

**Atlas de la biodiversité du Québec nordique**  
**Effets des changements climatiques**  
**sur la biodiversité**





---

# Atlas de la biodiversité du Québec nordique

Effets des changements climatiques sur la biodiversité

---

Auteur : Jason Samson



Ouranos

1 août 2012

## Table des matières

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale .....                                                                           | 4  |
| Perturbations naturelles .....                                                                        | 6  |
| Les vents du Québec nordique .....                                                                    | 6  |
| Les vents dans les écotones .....                                                                     | 6  |
| Les chablis .....                                                                                     | 7  |
| Les vents dans un contexte de changements climatiques.....                                            | 8  |
| Intégration des vents dans l'Atlas.....                                                               | 8  |
| Variables de vents.....                                                                               | 9  |
| Résumé des analyses .....                                                                             | 9  |
| Les feux de forêts.....                                                                               | 12 |
| Les insectes ravageurs .....                                                                          | 17 |
| Changements phénologiques .....                                                                       | 21 |
| Analyse des domaines bioclimatiques en grappes .....                                                  | 28 |
| Analyse des variations climatiques .....                                                              | 35 |
| Résultats.....                                                                                        | 36 |
| Conclusions .....                                                                                     | 38 |
| Résumé des travaux accomplis.....                                                                     | 38 |
| Priorité pour le développement futur du volet changements climatiques de l'Atlas .....                | 39 |
| Débiaisage du MRCC à 15km .....                                                                       | 39 |
| Sensitivité au choix de la région écologique à l'étude dans les études des variations climatiques ... | 39 |
| Sensitivité au choix des variables climatiques dans les études des variations climatiques .....       | 40 |
| Littérature citée.....                                                                                | 41 |
| Annexe 1 : Description des variables climatiques utilisées .....                                      | 43 |

## Introduction générale

Le volet changements climatiques de l'Atlas de la biodiversité du Québec nordique a pour but de fournir les données et les outils nécessaires pour mieux appréhender l'influence du climat sur les écosystèmes et la biodiversité. Les travaux effectués se distinguent d'autres études sur l'impact des changements climatiques sur la biodiversité au Québec (p.ex. le projet CC-Bio<sup>1</sup>, la revue de littérature de la CSBQ<sup>2</sup>) de trois manières.

Premièrement, les espèces et les communautés du Québec nordique subissent des conditions climatiques extrêmes qui conditionnent leur répartition et leur comportement. Ainsi, nous avons développés des indices climatiques mieux adaptés aux stratégies de survie et de reproduction de la faune et la flore du Québec nordique. Des variables bioclimatiques reliées aux périodes de croissance et de dormance ainsi que des seuils de tolérance physiologique particuliers à ces deux périodes de l'année ont été choisies. Nous avons aussi fait l'étude des changements dans la longueur de la saison de croissance.

Deuxièmement, nous avons intégré à l'Atlas des données sur l'impact des changements climatiques sur les grandes perturbations naturelles. Ces données sont très importantes puisque la dynamique des grands écosystèmes nordiques est fortement reliée à ces perturbations. Ainsi, un changement dans la période des occurrences, la fréquence, ou la magnitude des perturbations naturelles peut perturber la succession normale et modifier les écosystèmes. Les perturbations intégrées dans l'Atlas correspondent aux perturbations principales au Québec, soit la tordeuse des bourgeons de l'épinette, les feux de forêt, et les grands vents.

Troisièmement, nous proposons un outil afin d'évaluer l'importance des changements auxquels les écosystèmes feront face dans un contexte de changements climatiques. Cet outil permettra d'inclure les changements climatiques dans la planification et l'analyse du réseau des aires

---

<sup>1</sup> [http://cc-bio.uqar.ca/fr\\_summary.htm](http://cc-bio.uqar.ca/fr_summary.htm)

<sup>2</sup> [http://www.ouranos.ca/media/publication/231\\_Revuedelitterature-ResumeWeb.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/231_Revuedelitterature-ResumeWeb.pdf)

protégées dont est responsable la direction du Patrimoine écologique et des Parcs du ministère de l'Environnement et des Parcs.

## **Perturbations naturelles**

La compréhension de la dynamique des écosystèmes nordique passe par la connaissance des grandes perturbations naturelles qui les façonnent. Ces perturbations transforment le paysage et permettent le maintien d'une mosaïque qui concourt à sa richesse. La succession écologique qui suit ces grandes perturbations pourrait être fortement influencée par les changements climatiques compte tenu que des modifications dans la période des occurrences ou dans leur force peuvent perturber la succession normale et favoriser la colonisation par de nouvelles espèces. Les plus importantes perturbations naturelles pour le Nord du Québec sont les feux de forêts, les épidémies d'insectes ravageurs, et les grands vents. Nous avons intégré au projet d'Atlas des données issues d'études sur l'impact des changements climatiques sur les perturbations naturelles au Québec.

### **Les vents du Québec nordique**

Les vents ont une influence importante sur les écosystèmes nordiques. En plus des chablis qu'ils peuvent causer dans la forêt boréale, c'est surtout dans l'anémomorphose des espèces et d'écosystèmes que leur influence est plus remarquable comme le prouve la structure rabougris des épinettes, saules et aulnes et l'absence d'arbre sur les sommets et dans la toundra. Il est donc nécessaire de tenir compte des vents dans le projet d'Atlas mais aussi de leurs modifications potentielles, tant en magnitude qu'en orientation, dues aux changements climatiques.

### **Les vents dans les écotones**

Les écotones sont les régions entre deux écosystèmes où la structure spatiale et la composition d'un écosystème change graduellement pour passer à un autre écosystème. L'écotone entre la taïga et la toundra est particulièrement sensible à l'action du vent, d'ailleurs son rôle peut parfois être plus important que le manque de chaleur pour déterminer la position de la limite nordique des arbres, les patrons spatiaux de l'écotone et la croissance des arbres (p.ex. pleine

taille, krummholz, ou bien « en tapis de sol ») (Holtmeier & Broll, 2010). Au-delà des effets physiologiques sur la croissance des arbres, le vent permet aussi la dispersion des graines, mais il peut aussi empêcher l'établissement de nouvelles tiges sur un sol dénudé et exposé à de forts vents (Holtmeier & Broll, 2010). Le vent peut aussi éroder le sol et relocaliser la neige. Le couvert nival protégeant les tiges d'épinettes noires, la croissance radiale peut être significativement réduite selon l'effet du vent sur la neige (Payette *et al.*, 1996). L'augmentation de la température prévue dans le Nord du Québec pourrait donc avoir des effets contre-intuitifs sur la croissance des arbres de par une défoliation mécanique par le vent plus sévère et une détérioration accrue des tiges à cause de la diminution de l'épaisseur du couvert nival protecteur.

Les effets des changements climatiques sur la végétation nordique sont par contre bien documentés au Québec. Par exemple, Tremblay (2010) a comparé des photographies aériennes dans la région de Kangiqsualujjuaq prises en 1964 et en 2003. Il a découvert que plus de la moitié du terrain dénudé d'arbres ou d'arbustes fut colonisé, principalement par le bouleau nain (*Betula glandulosa* Michx.). Une étude basée sur l'imagerie satellitaire suggère que le Nord du Québec s'est verdit dans les 25 dernières années (McManus *et al.*, 2012). L'augmentation de la surface foliaire observée par McManus et collègues (2012) était par contre très différente selon les écosystèmes. La toundra arbustive et de graminées est beaucoup plus verte qu'elle ne l'était tandis que les peuplements forestiers ont peu changé. Les changements climatiques, combinés aux vents, devraient donc transformer rapidement l'écotone entre la taïga et la toundra arbustive, ainsi que l'écotone entre la toundra arbustive et la toundra herbacée.

### Les chablis

Les chablis sont surtout présents en forêt boréale mature, où la matrice du couvert est dense et prévient l'envahissement par des espèces exogènes. Ainsi, les chablis associés à de nouvelles conditions climatiques pourraient créer des îlots de colonisation d'espèces à la limite nordique de leur aire de distribution. Le risque de chablis dépend de l'interaction de plusieurs facteurs comme la profondeur des sols, la présence d'espèces plus vulnérables (p.ex. le sapin baumier) ou de peuplements très âgés, et de la vitesse du vent (Ruel, 2000). Une approche de



modélisation des chablis en fonction de la topographie et des caractéristiques des vents a été développée (Ruel *et al.*, 2002) et est présentement perfectionnée, mais l'exercice ne peut se faire, pour le moment, que sur de petites régions compte tenu de la puissance de calcul requise pour traiter l'information à haute résolution.

### **Les vents dans un contexte de changements climatiques**

Les changements climatiques devraient déplacer les trajectoires de tempêtes vers le Nord et la fréquence des vents extrêmes (représentant les percentiles 95%-100%) devrait être stable ou légèrement moindre dans le Québec nordique selon une étude d'ensemble de simulations globales (Gastineau & Soden, 2009). Les simulations du MRCC suggèrent quant à elles des changements mineurs sur l'ensemble du territoire nord-américain; des changements significatifs du régime des vents pourront se produire à l'échelle régionale sur une base mensuelle ou saisonnière (communication personnelle avec Jean-Pierre Savard, Ouranos, juin 2012). Par exemple, la côte est de la Baie d'Hudson devrait être exposée à plus de vents forts et persistants du secteur ouest en décembre et janvier. Ces augmentations s'expliquent, respectivement, par l'apparition plus tardive de la couverture de glace sur la Baie d'Hudson et par un maintien prolongé de centres cycloniques dans le Nord de la baie d'Hudson au début de l'hiver. Un rapport écrit par Jean-Pierre Savard et collègues sera disponible sous peu sur le site de ce projet au Ministère des Transports du Québec<sup>3</sup>.

### **Intégration des vents dans l'Atlas**

Étant donné la complexité d'analyse requise pour bien comprendre les vents prédits par les simulations climatiques et les changements relativement mineurs anticipés, seules les données de vents observées ont été intégrées à l'Atlas.

