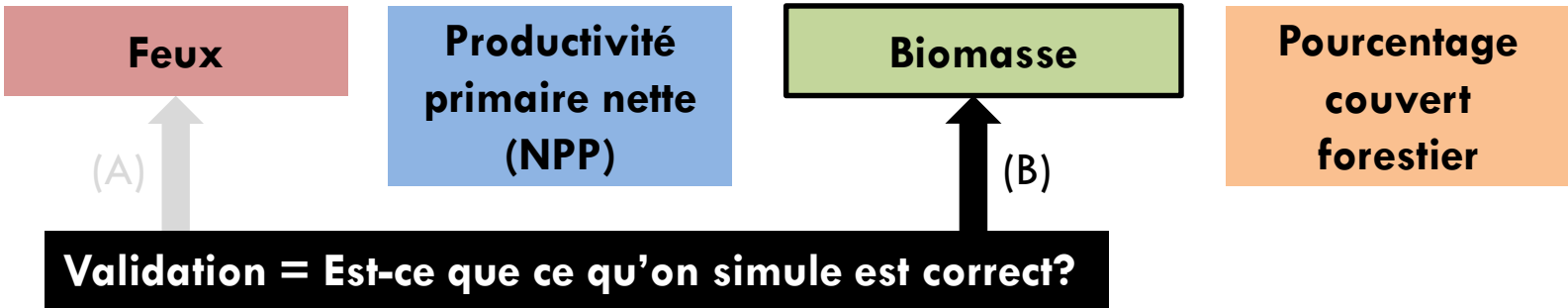
1959 - 2012



VALIDATION (3)

Méthodologie : Étape de validation

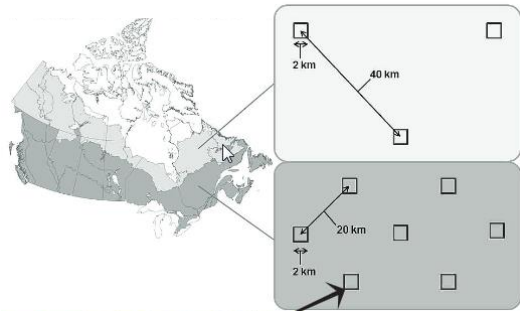
Histoire sur le passé récent :



■ Inventaire forestier du Canada:

Placettes photographiques (2 km*2 km) sur grille de 20 km * 20 km = 1% du territoire

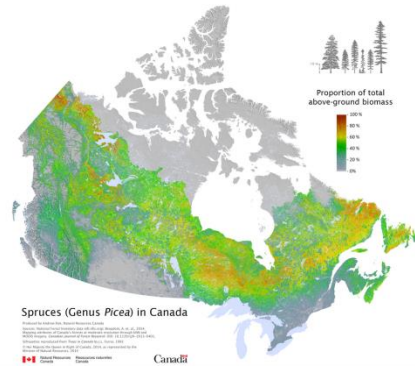
Inventaire terrain: 8% des photos



+



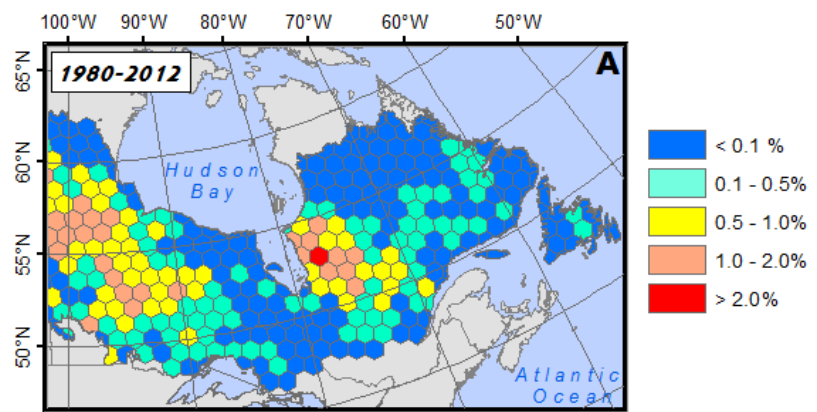
=



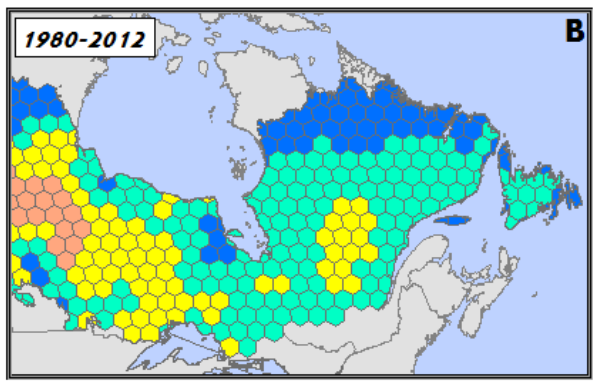
...

1980 – 2012 :

BurnRate observés

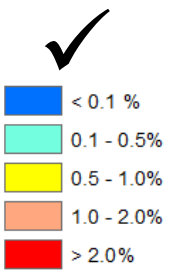
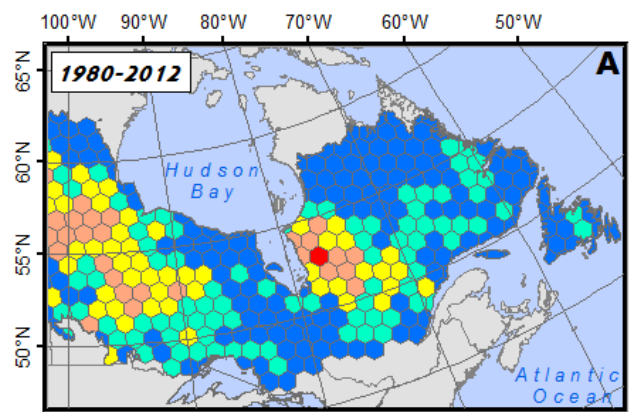


BurnRate simulés

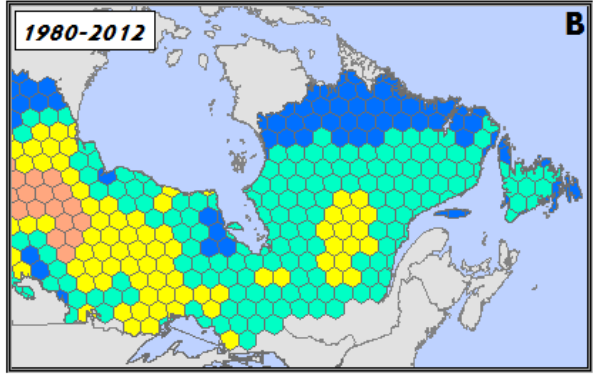


1980 – 2012 :

BurnRate observés

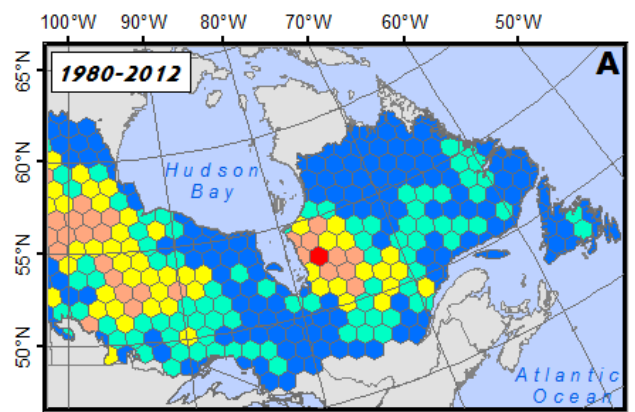


BurnRate simulés



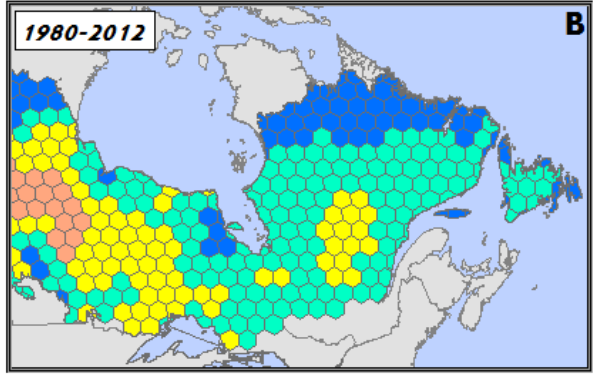
1980 – 2012 :

BurnRate observés



$BurnRate_{Max} = 2.03 \% yr^{-1}$

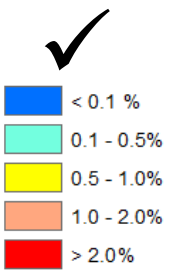
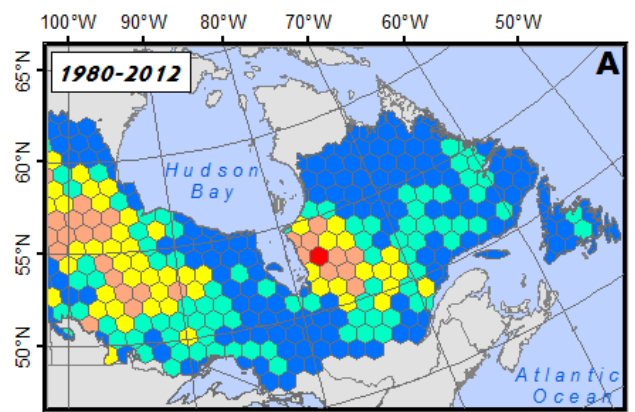
BurnRate simulés



$BurnRate_{Max} = 1.49 \% yr^{-1}$

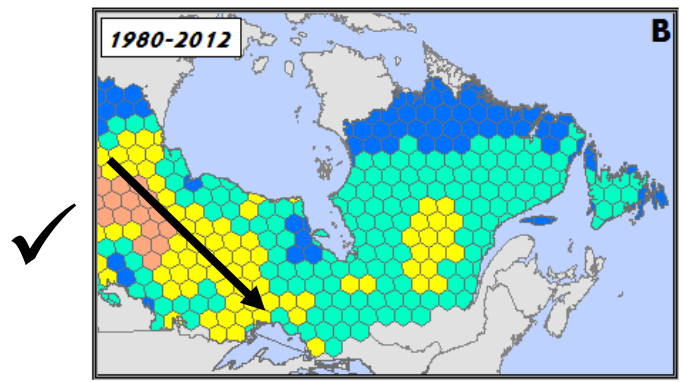
1980 – 2012 :

BurnRate observés



$BurnRate_{Max} = 2.03 \% yr^{-1}$

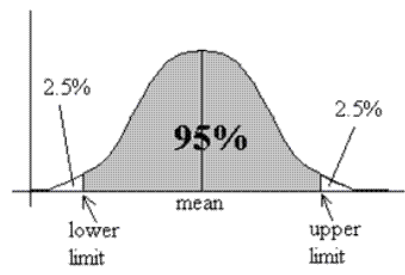
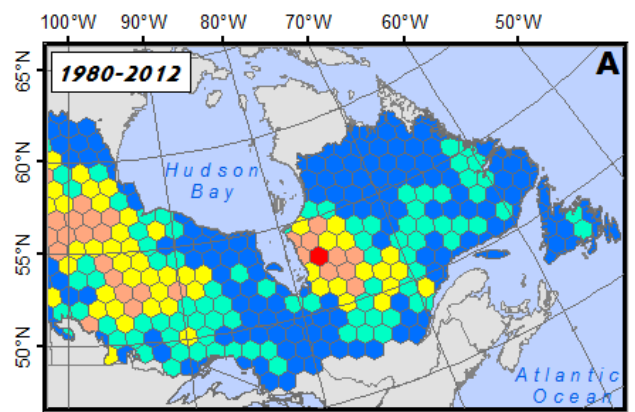
BurnRate simulés



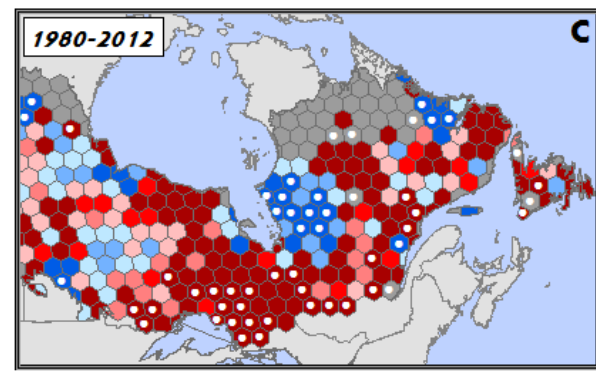
$BurnRate_{Max} = 1.49 \% yr^{-1}$

1980 – 2012 :

BurnRate observés



Différence (%)

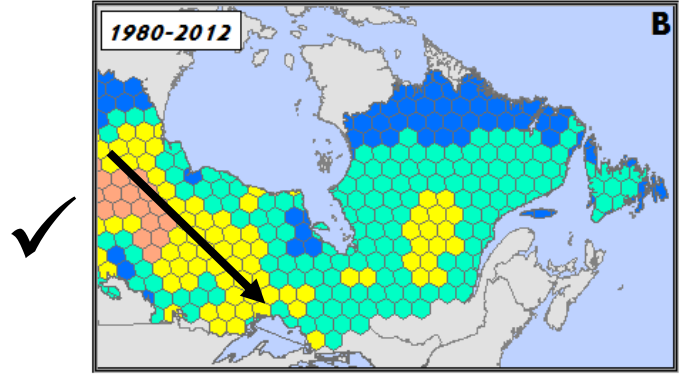


Not enough fire in LPJ-LMfire Percent

- 100 - -50
- 50 - -25
- 25 - 0
- 0
- 0 - 25
- 25 - 50
- 50 - 100
- > 100

Too much fire in LPJ-LMfire

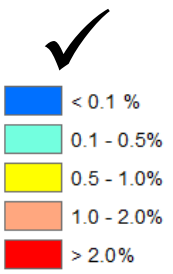
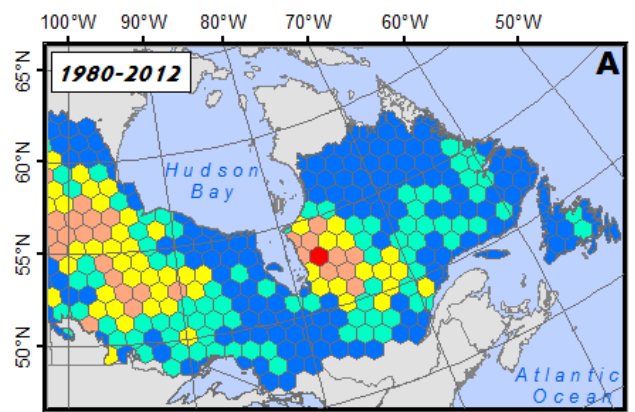
BurnRate simulés