Les données de vent proviennent de l'Atlas canadien d'énergie éolienne<sup>4</sup>. Elles représentent les conditions de vents dans le Québec nordique basées sur les réanalyses NCAR/NCEP disponible aux six heures sur une maille de 2.5° pour la période 1958-2000. Ces données sont par la suite

---

<sup>3</sup> <http://www.inframaritimes-nunavik-cc.mtq.gouv.qc.ca/Pages/Accueil.aspx>

<sup>4</sup> <http://www.windatlas.ca/fr/index.php>

traitées à méso-échelle par un modèle compressible communautaire (MC 2) à une résolution de 5km. La rugosité du terrain (une mesure de l'hétérogénéité topographique qui provoque une diminution de la vitesse des vents) est basée sur les données de l'USGS à une résolution de 900m. La méthodologie complète est disponible sur le site web de l'Atlas canadien d'énergie éolienne.

### **Variables de vents**

Les variables intégrées à l'Atlas représentent les vents à deux élévations (30m et 50m au-dessus du sol) durant l'année ou bien par saison. Les dix catégories (i.e. 2 élévations X 5 période de l'année) offrent ensuite: 1) La moyenne et l'écart-type de la vitesse du vent, 2) La vitesse du vent, en 27 classes (0-0.2, 0.2-1, 1-2, 2-3,...,>25m/s), pour 12 catégories d'orientations (i.e. 30° pour chaque catégorie). Les temps de retour des grands vents, basé sur une distribution normale, ont été aussi dérivés des données de l'Atlas canadien d'énergie éolienne. On définit les grands vents comme étant supérieur au niveau 6 de l'échelle de Beaufort (>50km/h). Les données, en format shapefile/dbf, sont disponibles avec un fichier de méta-données ainsi qu'une présentation powerpoint avec les figures pour toutes les variables ainsi que certaines analyses et détails méthodologique.

### **Résumé des analyses**

Les données de vents à 30m ont les même patrons spatiaux que celles à 50m mais leur magnitude est plus faible compte tenu de l'effet de rugosité plus important à 30m qu'à 50m (Figure 1). Il est donc conseillé de faire les analyses avec les données à 30m, qui représentent mieux la réalité des écosystèmes<sup>5</sup>. Les grands vents sont beaucoup plus fréquents durant l'automne que l'été (Figure 2). Voir l'annexe 1 (VentQc.ppt) pour les figures de toutes les variables.

---

<sup>5</sup> Il est à noter que L'Atlas canadien de l'énergie éolienne a aussi des données à 10m d'élévation qui peuvent être fournies sur demande. Cette information n'était pas connue de l'auteur au moment de la création de la base de données.

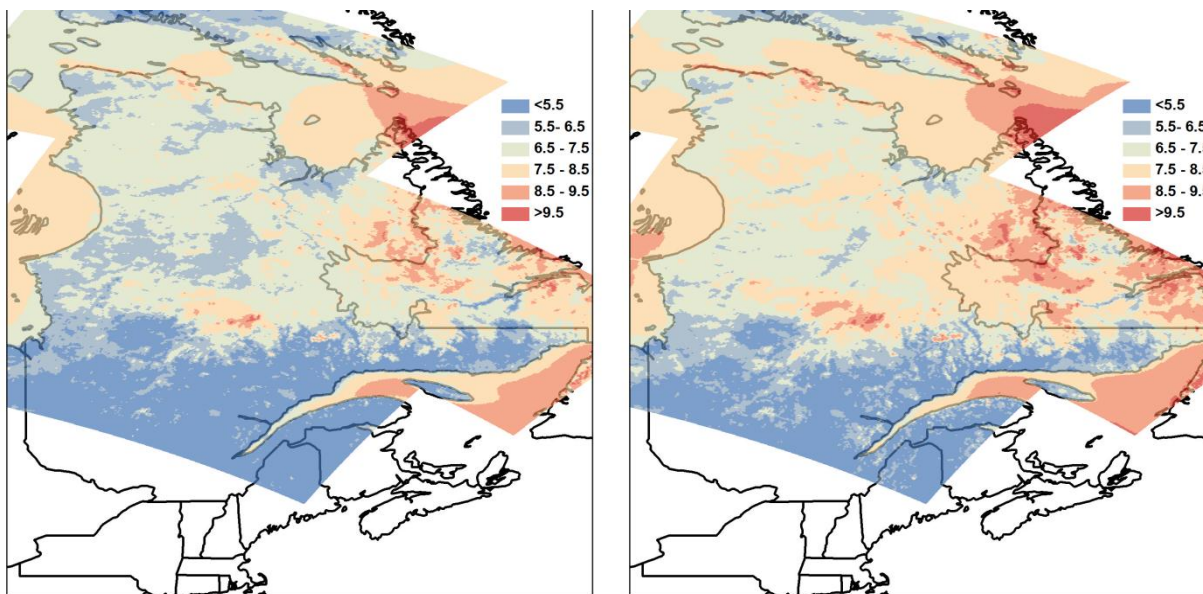


Figure 1. Vitesse moyenne annuelle du vent (m/s) au Québec nordique pour deux élévations : 30m (haut) et 50m (bas).

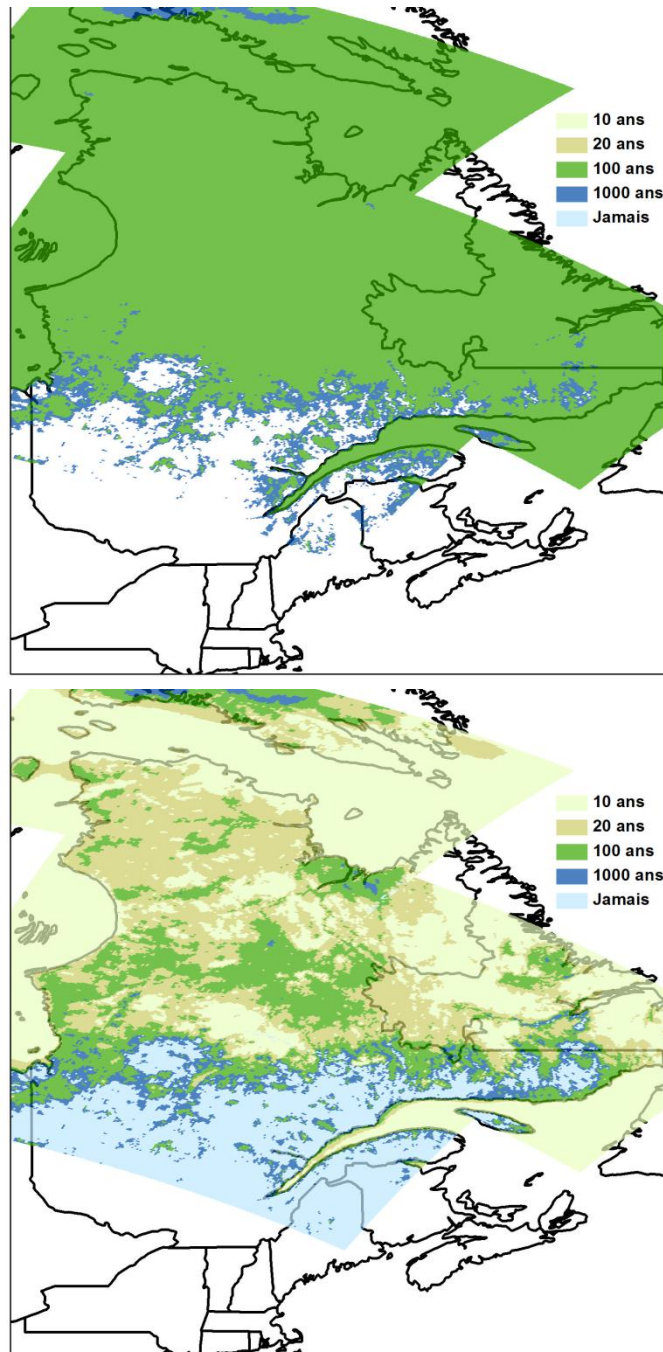


Figure 2. Temps de retour des grands vents (>50km/h) durant l'été (haut) et l'automne (bas).

## Les feux de forêts

Les feux de forêts pourraient provoquer une transformation rapide des écosystèmes dans un contexte de changements climatiques. Selon une revue de littérature récente (Flannigan *et al.*, 2009), les forêts boréales devraient avoir des saisons de feux plus longues et plus intenses selon les scénarios climatiques futurs. Au Québec, les feux devraient être plus fréquents et couvrir de plus larges territoires (communication personnelle avec Martin P. Girardin, Service Canadien des forêts, mai 2011). Il est donc essentiel d'inclure des prédictions sur les feux de forêts dans un contexte de changements climatiques afin d'assurer une meilleure appréhension des changements des écosystèmes du Nord du Québec.

Deux jeux de données sont disponibles pour l'Atlas. Le premier a été produit par une équipe de recherche dirigée par Steve Cumming (Université Laval et membre du BEACONS project) et consiste en une « régionalisation des feux » selon la base de données des grands feux de forêts du Canada<sup>6</sup>. Cette base de données est disponible pour Ouranos et le MDDEP (elle demeure non disponible pour le public). Elle consiste en un morcellement du territoire Québécois en cellules hexagonales de 10,000 km<sup>2</sup> selon la fréquence, la taille et la saisonnalité des feux de forêts observés entre 1959 et 1999. Bien qu'historiquement très précise, cette base de données ne peut guère informer l'Atlas compte tenu de sa faible résolution spatiale (Figure 3) et de l'importance des changements climatiques sur la dynamique des feux de forêts dans le Nord du Québec.

La deuxième base de données a été créée par Aurélie Terrier, une doctorante sous la direction d'Yves Bergeron à l'UQAM en co-direction avec Martin P. Girardin du Service Canadien des forêts. Son projet, accepté conditionnellement pour publication dans une revue scientifique internationale, consiste à utiliser les outils typiques de prédictions de la fréquence et la sévérité des feux de forêts en combinant les changements potentiels dans la distribution des espèces d'arbres au Québec. En effet, la présence de peuplement d'espèces feuillues diminue la sévérité des feux de forêts et, comme la forêt boréale et la taïga sont les principaux

---

<sup>6</sup> <http://www.beaconsproject.ca/fireregion>

écosystèmes soumis aux feux de forêts, la migration nordique d'espèces feuillues pourrait atténuer l'augmentation des feux de forêts dans un contexte de changements climatiques.