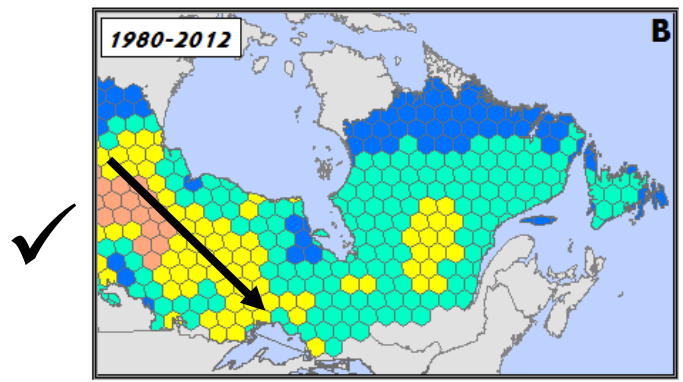
295 / 365 cellules :
Moyenne observée dans le 95% IC
simulé du BurnRate

1980 – 2012 :

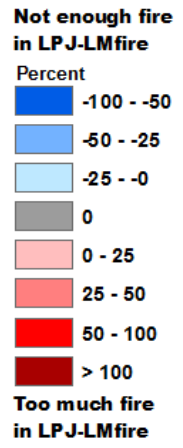
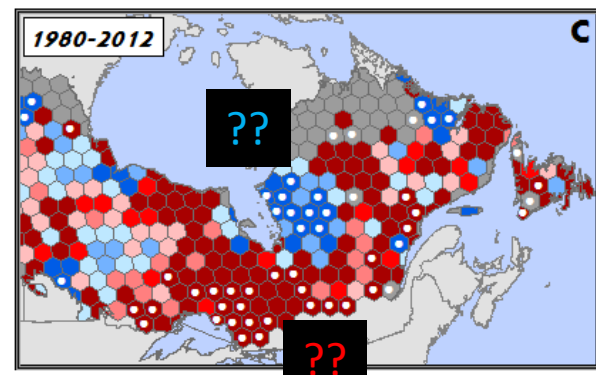
BurnRate observés



BurnRate simulés

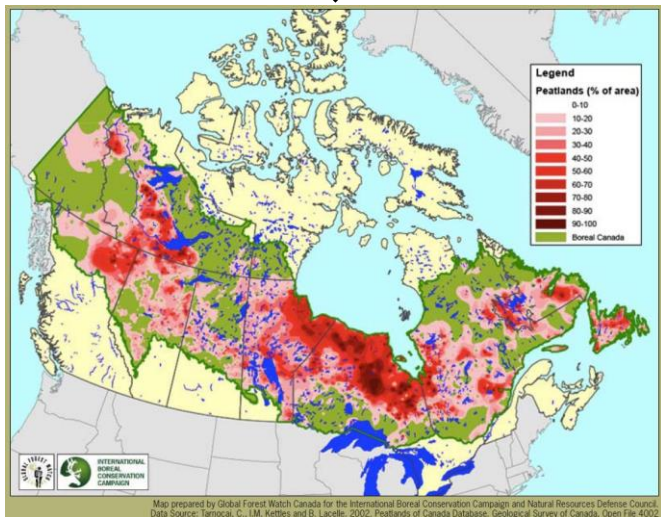
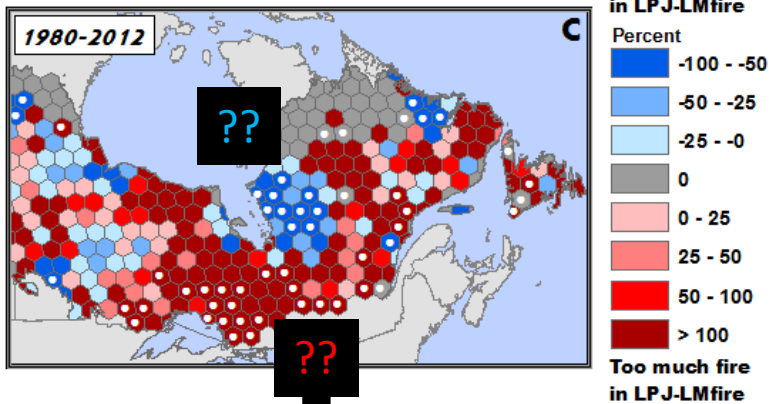


Différence (%)



1980 – 2012 :

Différence (%)



Tourbières (%)

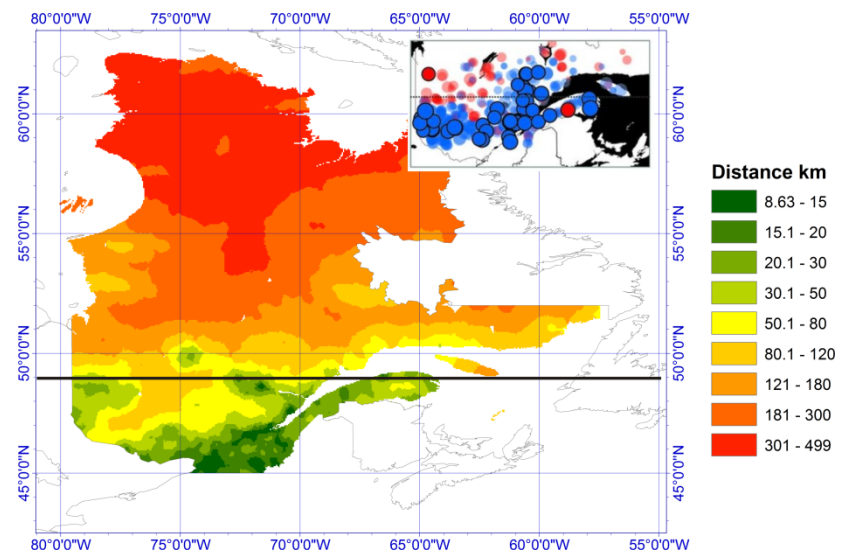
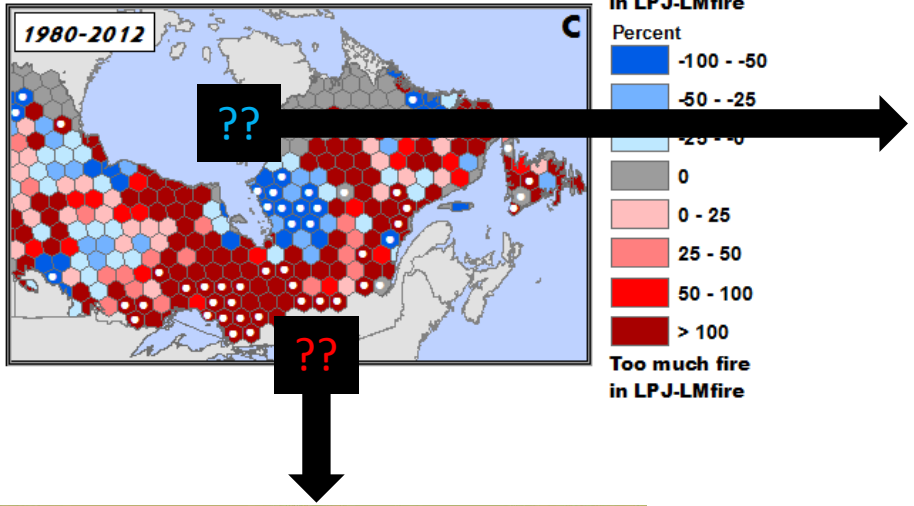
Origine : Retrait du lac proglaciaire Barlow-Ojibway

Les mauvaises conditions de drainage induites par la présence d'un substrat argileux imperméable, une topographie plate et un climat froid ont facilité l'accumulation de couches épaisses de sol organique qui ont tendance à être résistantes à la combustion.

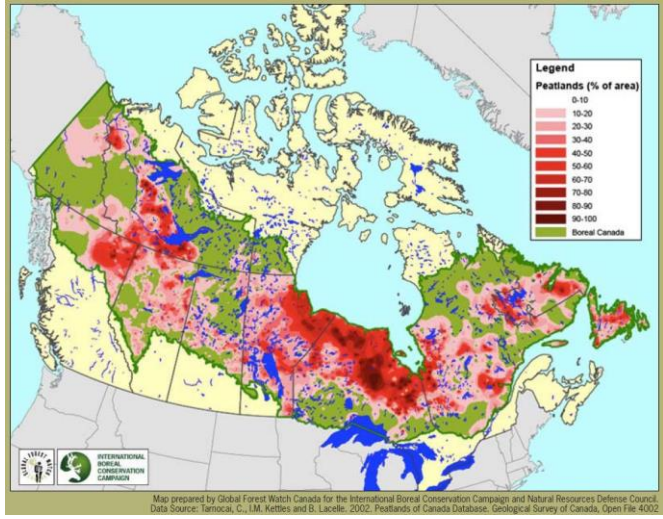
Résultats : Validation des feux

1980 – 2012 :

Différence (%)



Mauvaises qualités des données d'entrées : difficulté d'imiter les années sèches

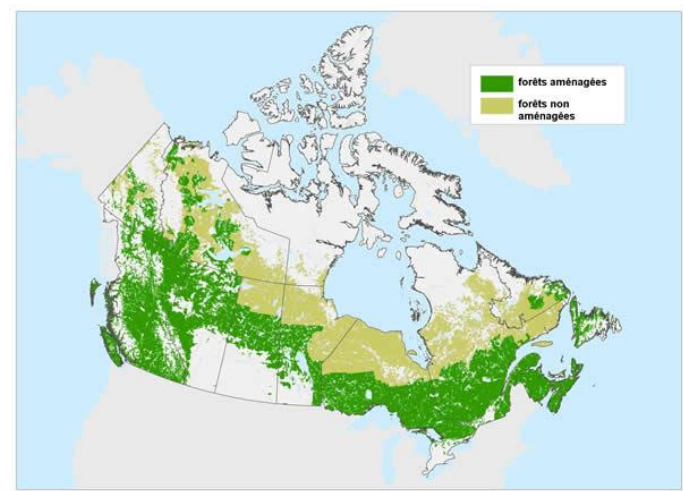
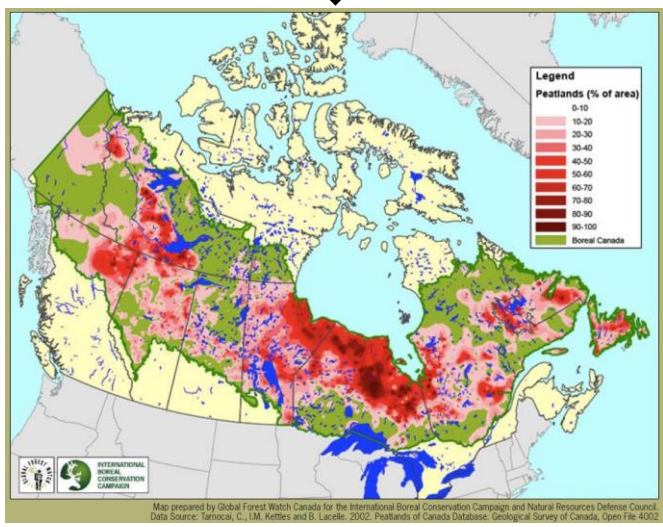
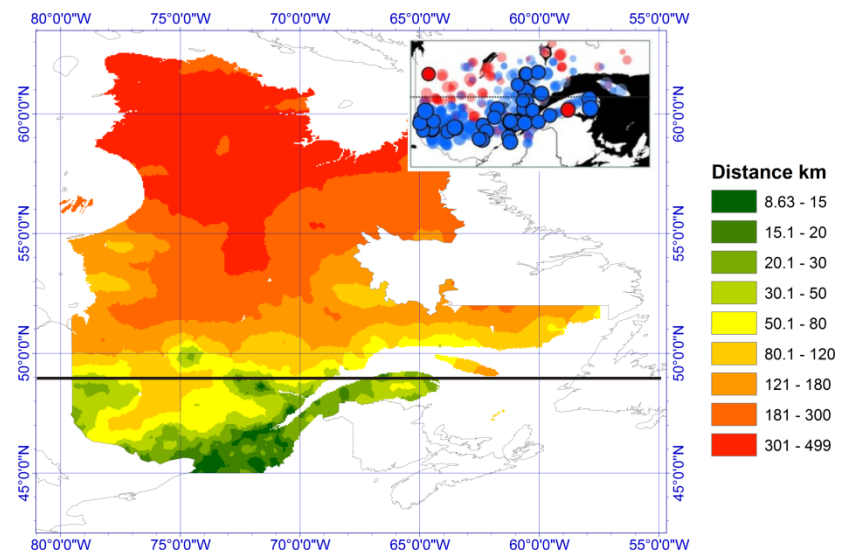
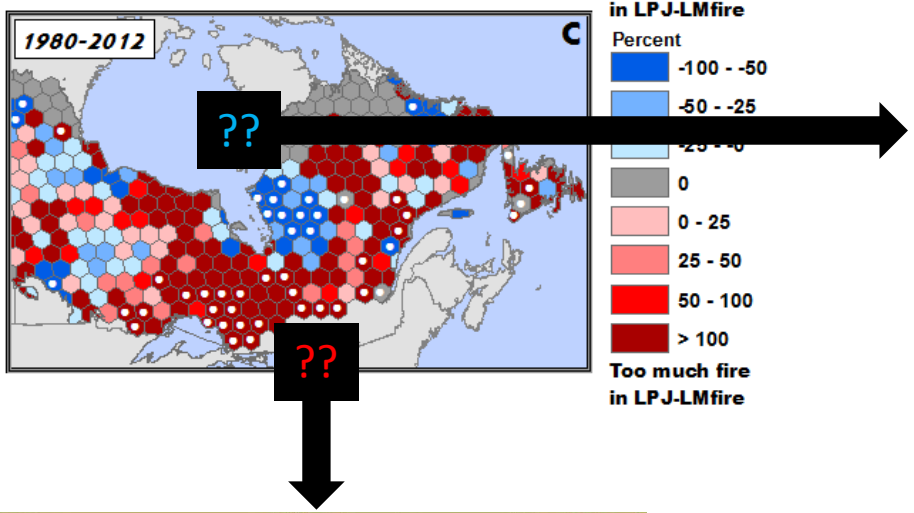


Tourbières (%)

Résultats : Validation des feux

1980 – 2012 :

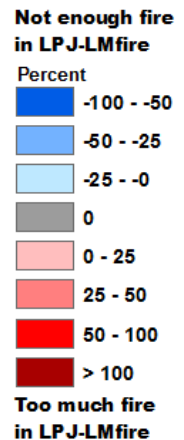
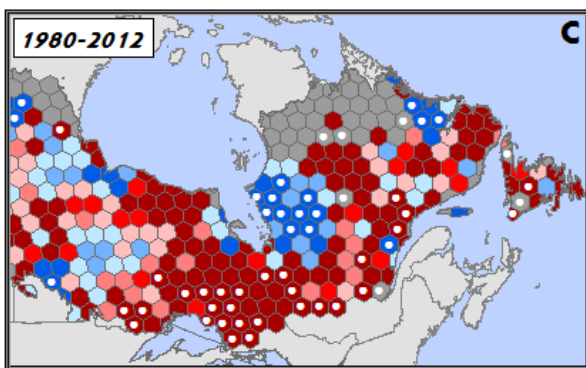
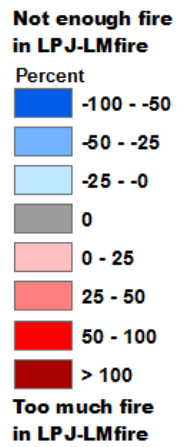
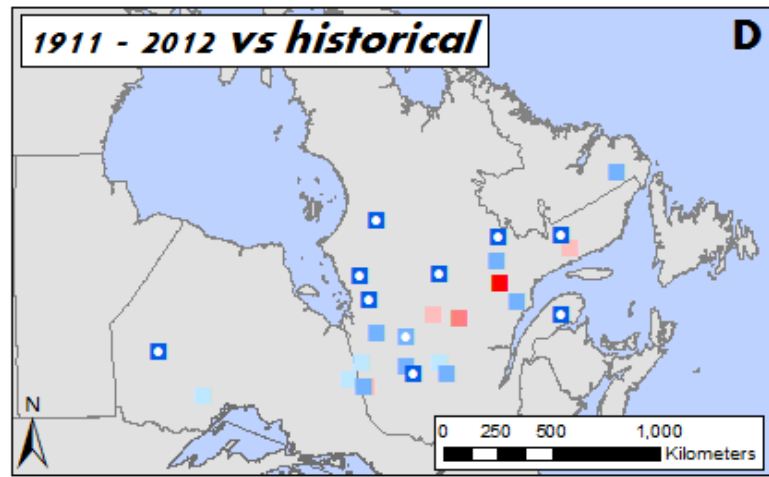
Différence (%)



Tourbières (%)

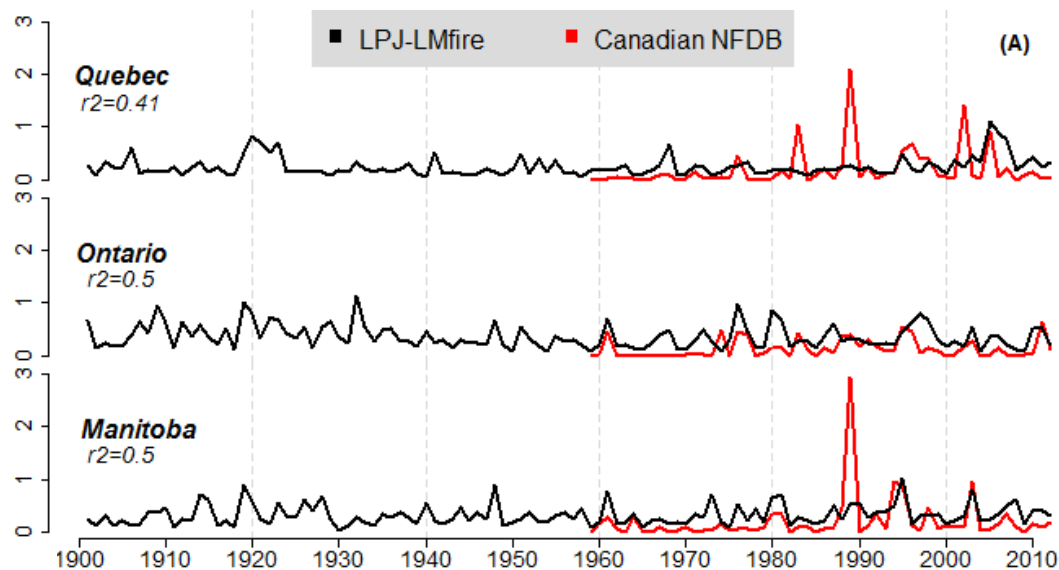
1911 – 2012 :

Différence (%)



1959 – 2012 :

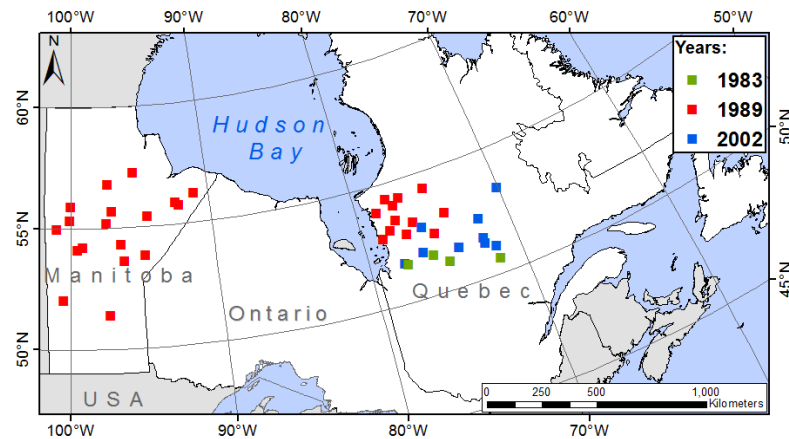
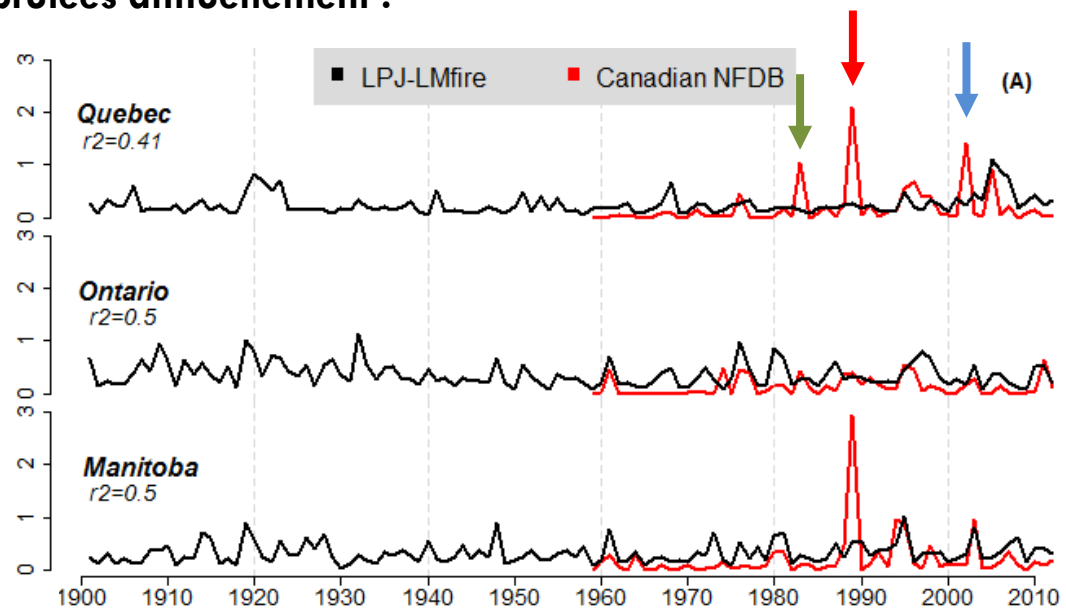
■ Total des aires brûlées annuellement :



- Variation inter-annuelle simulée
- Années de haute activité de feux simulées:
1961, 1968, 2003 et 2005

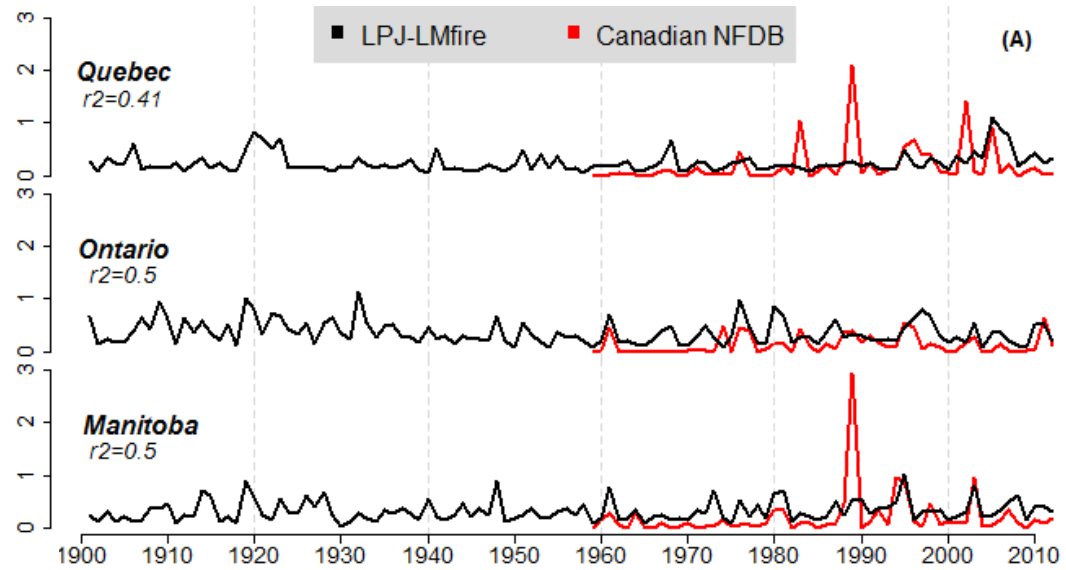
1959 – 2012 :

■ Total des aires brûlées annuellement :

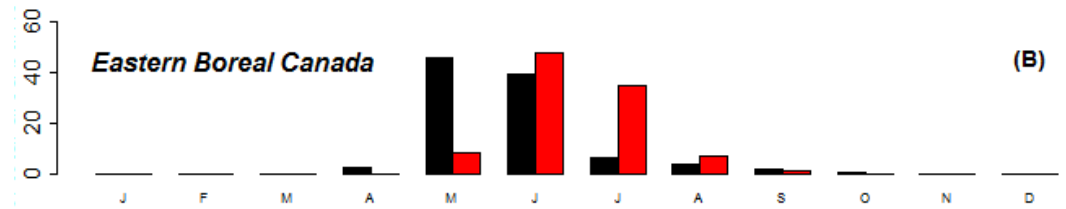


1959 – 2012 :

■ Total des aires brûlées annuellement :



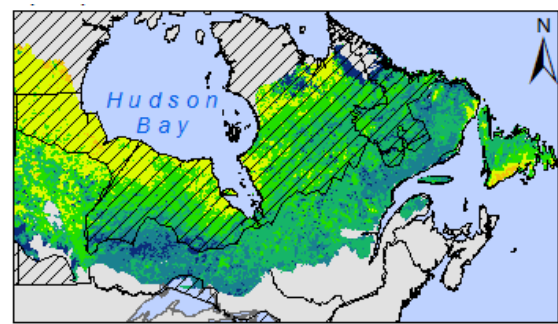
■ Proportion mensuelle de la superficie totale brûlée :



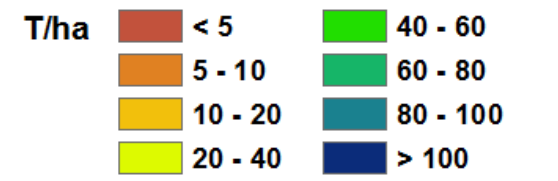
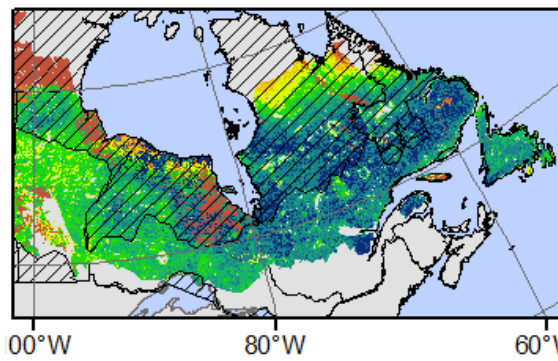
Résultats : Validation de la biomasse

2000 – 2006 :

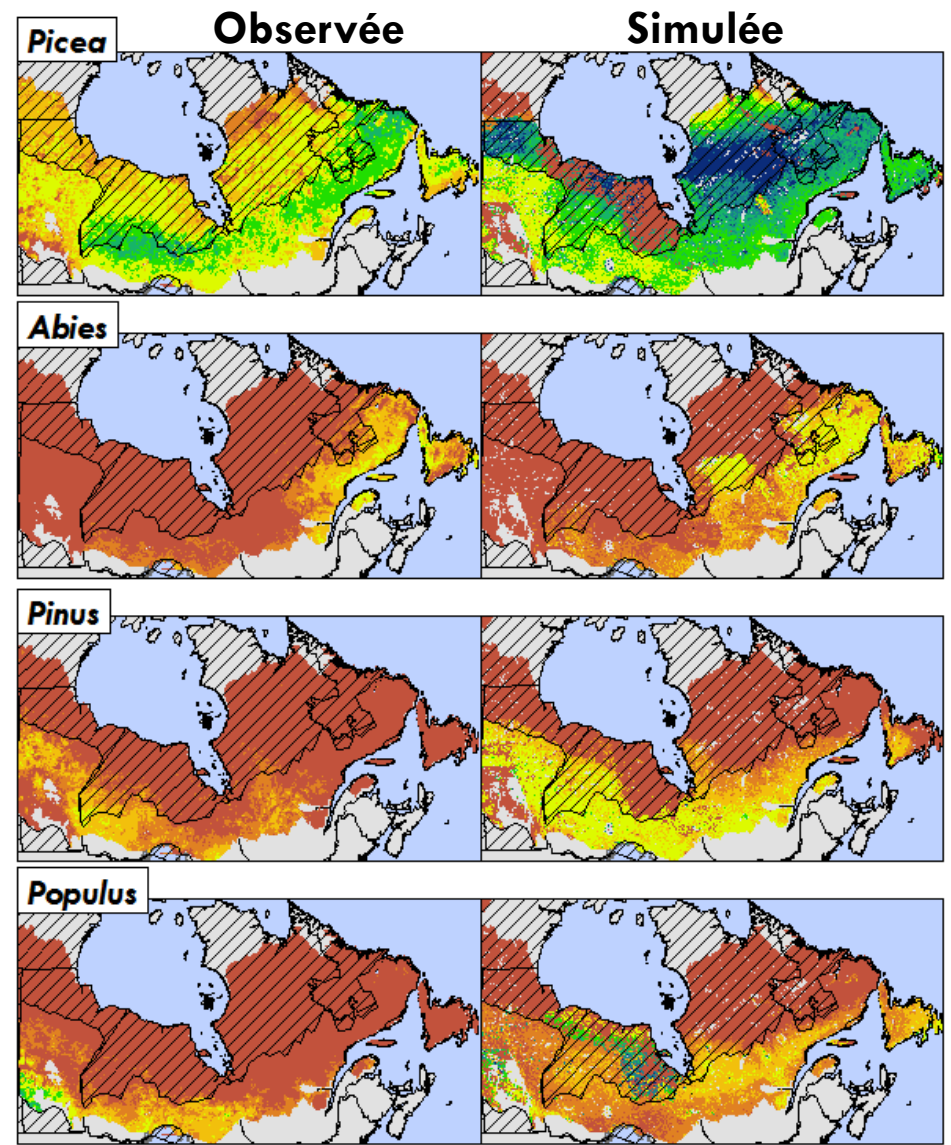
Biomasse totale observée



Biomasse totale simulée



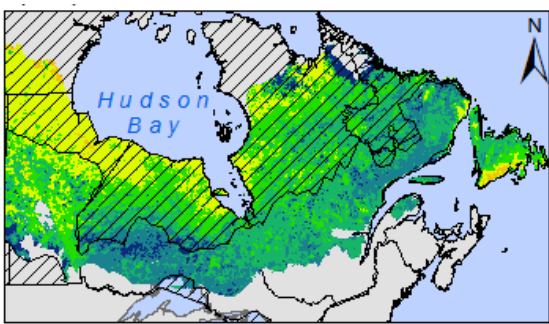
Genre spécifique :