Les données sur la migration des espèces ligneuses viennent du projet CC-Bio, dirigé par Dominique Berteaux (UQAR) et subventionné par le CRSNG et Ouranos. En prenant en compte quelques assemblages d'espèces d'arbres, Terrier et collègues ont fait deux scénarios : un où les arbres ne se déplacent pas avec les changements climatiques et l'autre où les arbres suivent leurs enveloppes climatiques et migrent donc vers le Nord (Figure 4). Bien que la réalité soit probablement entre ces deux scénarios possibles, il est essentiel de prendre en considération ces deux extrêmes lors de l'analyse écologique du Nord du Québec. La densité des grands feux de forêts est en effet très différente selon ces deux scénarios (Figure 5).

Ces données représentent une opportunité unique pour l'analyse écologique du Nord du Québec basée une étude spatialement explicite à haute résolution combinant les meilleures techniques pour estimer la densité des feux de forêts et celles pour estimer la migration des espèces ligneuses. Un accord formel pour obtenir la base de données dès la publication de l'article scientifique a été conclu avec Aurélie Terrier et ses directeurs de thèse.

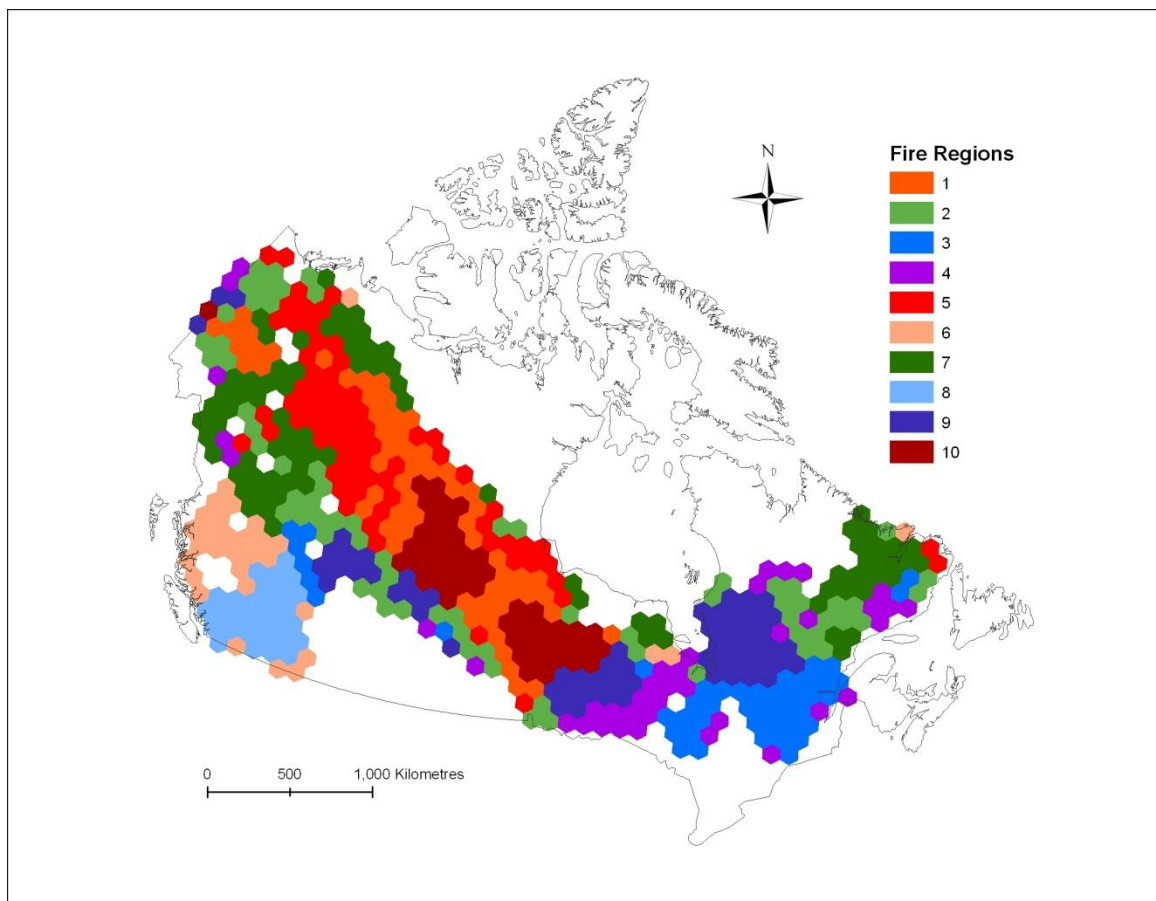


Figure 3. Régionalisation des feux de forêts selon le projet BEACONS. Les données ont été fournies par Steve Cumming sous format shapefile.

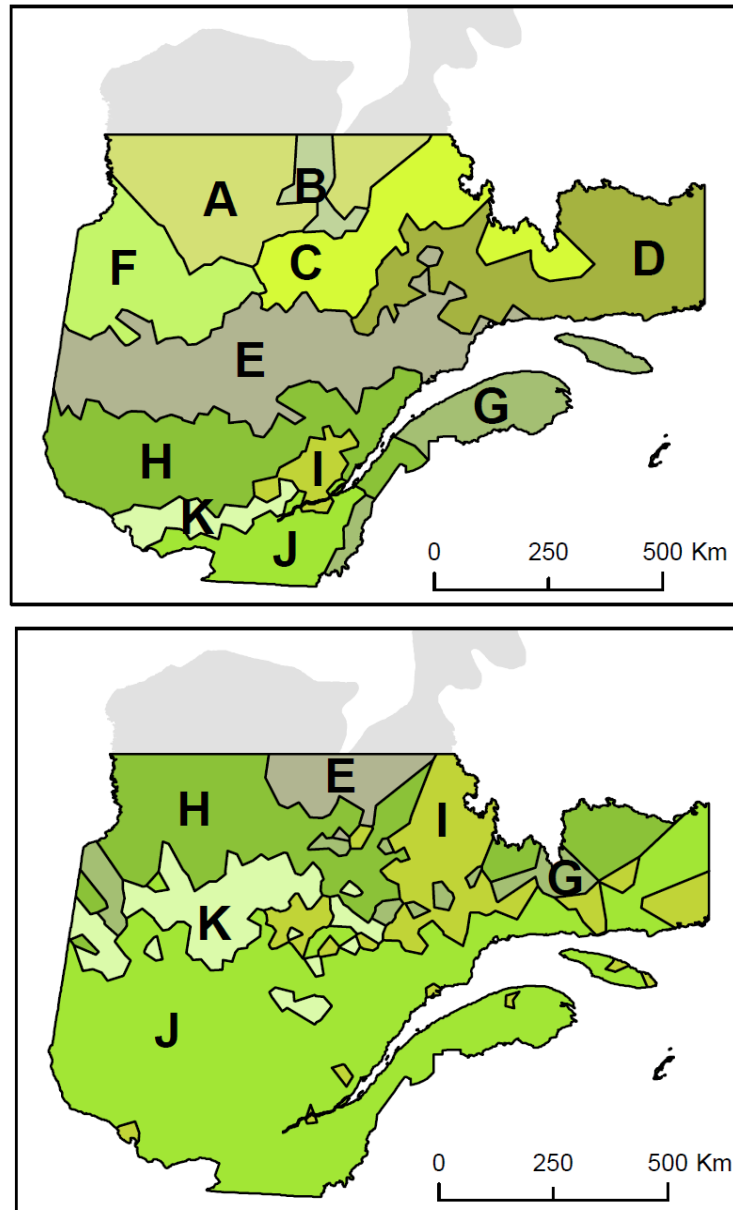


Figure 4. Assemblages de peuplements observés présentement selon les données du MRNF (en haut), et prédit par des modèles d'enveloppes bioclimatiques pour 2080 en assumant une migration instantanée (en bas). Données d'Aurélien Terrier non-publiées (et donc confidentielles).



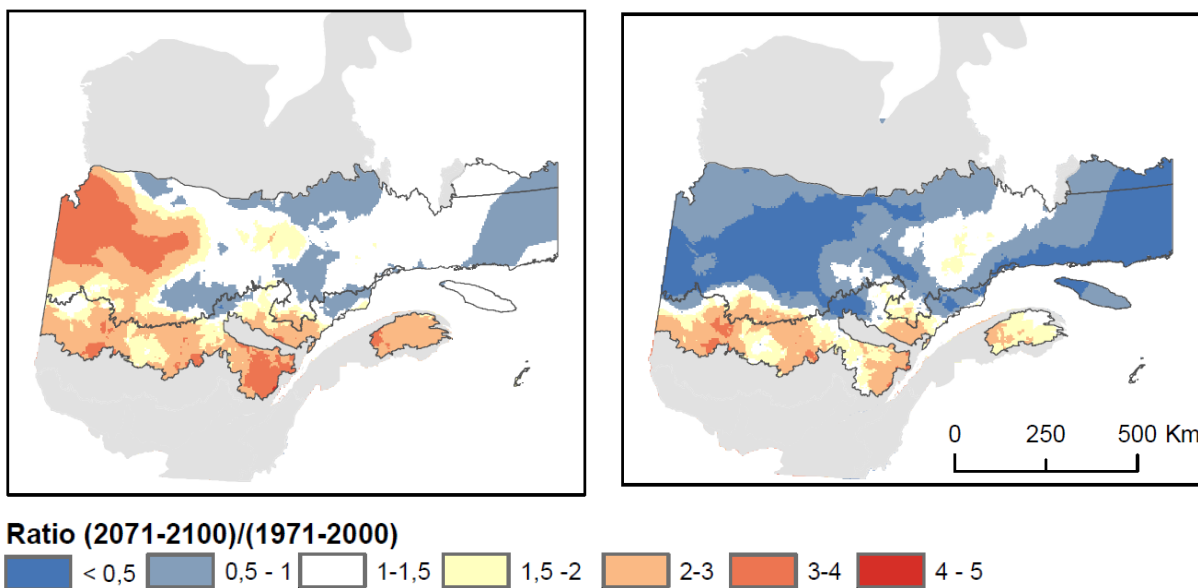


Figure 5. Changements dans la densité des feux de forêts de plus de 200 hectares selon les conditions climatiques projetée pour l'horizon 2080. Le panneau de gauche représente le scénario où les espèces d'arbres ne vont pas migrer avec les changements climatiques alors que le panneau de droite représente le scénario où les espèces d'arbres vont migrer instantanément avec les changements climatiques. Un ratio inférieur à 1 (en bleu) représente une diminution de la densité des feux et l'inverse pour un ratio en jaune ou rouge. Données d'Aurélie Terrier non-publiées (et donc confidentielles).

## Les insectes ravageurs

La dynamique des forêts du Québec nordique est fortement influencée par les insectes ravageurs, principalement la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) et l'arpenteuse de la pruche. Bien que l'épidémie actuelle de l'arpenteuse de la pruche sur la Côte-Nord soit responsable d'une défoliation sur plus de 1 million d'hectares, un manque de connaissance de la biologie de l'insecte (p.ex. histoire de vie, physiologie, écologie) nous empêche d'inclure cet insecte pour le moment dans l'Atlas (communication personnelle avec une spécialiste de l'arpenteuse de la pruche au MRNF, mai 2011). Par contre, la biologie de la TBE est beaucoup plus connue et l'épidémie au Québec a été responsable de plus de 32 millions d'hectares de défoliation selon les données du ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Il est donc essentiel d'inclure à l'Atlas des prévisions sur l'impact des changements climatiques sur la TBE.

Les effets des changements climatiques sur les épidémies de TBE seront importants puisque la TBE est un ectotherme, c'est-à-dire un animal dont la physiologie est directement influencée par la température ambiante. Ainsi, on peut prévoir qu'un réchauffement au Québec devrait causer une migration de l'insecte vers le nord. Nous avons contacté Jacques Régnière, de Ressources naturelles Canada, afin d'inclure à l'Atlas un modèle à la fine pointe des connaissances (Ballantyne *et al.*, 2012).

Le modèle développé par Régnière et ses collègues est de nature éco-physiologique. Il est fondé sur les réactions développementales des différents stades de la TBE à des conditions météorologiques variables. Développé en laboratoire, ce modèle est basé sur des conditions thermiques précisément contrôlées et des observations du développement des neuf stades de la TBE (p.ex. les œufs, les larves, les adultes). Par la suite, le modèle peut être combiné à des observations climatiques (BIOSIM) pour prédire la distribution et la croissance relative actuelle de la TBE. Des simulations climatiques du modèle régionale Canadien du climat (Music & Caya, 2007) sont ensuite utilisées afin de prédire la distribution et la croissance relative actuelle de la TBE en 2050.

Afin d'augmenter le réalisme du modèle, la densité des espèces les plus importantes dans l'alimentation de la TBE a été combinée aux prédictions obtenues selon les données climatiques. On peut donc constater que, selon les prévisions de Régnière et collègues, la TBE devrait envahir une bonne partie du Nord du Québec forestier (Figures 6 et Figure 7). La Côte-Nord devrait être plus particulièrement touchée.

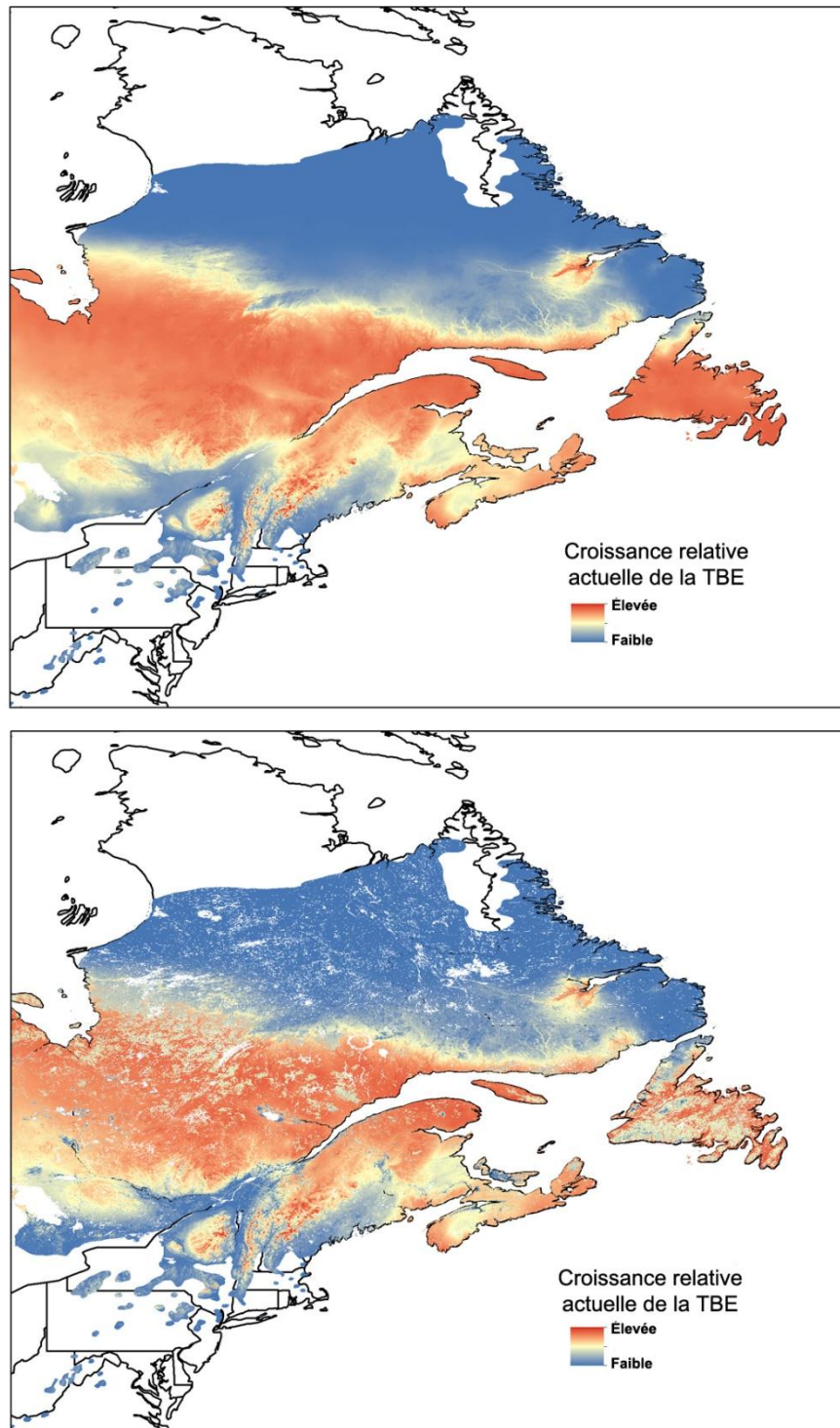


Figure 6. Croissance relative de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) selon les conditions climatiques actuelles (selon Régnière et al. 2012). Le panneau du haut représente la croissance de la TBE prédite en fonction seulement des conditions climatiques actuelles tandis que le panneau du bas représente la croissance de la TBE prédite en fonction du climat et des types de végétations observées.

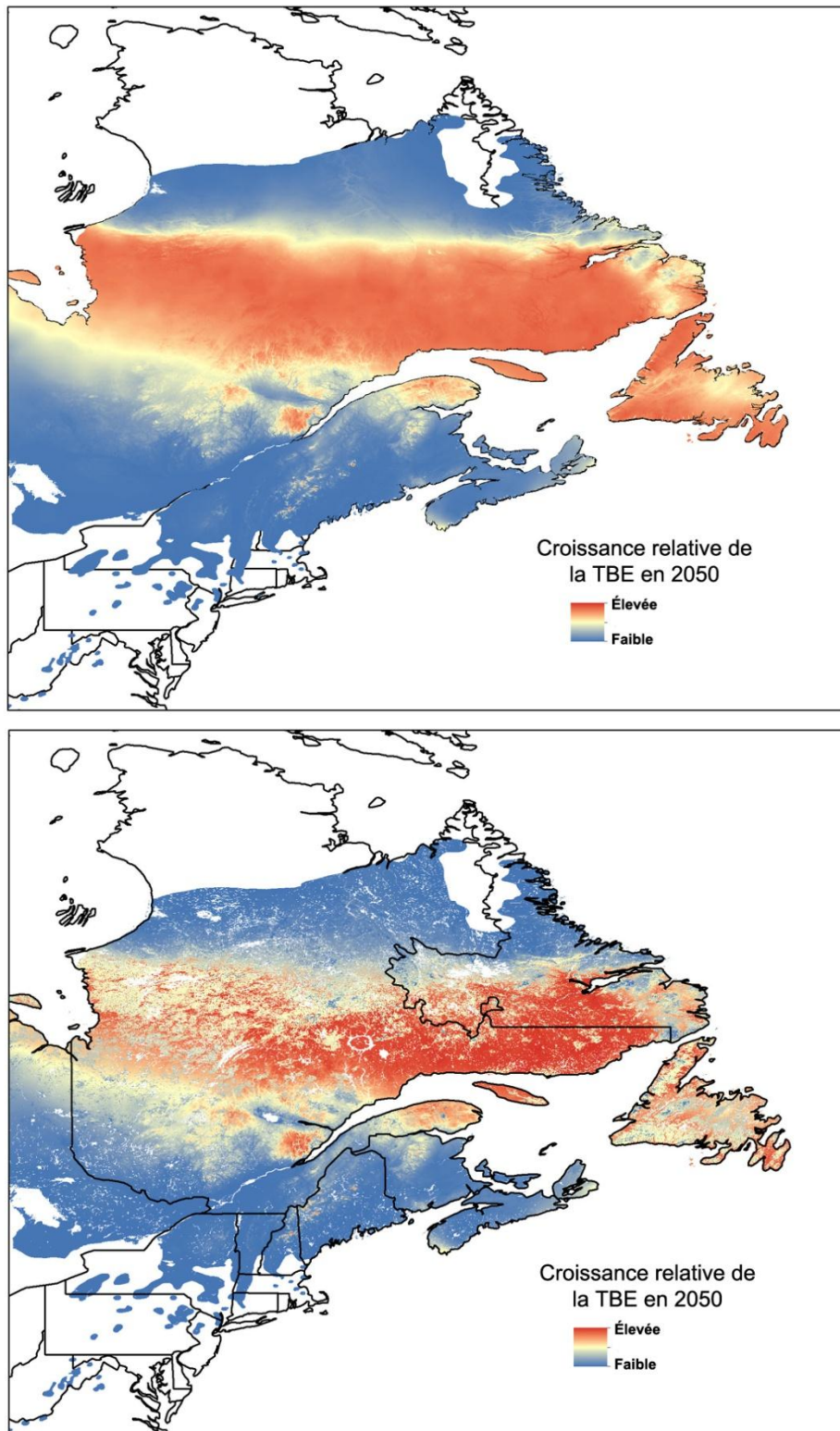


Figure 7. Croissance relative de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) selon les prévisions climatiques pour 2050 (selon Régnière et al. 2012). Le panneau du haut représente la croissance de la TBE prédite en fonction seulement des prévisions climatiques pour 2050 tandis que le panneau du bas représente la croissance de la TBE prédite en fonction du climat et des types de végétations observées.