Résultats : Validation de la biomasse

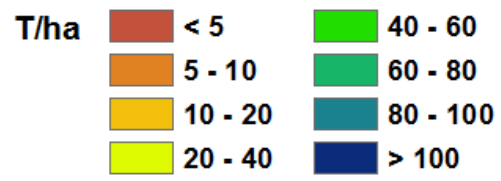
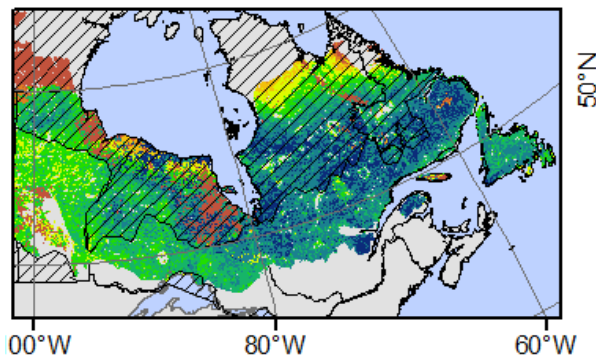
2000 – 2006 :

Biomasse totale observée



- ❖ Forêt aménagée: Juste un genre de feuillu!
- ❖ Régions nordiques: Pas assez de 🔥 !!
- ❖ Plaines d'Hudson:

Biomasse totale simulée



Tourbières :

association avec sphaignes,
pauvre disponibilité des nutriments

LPJ-LMfire

- Pas de paramétrisation pour le genre *Sphagnum spp.*
- Pas de processus de formation de tourbières



Résultats :

- Validation : ✓
- Histoire sur le passé récent :

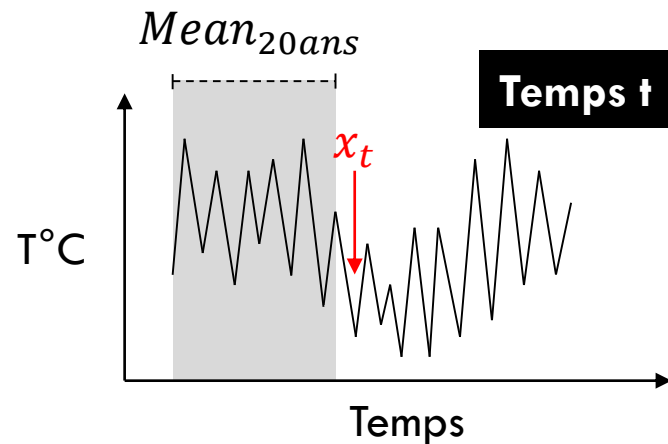
Feux

Productivité
primaire nette
(NPP)

Biomasse

Pourcentage
couvert
forestier

- Évolution spatiale sur 5 périodes de 20 ans
- Application séquentielle du t-test de Student sur 1 000 cellules :



$$diff(t) = Mean_{20ans} - x_t$$

Si $> 10\%$: changement de régime significatif

Résultats :

- Validation : ✓
- Histoire sur le passé récent :

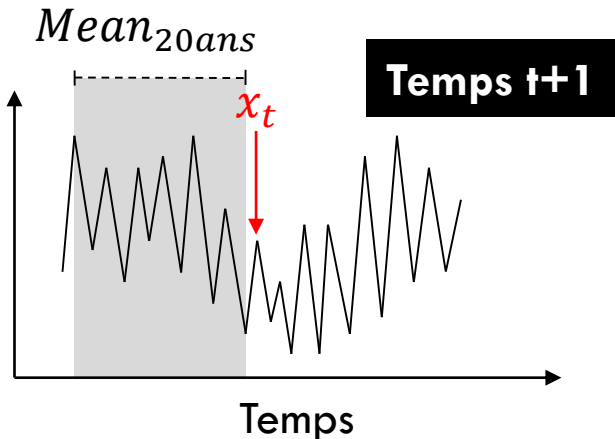
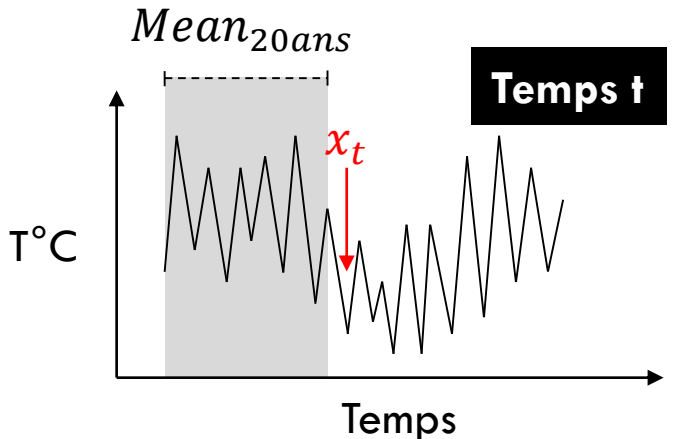
Feux

Productivité
primaire nette
(NPP)

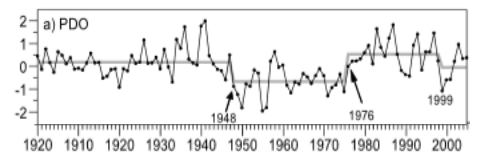
Biomasse

Pourcentage
couvert
forestier

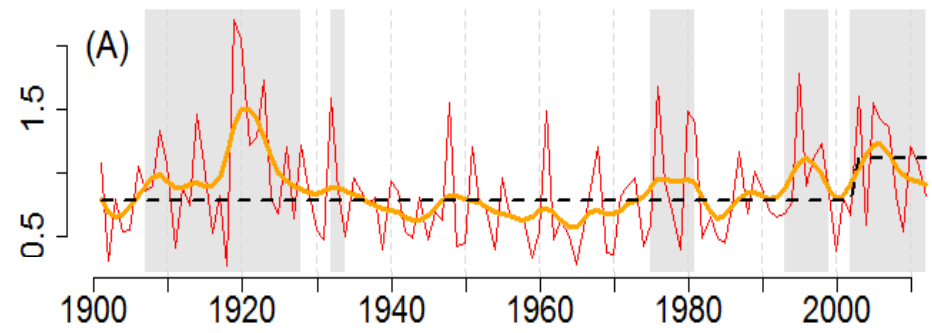
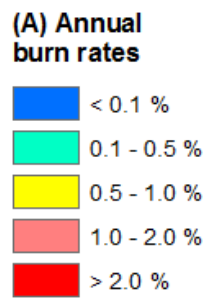
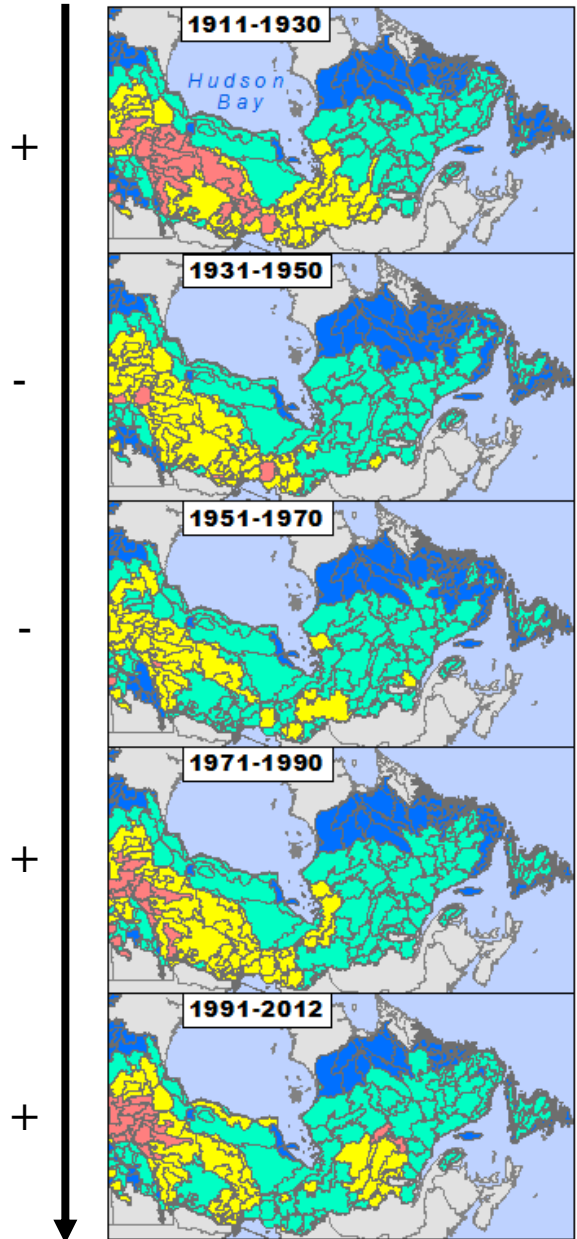
- Évolution spatiale sur 5 périodes de 20 ans
- Application séquentielle du t-test de Student sur 1 000 cellules :



$diff(t) = Mean_{20ans} - x_t$
Si $> 10\%$: changement de régime significatif



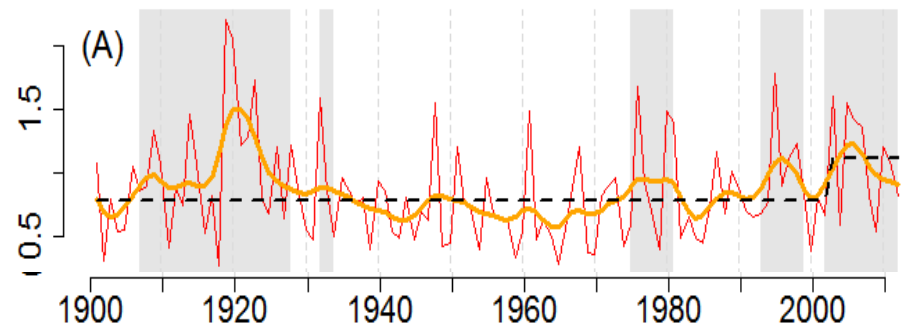
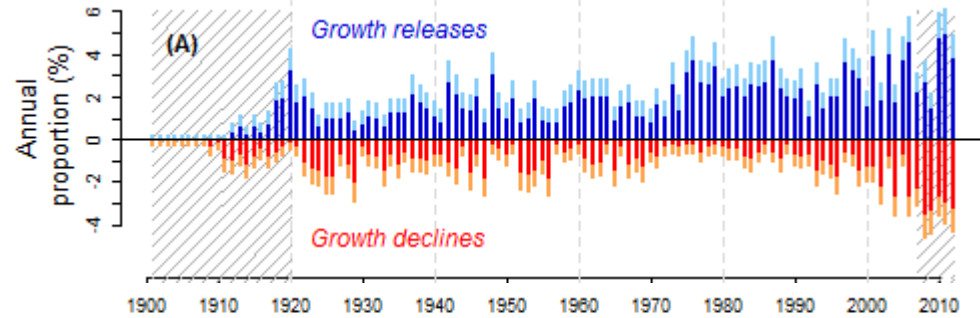
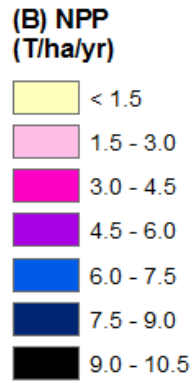
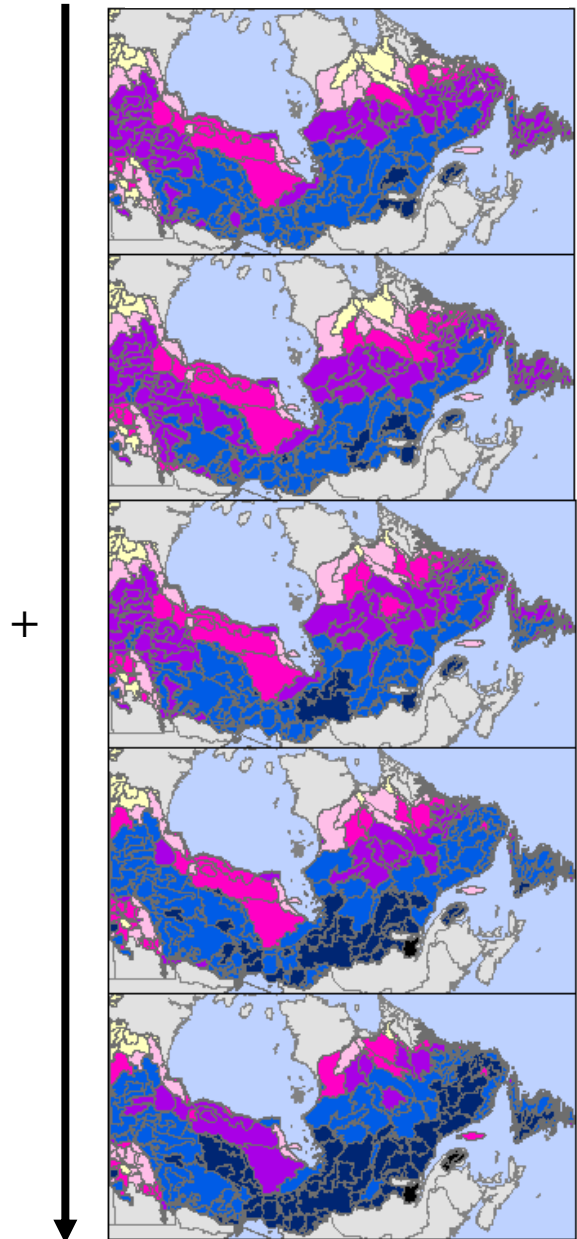
Résultats : Histoire des feux