## Changements phénologiques

La phénologie peut être définie comme étant l'étude de la récurrence de cycles biologiques. Pour les végétaux, les stades critiques sont le débourrement des bourgeons au printemps, la floraison, et la sénescence des feuilles à l'automne. Pour les animaux, les principaux stades sont ceux de la reproduction et de la migration. Les changements phénologiques représentent une des conséquences les plus facilement observables de l'impact des changements climatiques sur la biodiversité (Walther *et al.*, 2002; Parmesan & Yohe, 2003). En effet, les nombreuses et consistantes corrélations observées depuis les 30 dernières années entre le réchauffement climatique de l'hémisphère nord et les changements dans la phénologie, et ce, à tous les niveaux trophiques (Parry *et al.*, 2007) suggèrent que les espèces vont être fortement perturbées par les changements climatiques anticipés dans les prochaines décennies. Les changements phénologiques des communautés végétales sont particulièrement importants compte tenu de l'influence des producteurs primaires sur les niveaux trophiques supérieurs. L'influence des changements climatiques sur la phénologie des communautés végétales a été démontrée tant par des expériences sur le terrain que par des analyses d'images satellitaires (White *et al.*, 2005; Saino *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2011). Il est donc essentiel de prédire l'impact des changements climatiques sur la phénologie des écosystèmes du Québec nordique compte tenu de la saisonnalité importante de cette région. En effet, la saison de croissance est très courte dans le Nord du Québec et une augmentation de quelques jours de croissance supplémentaire par décennies aura des effets écologiques beaucoup plus visibles dans cette région que dans une forêt de feuillus du Sud du Québec.

La phénologie des plantes est complexe et peut-être influencée par des variables climatiques et des variables non-climatiques tel que la photopériode (Koerner & Basler, 2010a, b). Par contre, la température semble être le facteur déterminant de la phénologie végétale dans les régions froides comme le Nord du Québec (Murray *et al.*, 1989; Chuine & Cour, 1999). Ainsi, le réchauffement récent dans le Nord de l'hémisphère Nord a provoqué des changements phénologiques importants depuis quelques décennies (Vitasse *et al.*, 2011).

Pour les arbres, la saison de croissance (période entre le débourrement des feuilles et leur sénescence) a augmenté d'environ 11 jours en Europe entre 1960 et 2000 (Menzel *et al.*, 2006), et ce principalement par un débourrage hâtif et, en moindre importance, à une sénescence tardive des feuilles (Linderholm, 2006; Menzel *et al.*, 2006). Simultanément, on a pu observer par télédétection une augmentation de la productivité des arbres dans les hautes latitudes nordiques, suggérant qu'une saison de croissance plus longue peut causer une augmentation de la quantité de carbone absorbé (Myneni *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2001; Churkina *et al.*, 2005). Il semble d'ailleurs qu'un débourrement hâtif est plus important qu'une sénescence tardive pour la productivité primaire (Pearman *et al.*, 2010; Munguía *et al.*, 2012).

Une étude récente (Zhu *et al.*, 2011) sur les changements phénologiques en Amérique du Nord entre 1982 et 2006 a suggéré que la saison de croissance s'allonge, et ce, surtout au nord de la forêt boréale. Cette étude observe par satellite la couleur de la surface de la terre pour quantifier quand les feuilles débourrent (le « verdissement ») et quand elles deviennent sénescentes (le « brunissement »). Les changements phénologiques de la taïga et de la toundra du Nord du Québec sont particulièrement importants, et ce, surtout pour la sénescence tardive (Figure 8). Ce phénomène est écologiquement intéressant puisque dans ces régions froides, la capacité à compléter un cycle de reproduction (c'est-à-dire que les graines arrivent à maturité avant la sénescence des feuilles) est fortement influencée par la température durant la saison de croissance.

Nous avons développé une analyse afin d'évaluer la magnitude et la direction de l'augmentation de la longueur de la saison de croissance selon un ensemble de simulations climatiques sur la période 1960-2000. Ceci devrait permettre de vérifier si le patron spatial des changements phénologiques observé par Zhu et collègues (2011) dans le passé récent, où la saison de croissance change de manière beaucoup plus prononcée dans le Nord du Québec qu'ailleurs en Amérique du Nord, est congruent avec les simulations du MRCC durant la même période. Nous allons aussi déterminer les changements de phénologies futurs selon un ensemble de simulations climatiques pour l'horizon 2050.

Le patron asymétrique de l'augmentation de la longueur de la saison de croissance favorisant les changements à l'automne (i.e. lorsque la sénescence tardive est plus importante en nombre de jours que le débourrement hâtif) est surprenant puisque le couvert nival semble disparaître plus rapidement au printemps comparativement à son établissement tardif à l'automne depuis quelques décennies (communication personnelle avec Ross Brown, Ouranos, Février 2012).

Nous allons utiliser les phénorégions développées par White et collègues (2005) afin de vérifier si les changements phénologiques basés sur les changements de températures ont une asymétrie spatialement uniforme sur une grande région centrée sur le Québec. Ces phénorégions (Figure 9) représentent des endroits où la végétation est principalement influencée par les conditions météorologiques et où l'impact humain, tel que l'agriculture, est considéré mineur (White *et al.*, 2005). Pour l'Atlas, nous nous concentrons sur 19 phénorégions (Figure 10).

Les résultats préliminaires suggèrent que les simulations du MRCC pour la période 1960-2000 n'expliquent pas le patron asymétrique de l'augmentation de la longueur de la saison de croissance où les changements à l'automne sont plus importants dans le Nord du Québec (Figure 11) tel que décrit par Zhu et collègues (2011). Nous avons obtenus les données brutes de Zhu et d'autres analyses sont à venir. Jason Samson (UQAM), Dominique Berteaux (UQAR) et Travis Logan (Ouranos) devraient soumettre un manuscrit scientifique à ce sujet dans la prochaine année et les résultats seront partagés avec le MDDEP dans le cadre de ce projet.



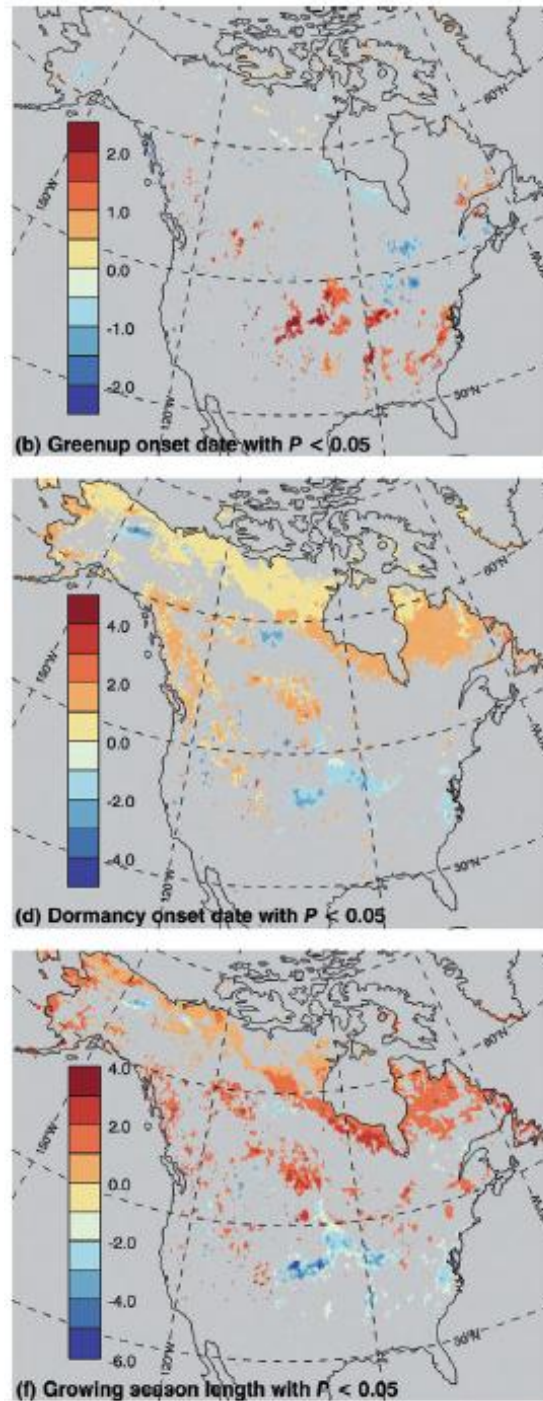


Figure 8. Tendances statistiquement significatives des changements phénologiques (jour/année) en Amérique du Nord entre 1982 et 2006 selon Zhu et collègues (2011). La carte (b) représente le débourrement des feuilles au printemps, la carte (d) représente la sénescence des feuilles à l'automne tandis que la carte (f) représente la longueur de la saison de croissance.

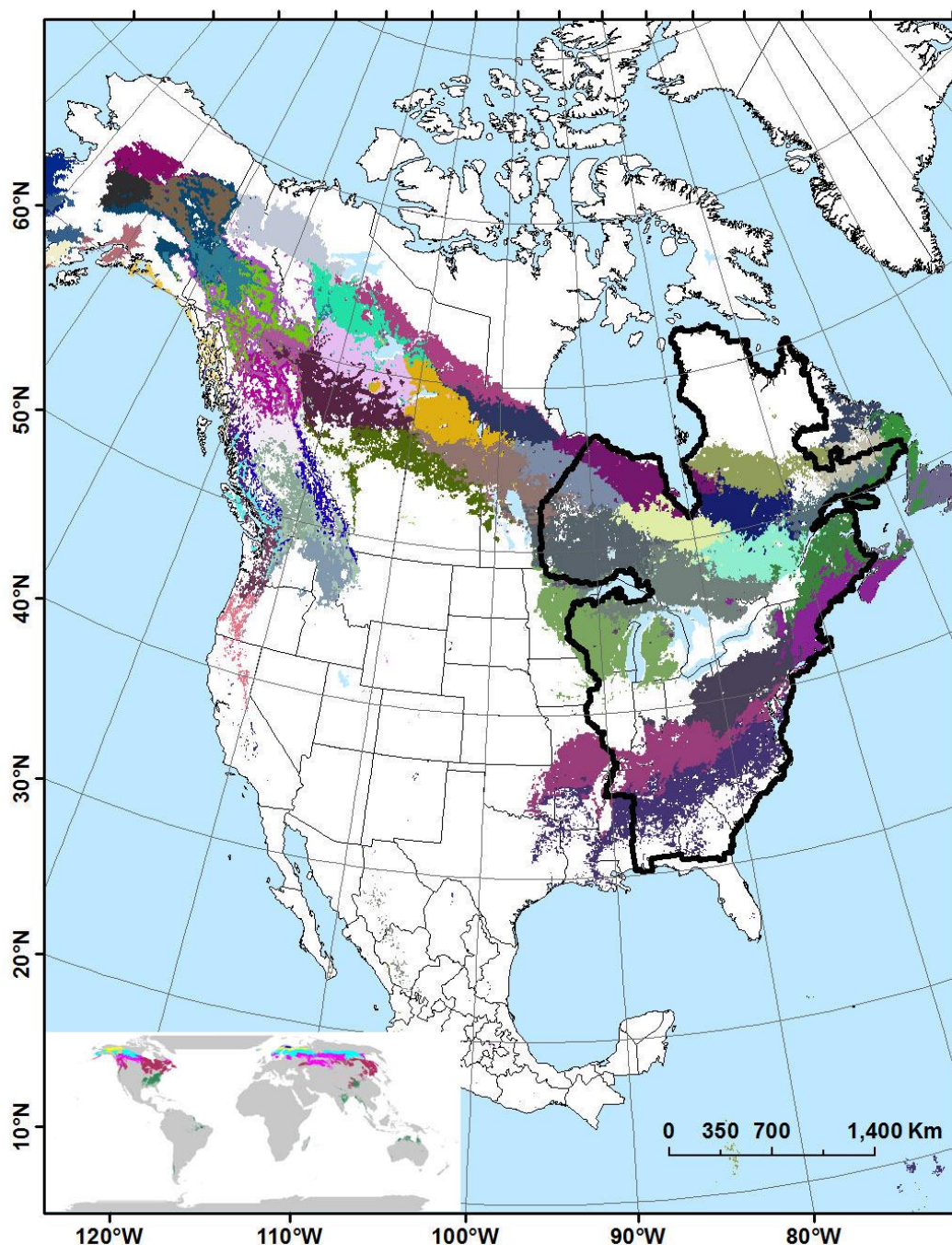


Figure 9. Régions de l'Amérique du Nord où le suivi à long terme de l'impact des changements climatiques sur la phénologie de la végétation (phénorégions) devrait être fait selon les changements phénologiques estimés par imagerie satellitaire depuis 1982. La carte en bas à gauche représente toutes les « phénorégions » du monde (White *et al.*, 2005). La zone délimitée par un trait noir représente les données climatiques utilisées pour les analyses (données du projet CC-Bio de Dominique Berteaux (UQAR)).

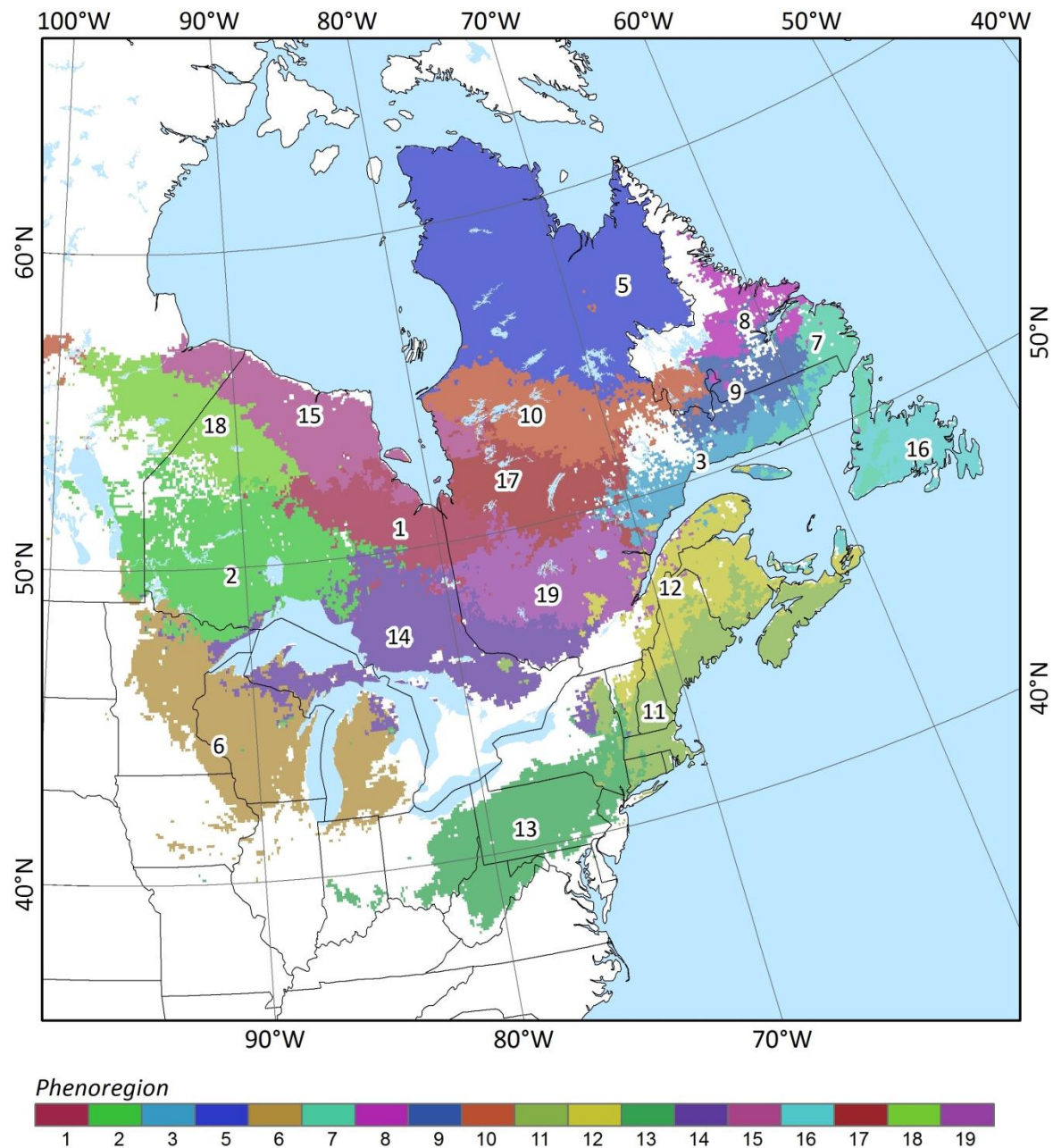


Figure 10. Phénorégions à l'étude pour l'Atlas de la biodiversité du Québec nordique. Il faut noter que la phénorégion 5 ne fait pas partie de la liste des phénorégions de White et collègues (2005) puisque cette région est considérée comme un terrain dénudé de végétation dans l'étude de White et collègues. Nous avons ajouté cette région pour mieux informer l'Atlas.



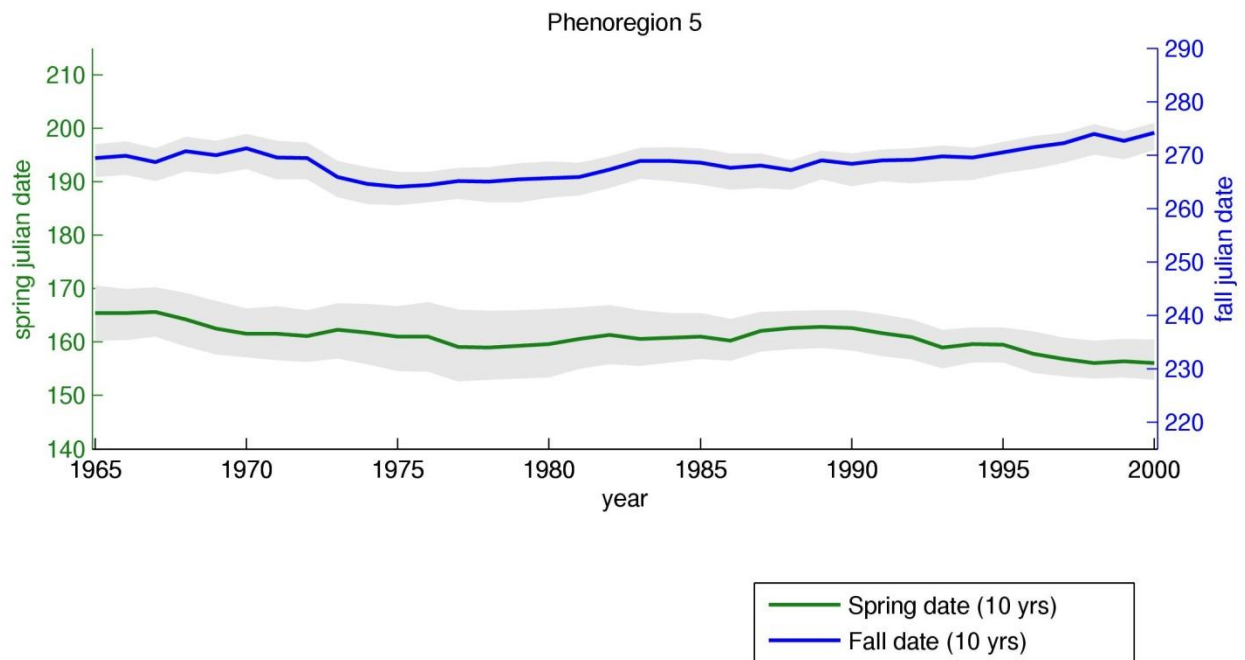


Figure 11. Changements dans la date de début et de fin de saison de croissance pour la région 5 (voir figure 10). Les changements sont affichés en tant que moyenne sur 10 ans centrée sur chaque année et l'incertitude selon l'ensemble des points de grilles de la phénorégion est indiquée en gris.