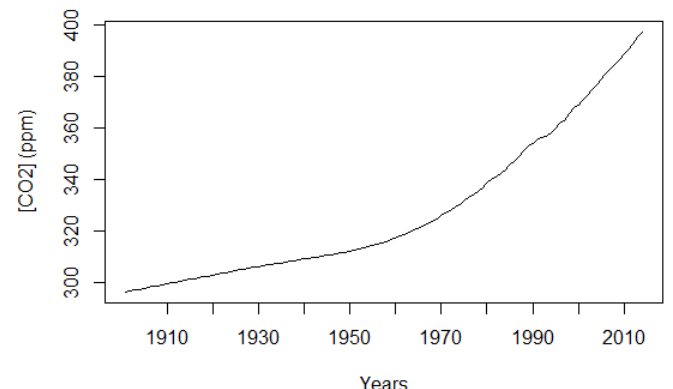
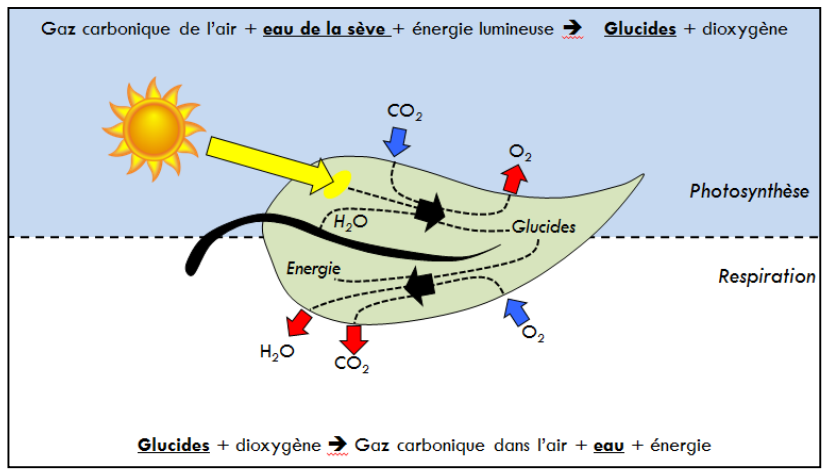
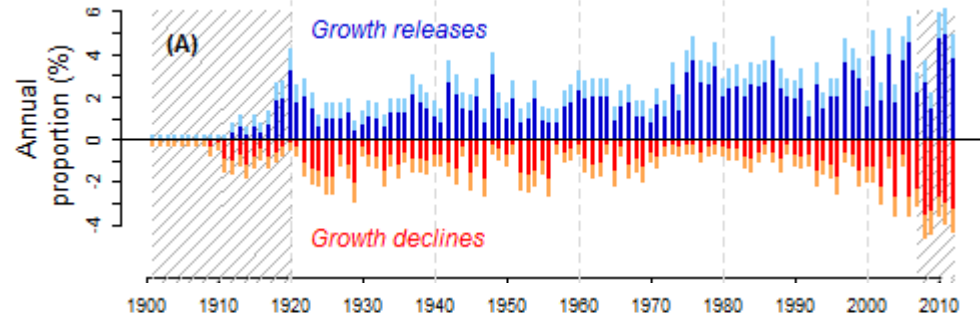
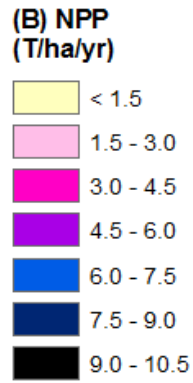
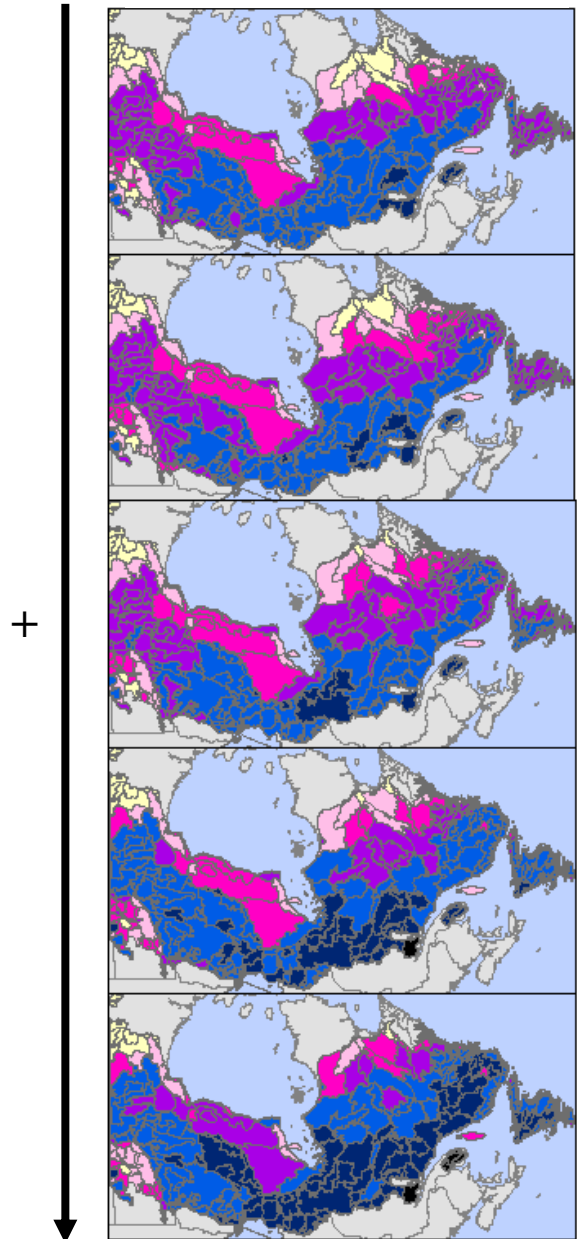
**Épisodes de plusieurs années
successives de haute activité de feux :**

- 1907-1928**
- 1932-1934**
- 1975-1981**
- 1993-1999**
- 2002-2012**

Résultats : Histoire de la productivité primaire nette



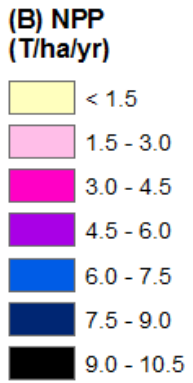
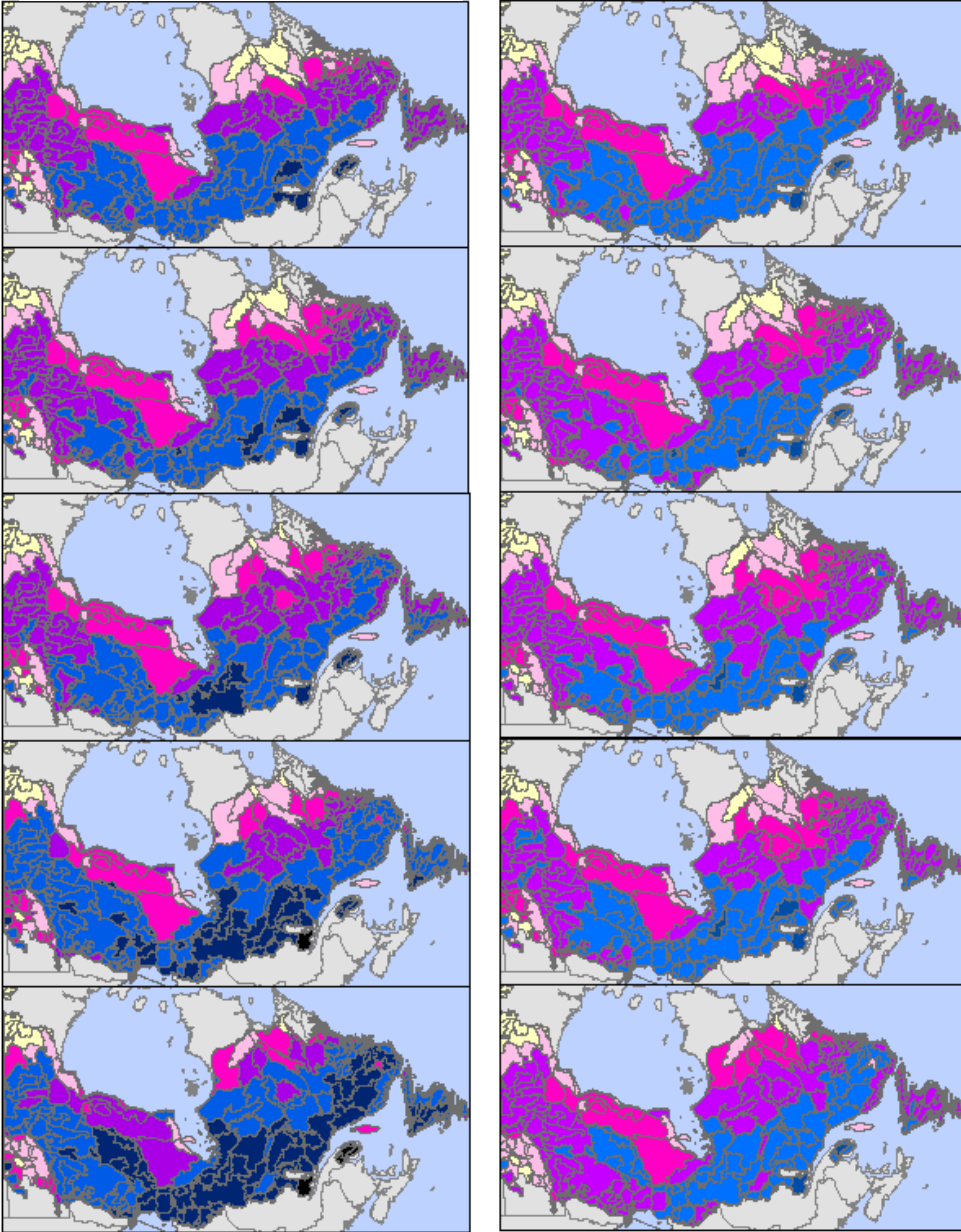
Résultats : Histoire de la productivité primaire nette



Résultats : Histoire de la productivité primaire nette

[CO₂] augmente

[CO₂] constant



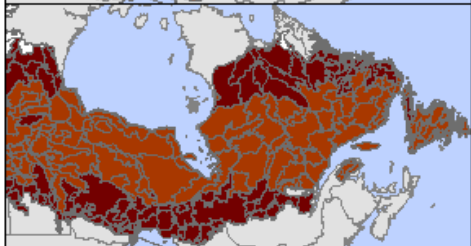
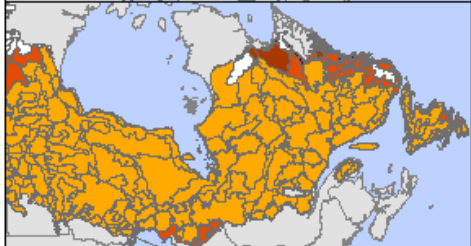
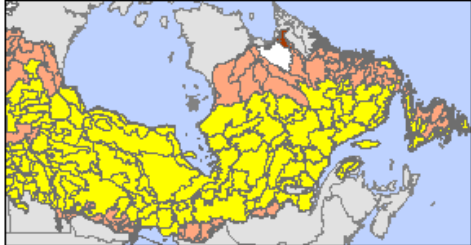
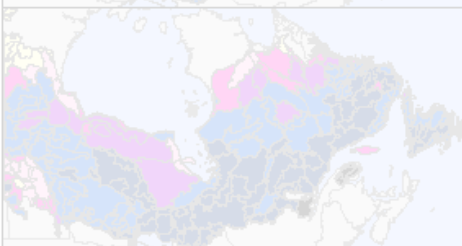
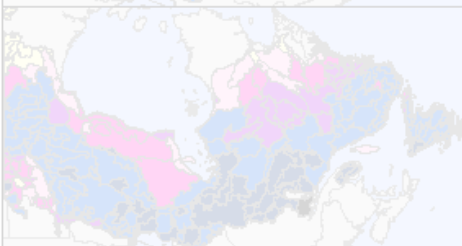
Résultats : Histoire de la croissance

[CO₂] augmente

[CO₂] constant



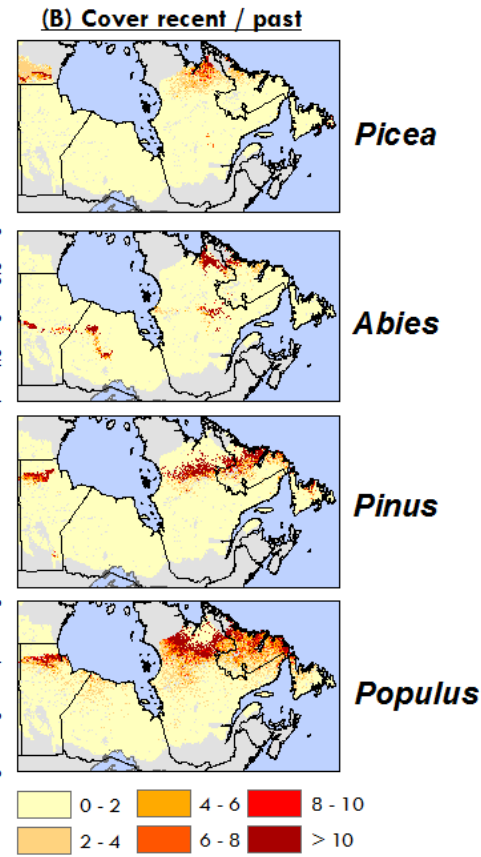
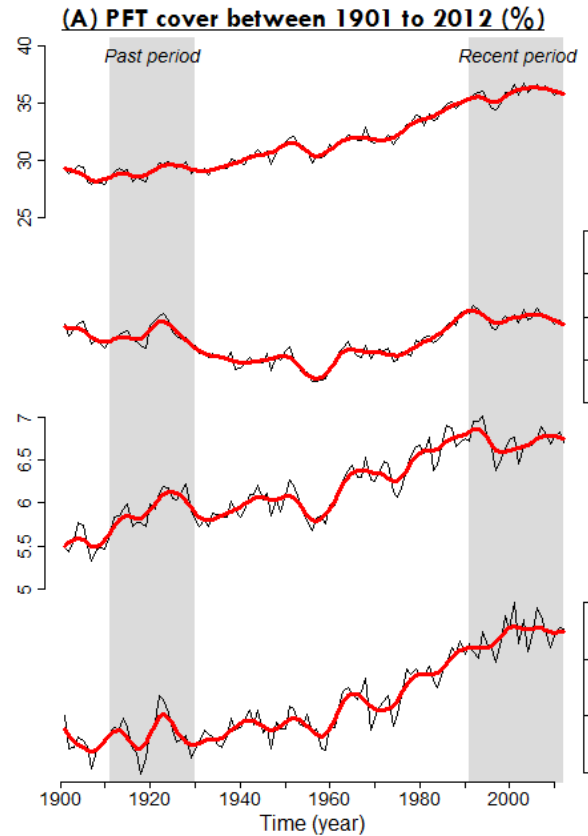
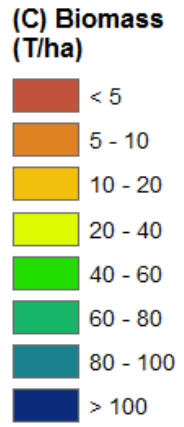
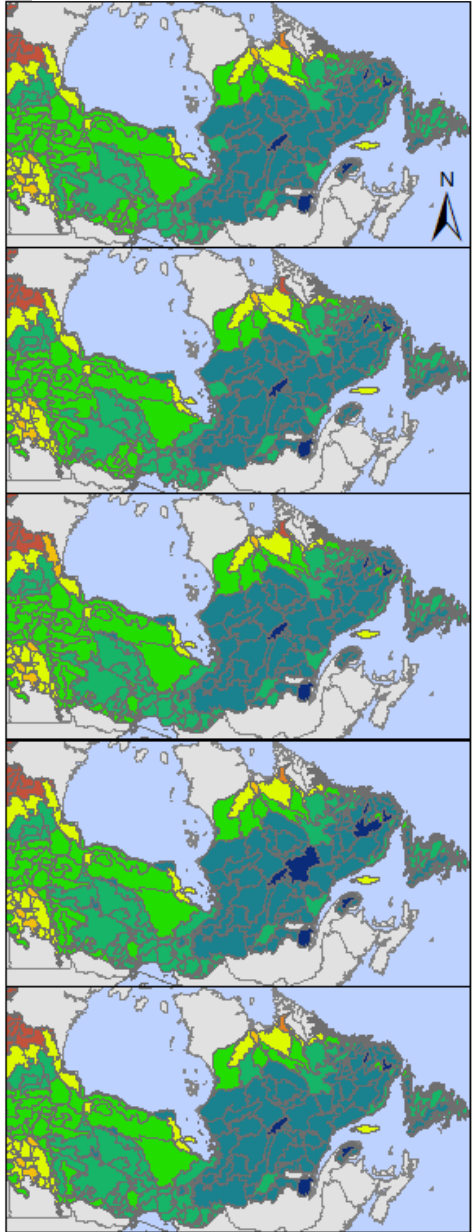
2.7%, 5.5%, 8.9%, 16.7% et 27.6%
Fort impact positif de la [CO₂]
Littérature: ~15-18%



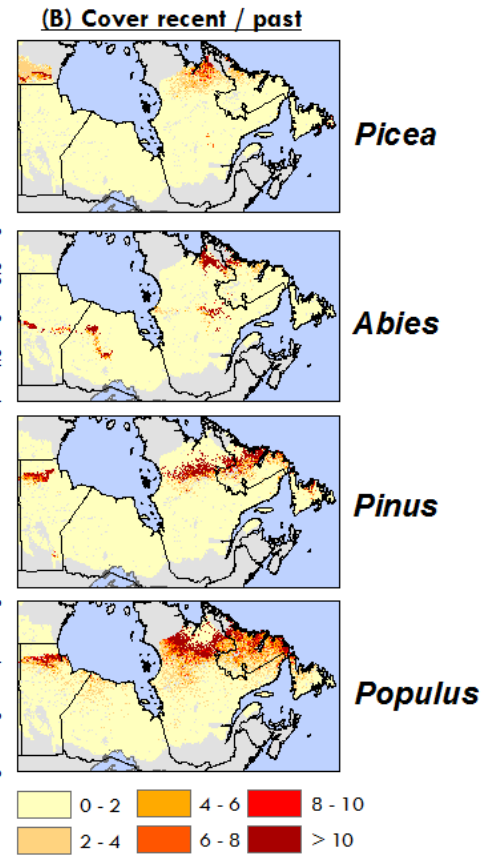
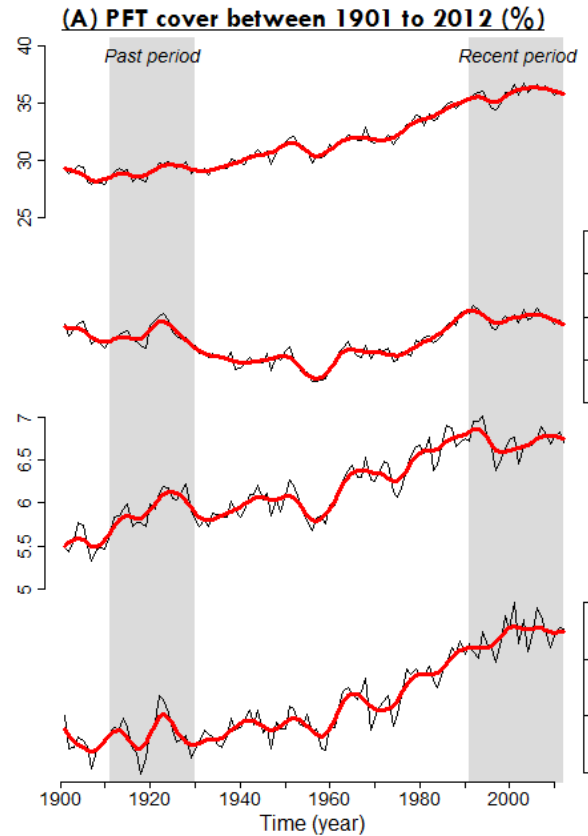
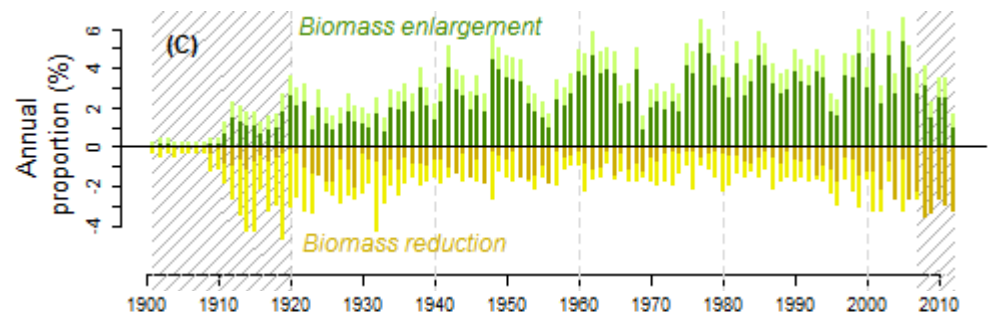
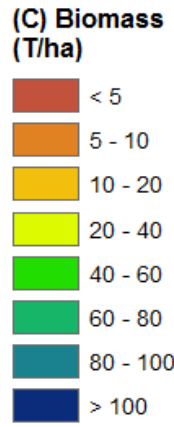
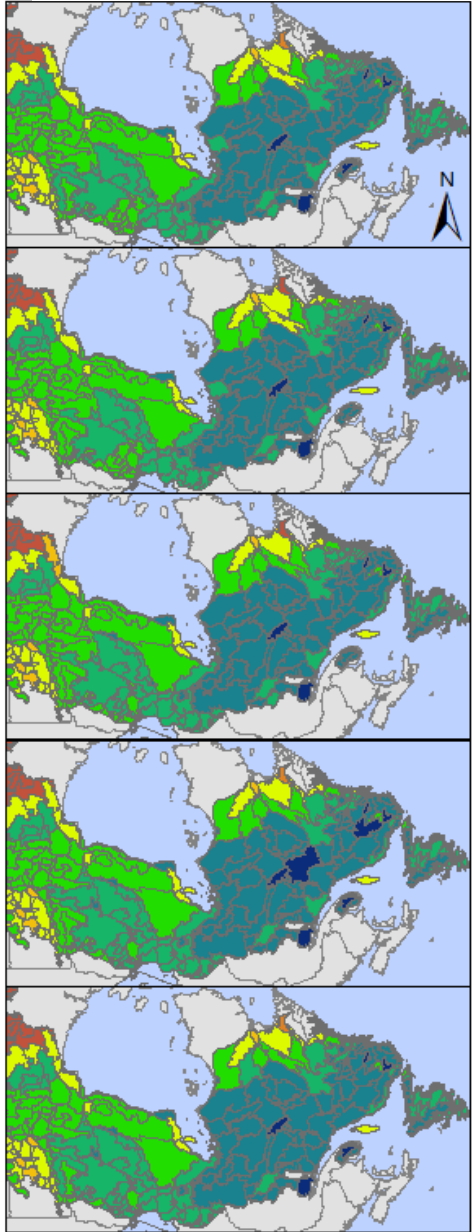
(C) Percentage of increase in NPP by [CO₂] effect

- < 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 30
- > 30

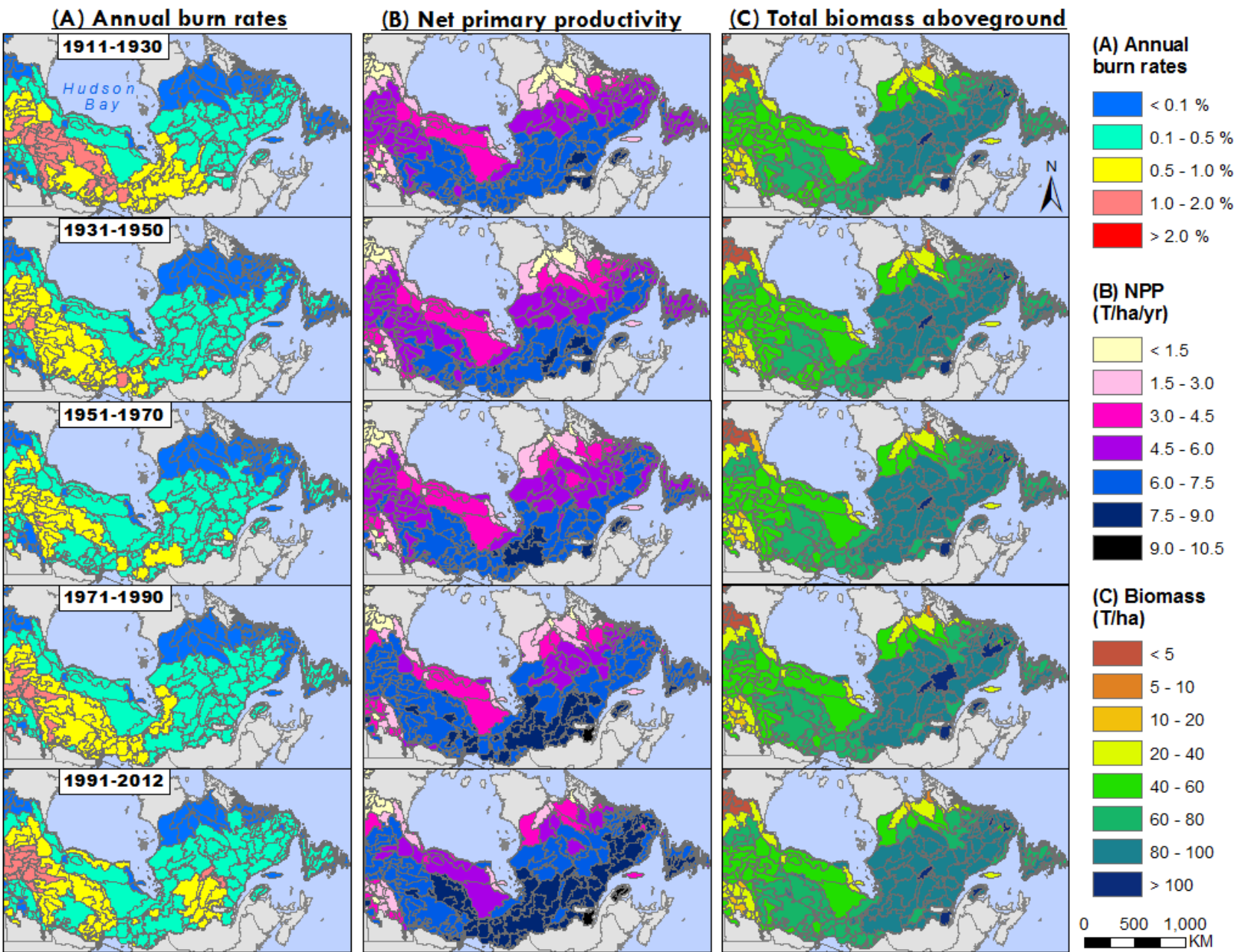
Résultats : Histoire de la biomasse



Résultats : Histoire de la biomasse



Conclusion





Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?

Objectif 1

✓ Paramétrisation pour notre zone d'étude
Amélioration des simulations de feux
Histoire sur le passé récent

= Calibration - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des feux naturels au cours des 100 dernières années, et leurs impacts sur la productivité et la croissance de la forêt.