## Analyse des domaines bioclimatiques en grappes

L'Atlas ne peut être basé sur les observations météorologiques compte tenu du faible nombre de stations météorologiques dans le Nord du Québec (voir le rapport De Maja Rapaic). Ainsi, une solution possible serait d'utiliser les données climatiques simulées par le MRCC pour la période présente dans les analyses de l'Atlas. Bien que les simulations du MRCC aient certains biais, qui peuvent être amoindris, il est important de déterminer si les patrons spatiaux des données du MRCC correspondent à nos connaissances bioclimatiques du Québec.

Nous avons utilisé des analyses de grappes afin de définir des zones climatiques distinctes sur l'ensemble de la province de Québec. Cette technique requiert plusieurs décisions qui vont influencer la ségrégation du territoire en fonction des conditions climatiques. La première décision est liée au choix du modèle statistique. On peut diviser le territoire en deux, puis en trois, jusqu'à l'obtention du nombre de grappes désirées. On peut aussi regrouper des unités territoriales pour obtenir les grappes. Selon nos analyses, il semble que les deux méthodes produisent des résultats similaires.

La deuxième décision pour les analyses de grappes concerne le choix des variables utilisées. On peut s'attendre à ce qu'une division territoriale selon la température produise des grappes différentes qu'une division selon la précipitation. De plus, la nature statistique des données (p.ex. la moyenne, les extrêmes) peut aussi influencer la division territoriale. En utilisant des variables reliés à la température, on obtient des grappes relativement homogènes (Figure 12). Par contre, les variables de précipitations ne donnent pas des grappes réalistes (Figure 13). L'inconsistance spatiale des grappes selon la précipitation vient du fait que les précipitations convectives durant la saison de croissance sont mal simulées par le MRCC et démontrent de fortes différences sur de courtes distances (Figure 14). Afin de bien représenter la complexité du climat au Québec, nous avons fait une analyse de corrélations entre plusieurs variables (voir annexe 1) afin de déterminer les variables qui n'étaient pas trop corrélées entre elles. En utilisant un seuil de corrélation de Pearson de 0.8, 31 variables furent sélectionnées.

La dernière décision pour les analyses de grappes est de choisir le nombre de grappes. Ce choix demeure subjectif mais peut-être informé par les connaissances sur l'organisation des écosystèmes sur le territoire à l'étude. Une division territoriale à 15 grappes semble sous-représenter certains écosystèmes du Québec (Figure 15). Après avoir comparé un grand nombre d'analyses ayant des nombres de grappes différentes, nous trouvons qu'un modèle avec 30 grappes représente assez bien les domaines bioclimatiques du Québec (Figure 16).

Une analyse de grappes pour le climat futur, ainsi que pour les données du MRCC débiaisées seraient importantes pour la suite de l'Atlas.

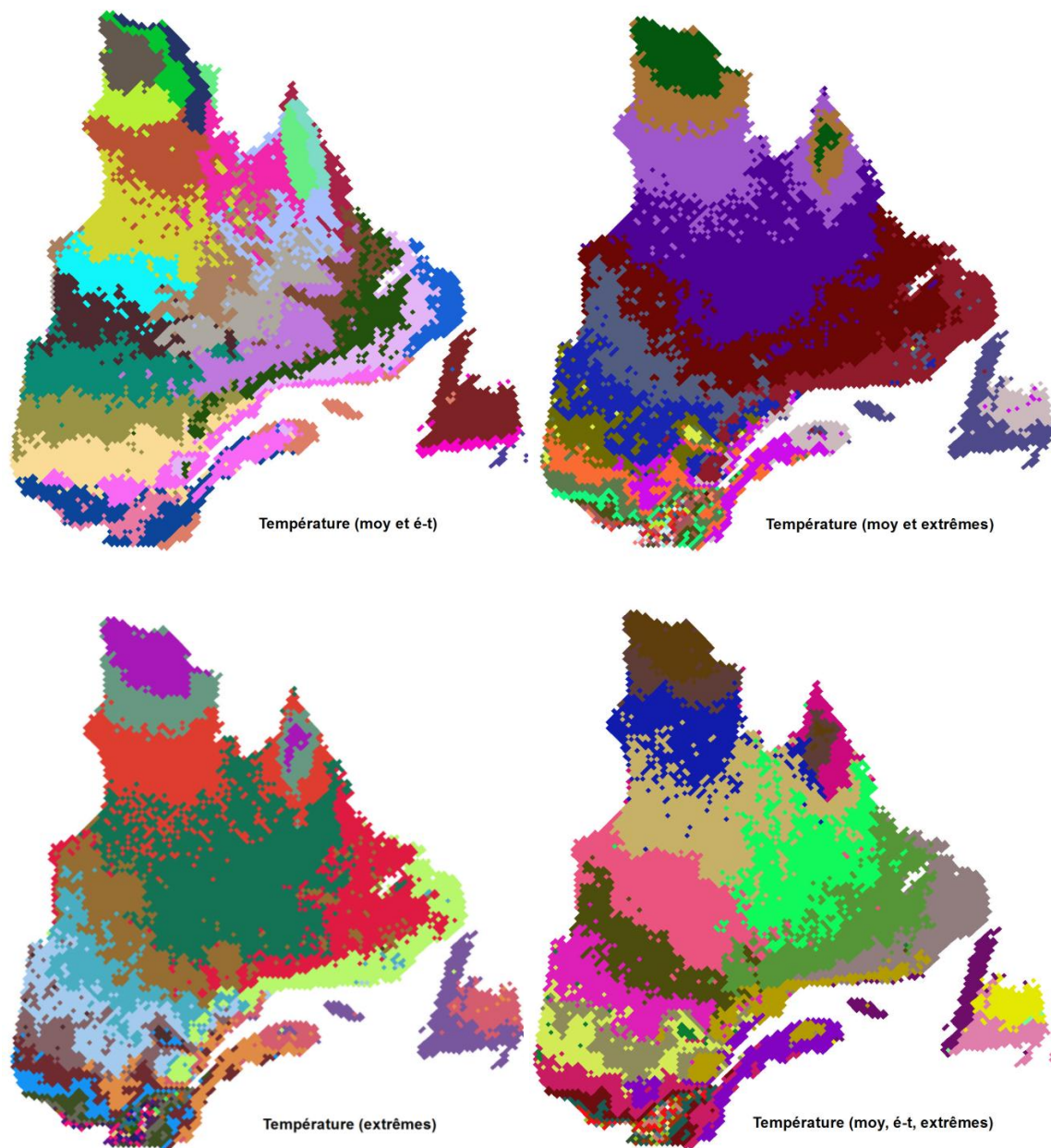


Figure 12. Division territoriale du Québec selon différentes variables reliées à la température basée sur une analyse de grappes de type « k-means ». Les zones de même couleurs représentent des régions où les variables sont les plus similaires. Les variables utilisées sont basées sur la moyenne (moy), l'écart-type (é-t) et les extrêmes (extrêmes).

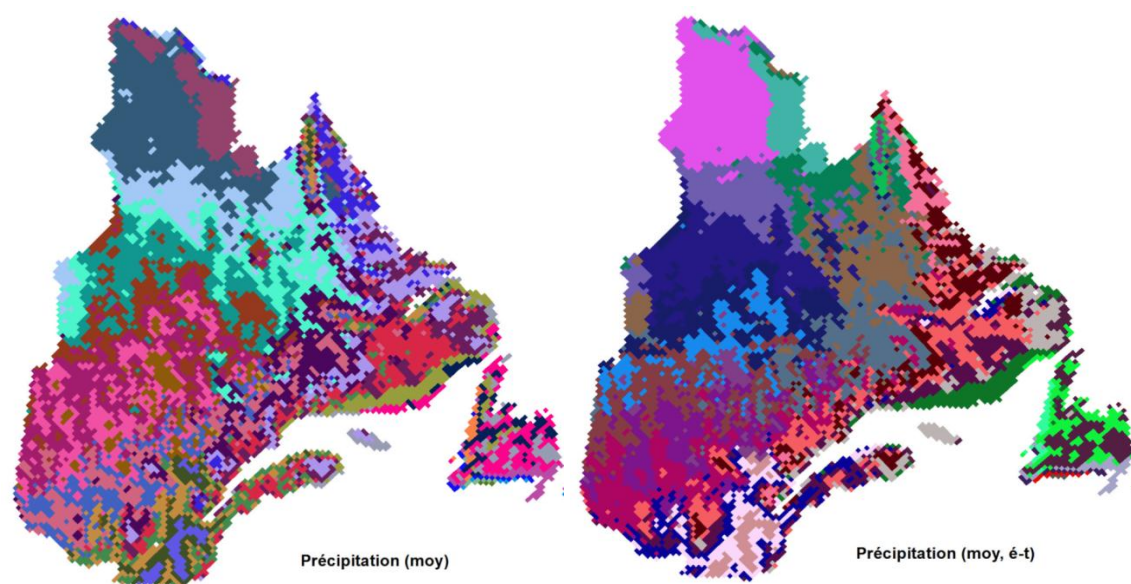


Figure 13. Division territoriale du Québec selon différentes variables reliées à la précipitation basée sur une analyse de grappes de type « k-means ». Les zones de même couleurs représentent des régions où les variables sont les plus similaires. Les variables utilisées sont basées sur la moyenne (moy) et l'écart-type (é-t).