Objectif 2

Implémentation d'un module de TBE
et validation dans le passé

= Développement - Validation

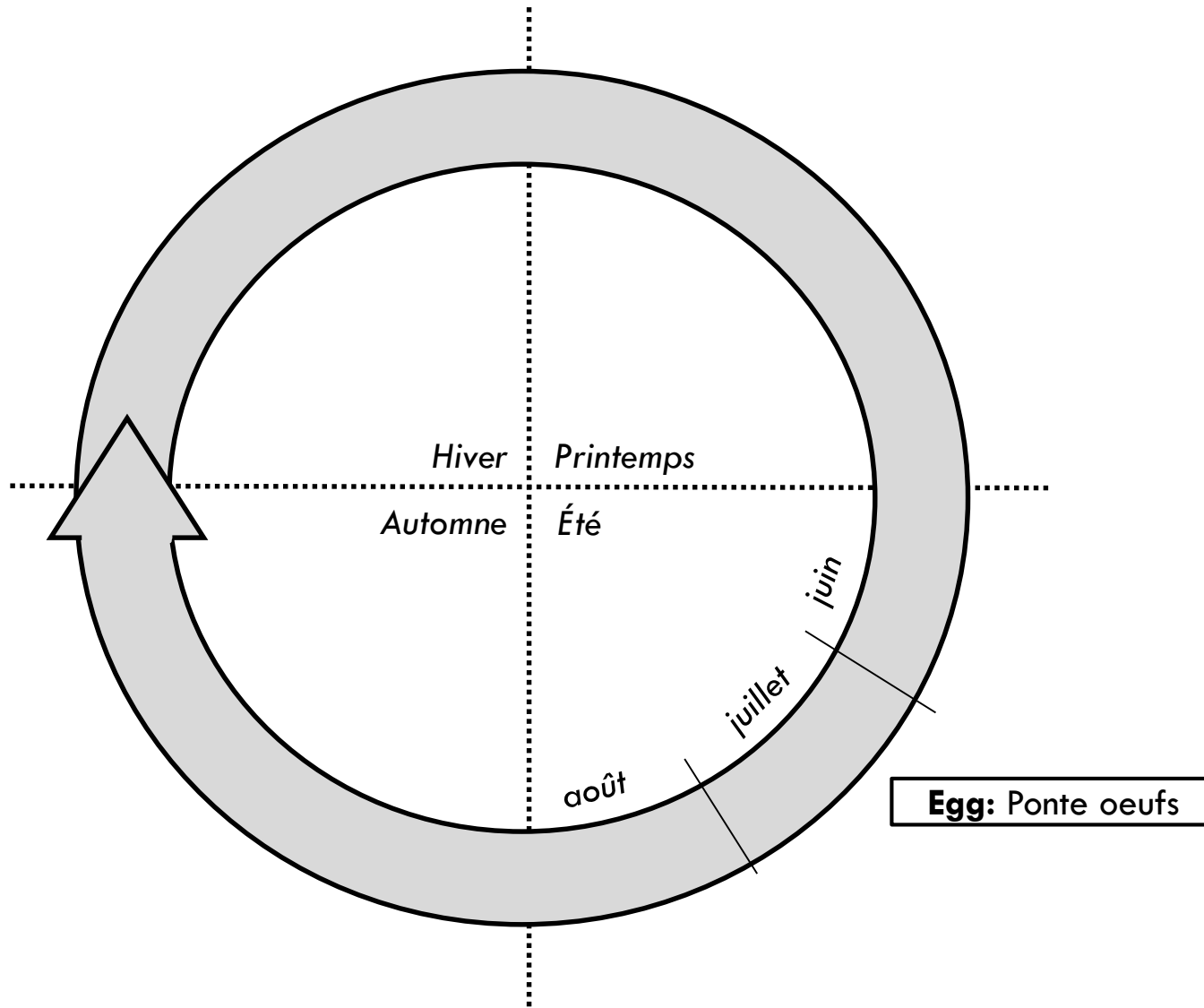
Évaluer les changements spatio-temporels des épidémies de TBE au cours des 6000 dernières années

Objectif 3

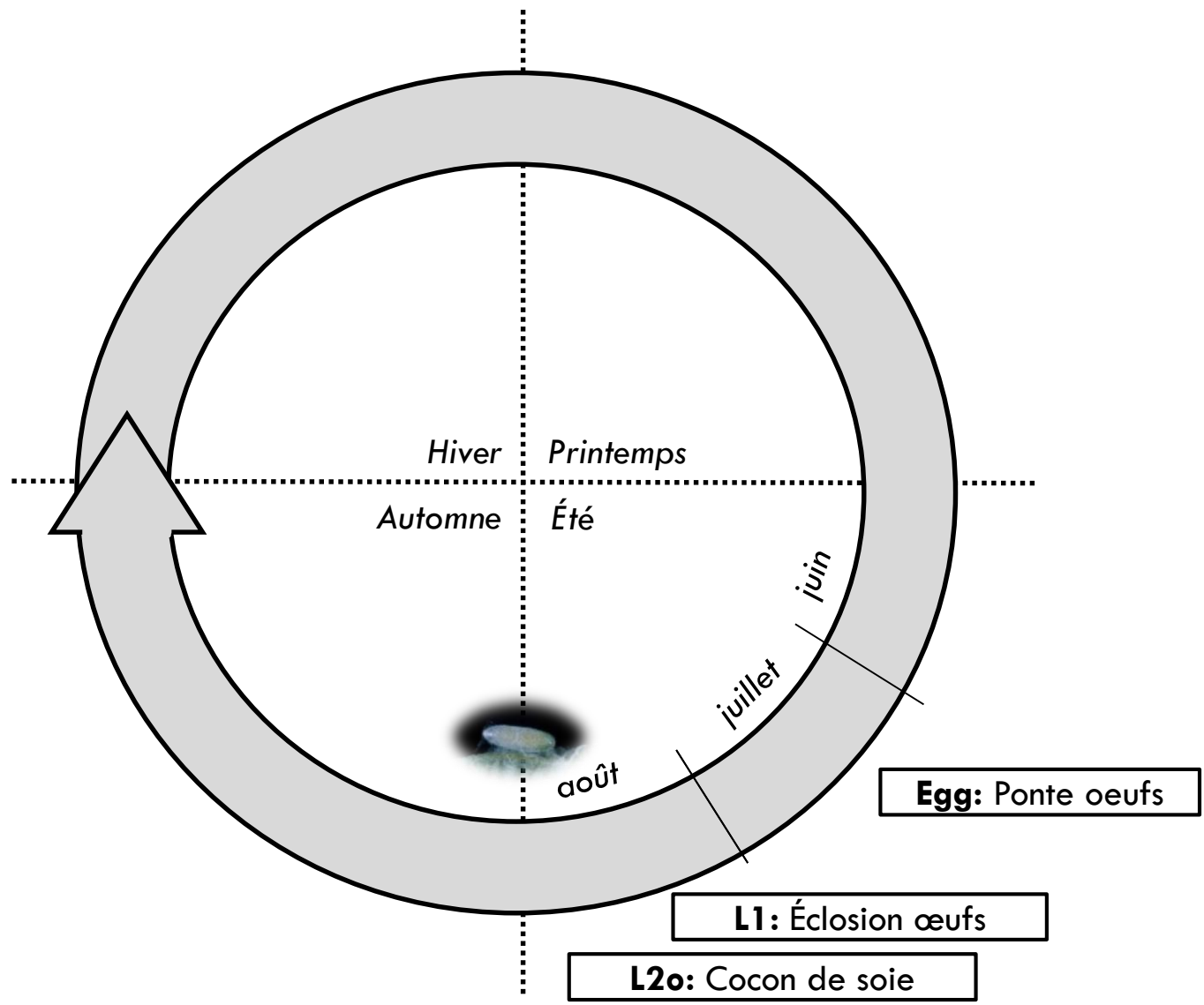
Simulations futures

= Application

Cycle de vie de la TBE



Cycle de vie de la TBE



Hiver

Printemps

Automne

Été

juin

juillet

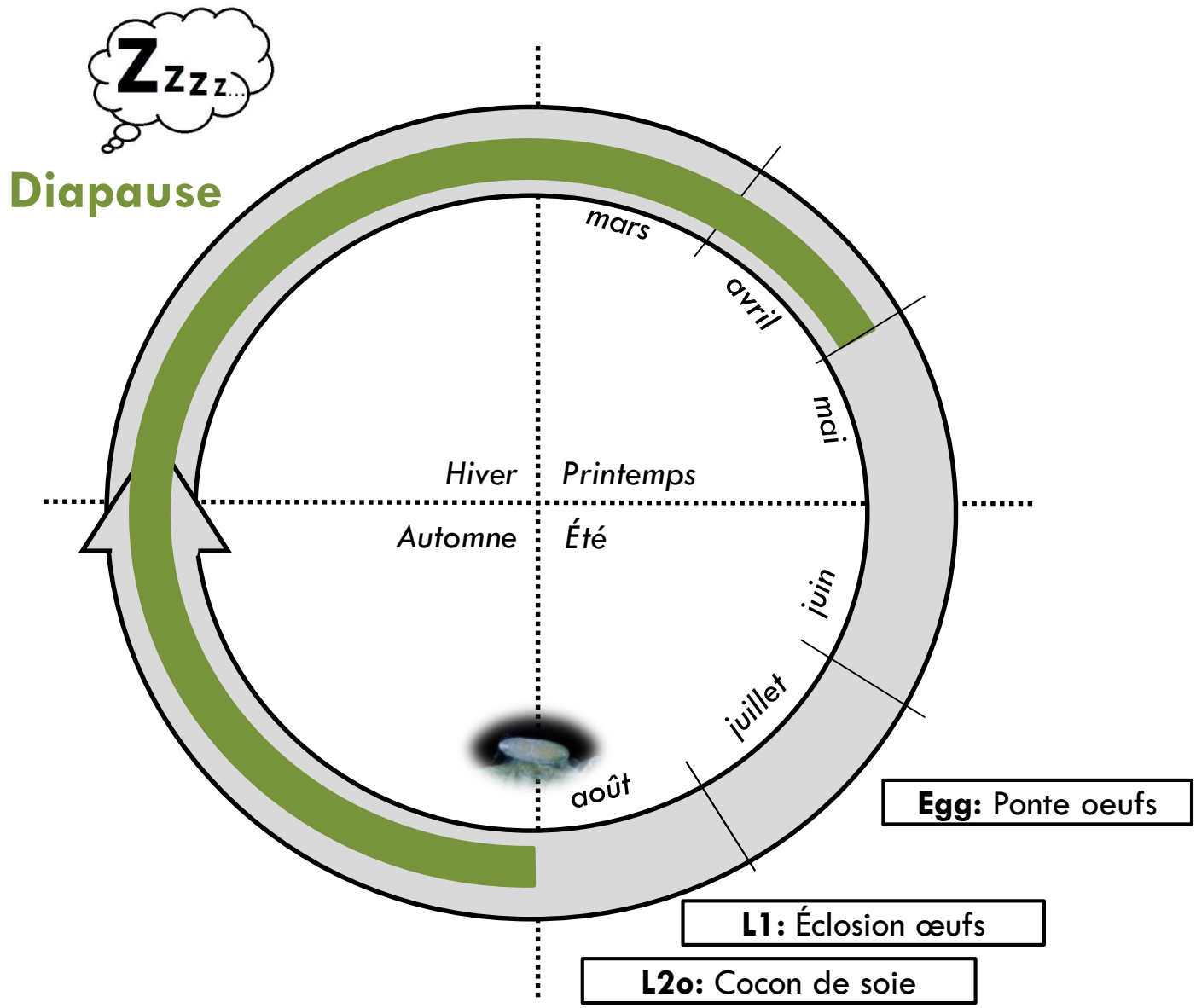
août

Egg: Ponte oeufs

L1: Éclosion œufs

L2o: Cocon de soie

Cycle de vie de la TBE



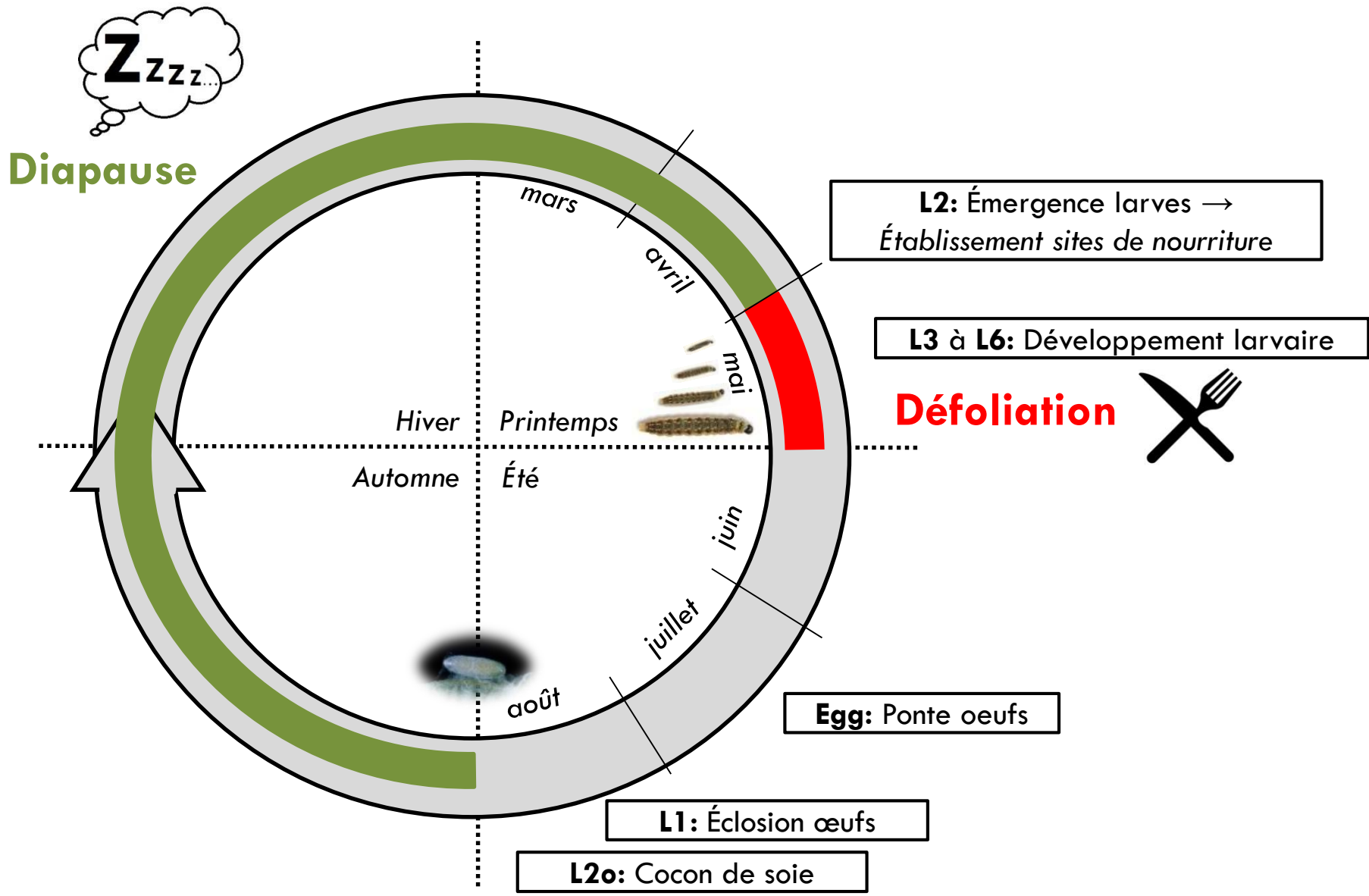
Diapause

Egg: Ponte oeufs

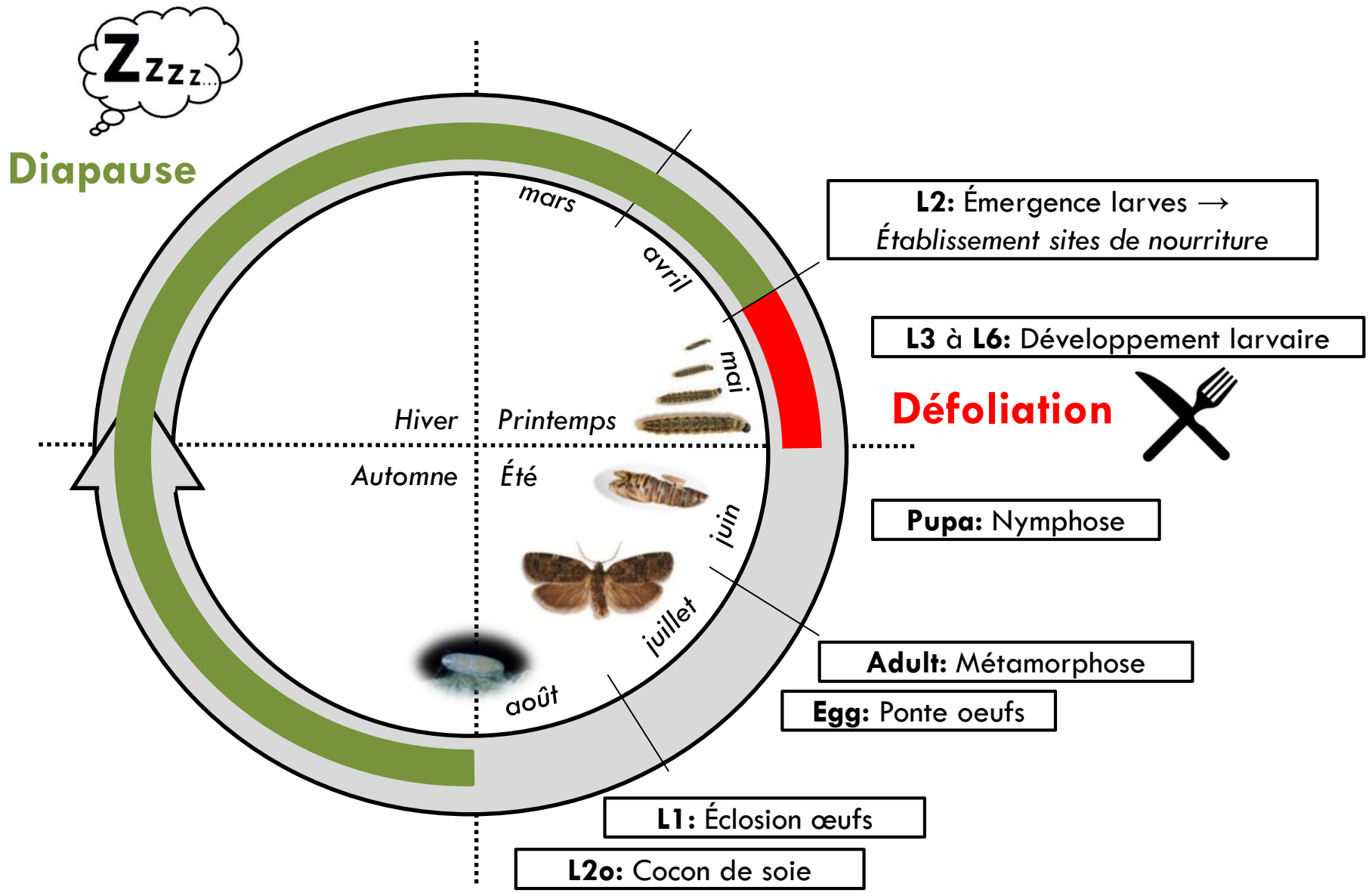
L1: Éclosion œufs

L2o: Cocon de soie

Cycle de vie de la TBE



Cycle de vie de la TBE



Cycle de vie de la TBE



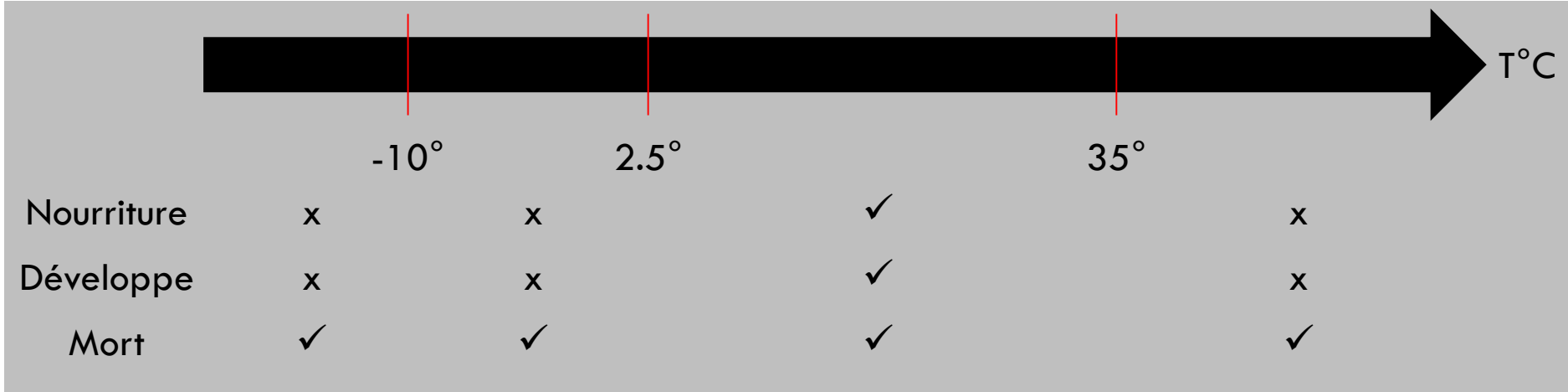
-10°

2.5°

35°

Nourriture	x	x	✓	x
Développe	x	x	✓	x
Mort	✓	✓	✓	✓

Cycle de vie de la TBE



Survie TBE

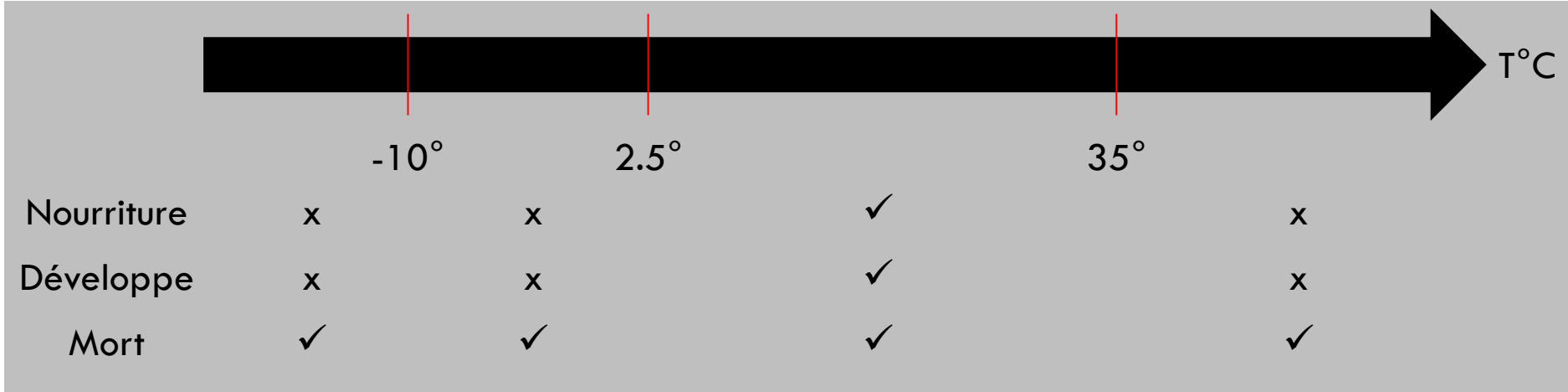
Énergie



Mort



Cycle de vie de la TBE



Survie TBE

Énergie



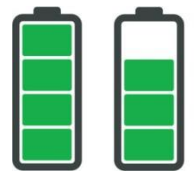
Mort



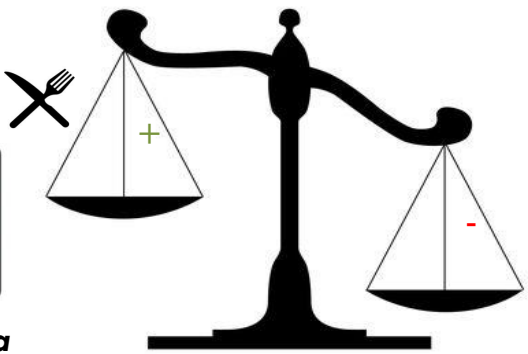
1 œuf = énergie initiale

Énergie calorifique

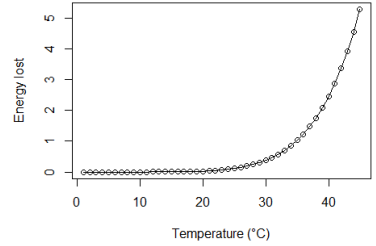
Défoliation



Abies Picea



Développement



Épuisement par température

Cycle de vie de la TBE



	-10°	2.5°	35°	
Nourriture	x	x	✓	x
Développe	x	x	✓	x
Mort	✓	✓	✓	✓

Survie TBE

Énergie



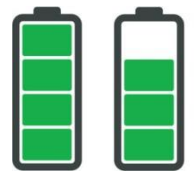
Mort



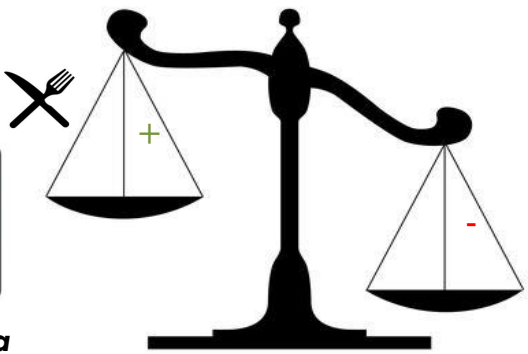
1 œuf = énergie initiale

Énergie calorifique

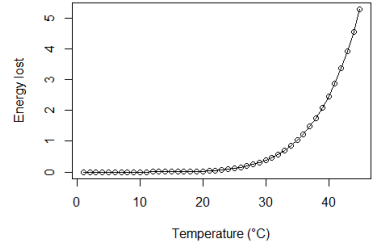
Défoliation



Abies Picea



Développement



Épuisement par température

- Gel (-10°C)
- Vieillesse
- Naturelle

- Famine
- Énergie

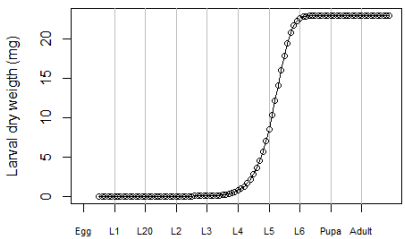


Plusieurs étapes :

- Taux de développement
- Suivi de population
- Ponte des œufs par les femelles adultes
- Calcul du poids de la population



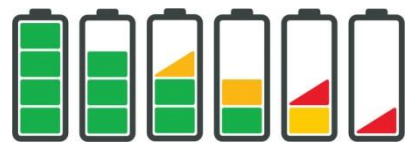
= 200 œufs max.



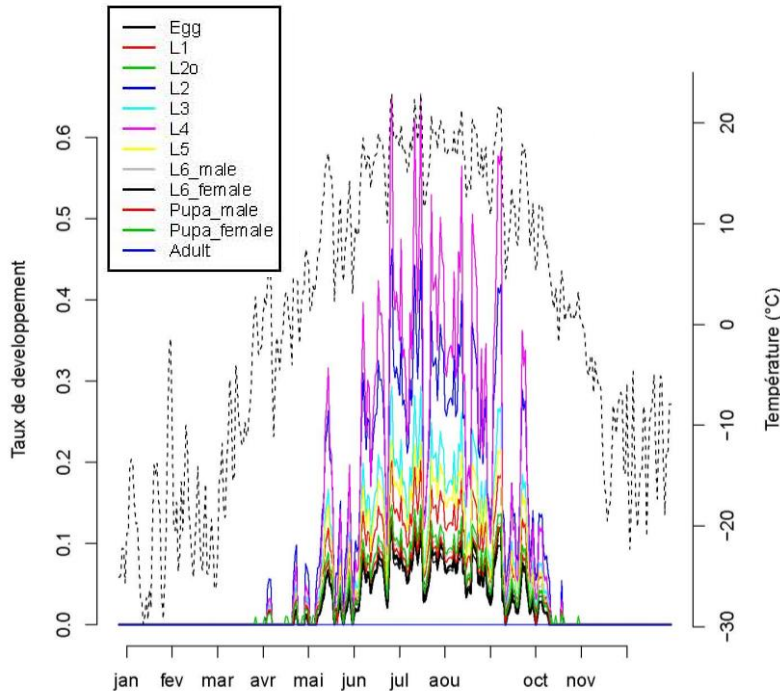
- Biomasse consommée entre L2 et L6



- Calcul énergie

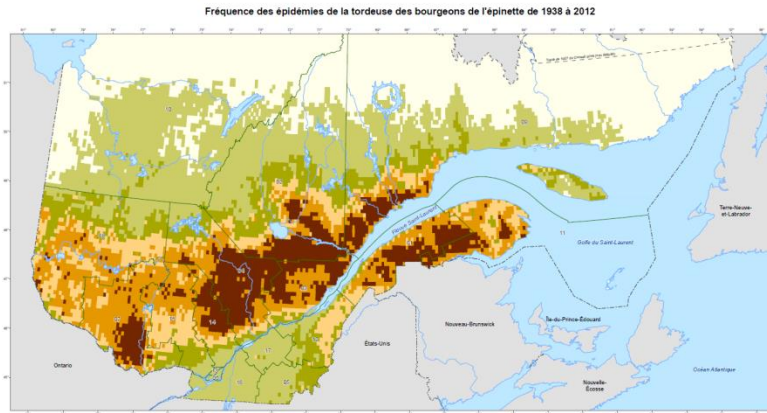


- Condition d'application de mortalité



Validation du modèle de TBE

- Passé récent : 1967 - 2016



- Passé : 6000 dernières années



Carottes de tourbes
(L.A. Lagneau)



Fécès

Capsules céphaliques



Quelle sera la réponse future de la végétation face aux changements climatiques et leurs impacts sur les deux perturbations naturelles?

Objectif 1



Paramétrisation pour notre zone d'étude
Amélioration des simulations de feux
Histoire sur le passé récent

= Calibration - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des feux naturels au cours des 100 dernières années, et leurs impacts sur la productivité et la croissance de la forêt.

Objectif 2



Implémentation d'un module de TBE
et validation dans le passé

= Développement - Validation

Évaluer les changements spatio-temporels des épidémies de TBE au cours des 6000 dernières années

Objectif 3

Simulations futures

= Application

MERCI DE VOTRE ATTENTION!



DES QUESTIONS?