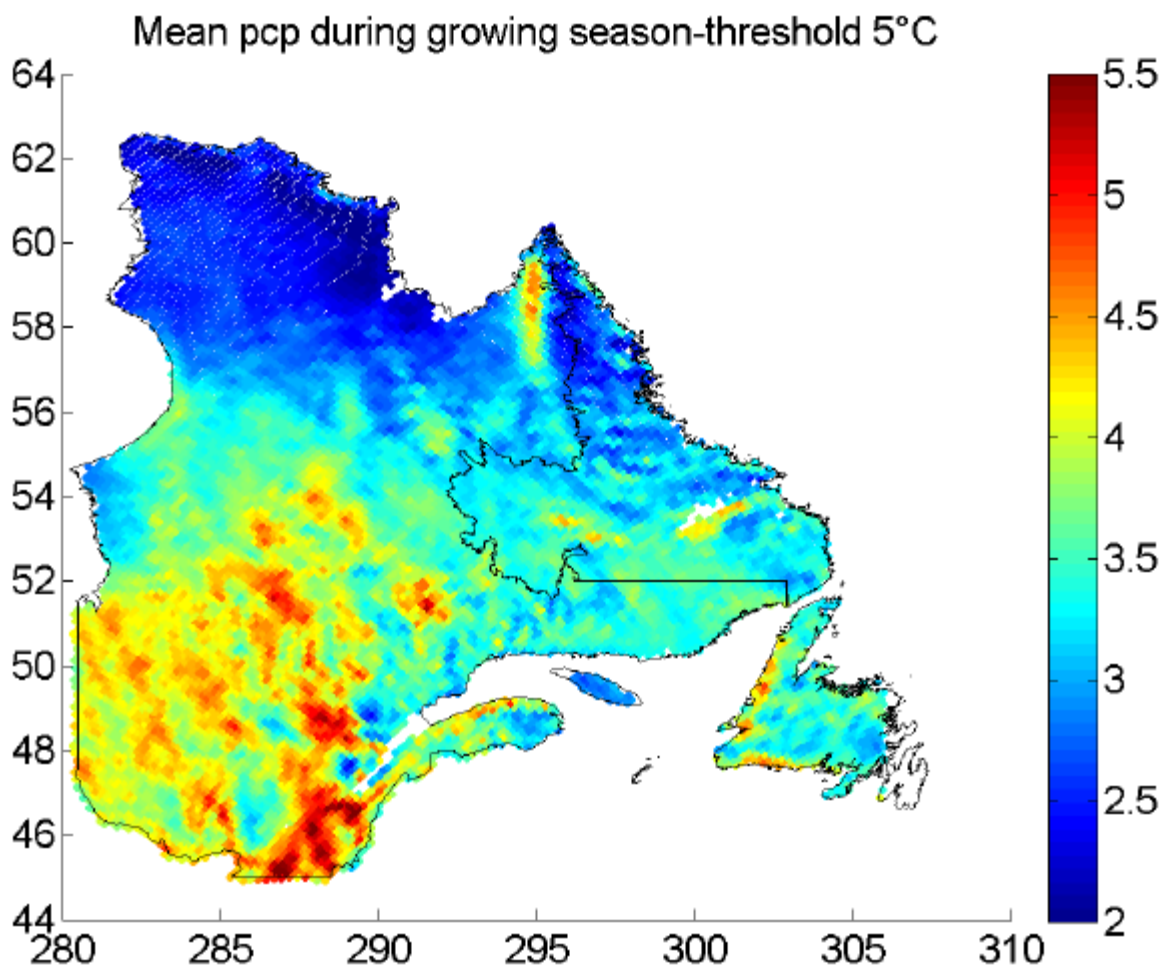


Figure 14. Précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance (selon un seuil de température de 5°C). Les fortes variations dans le quadrant sud-ouest de la province semblent être reliées aux précipitations convectives qui sont difficiles à simuler avec le MRCC.

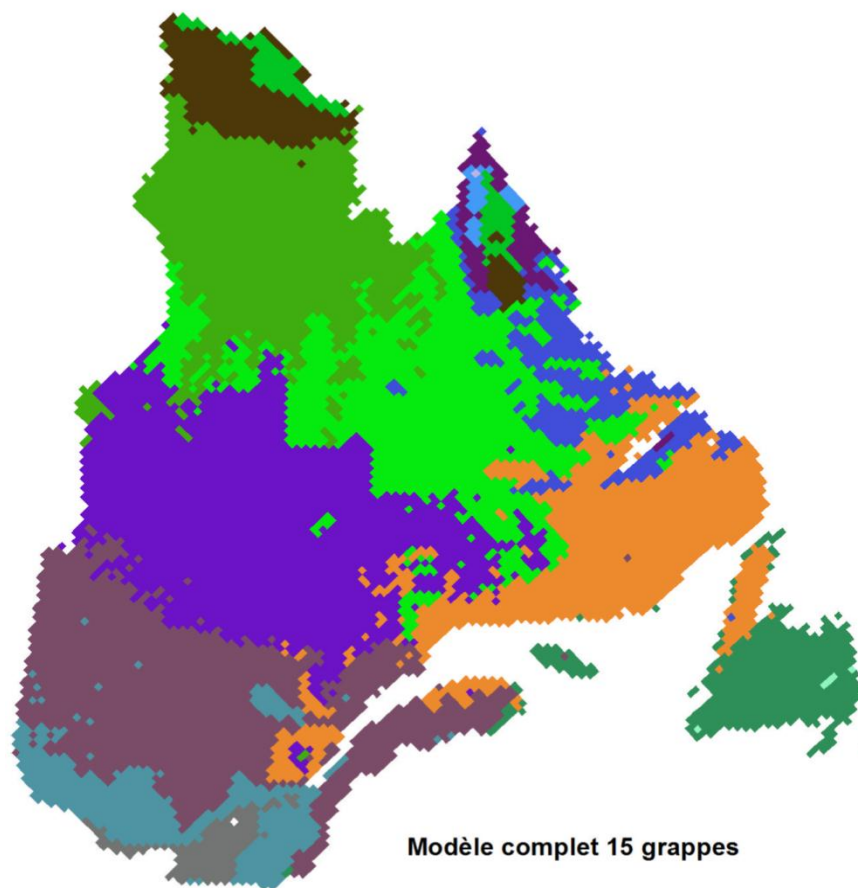


Figure 15. Domaines bioclimatiques selon 31 variables du MRCC pour l'horizon présente basée sur une analyse de grappes avec 15 grappes et la méthode « k-means ».

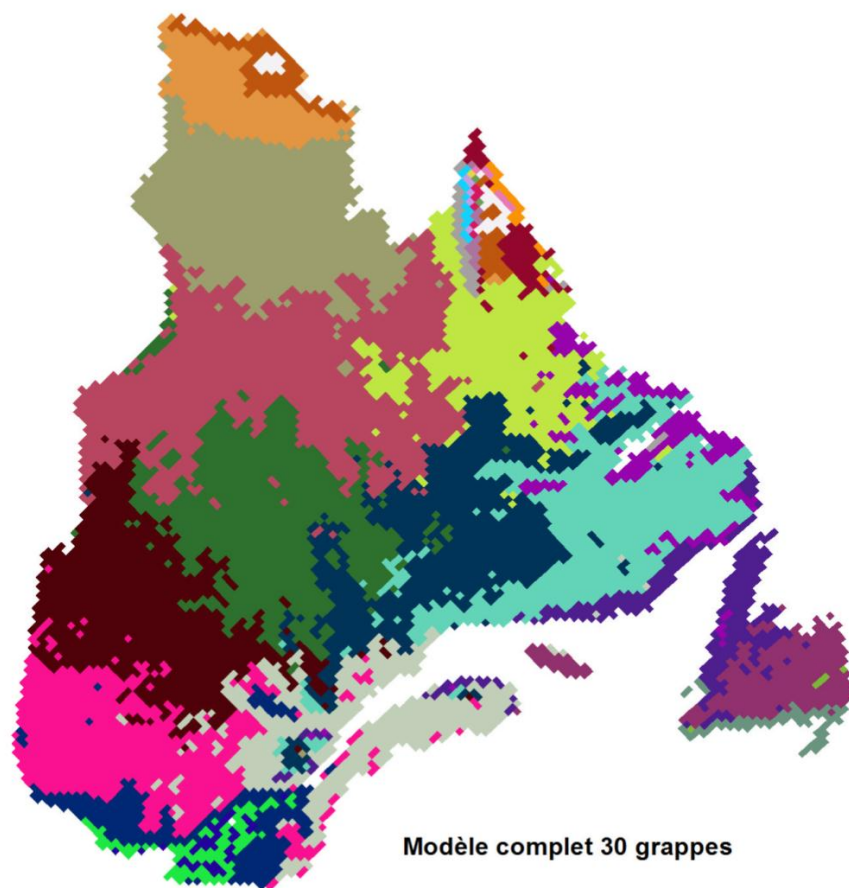


Figure 16. Domaines bioclimatiques selon 31 variables du MRCC pour l'horizon présente basée sur une analyse de grappes avec 30 grappes et la méthode « k-means ».

## Analyse des variations climatiques

Pour le prototype d'Atlas développé dans ce projet, nous suggérons l'utilisation de l'analyse de variation, une méthode analytique simple mais puissante similaire à la méthode « d'analogues spatiaux du climat », utilisée dans plusieurs autres projets financés par Ouranos.

La maille d'analyse du climat repose sur les districts écologiques (500 km<sup>2</sup>), quatrième niveau de perception du cadre écologique de référence (CER). Le CER est un outil de cartographie du territoire qui repose sur l'organisation spatiale des éléments physiques des écosystèmes. Dans le cadre du Prototype d'Atlas une classification des districts écologiques a permis d'obtenir des « zones » qui se distinguent par des altitudes et des organisations de formes de terrains distinctes. Ces zones, de par leurs caractéristiques physiques, renferment une organisation des communautés distincte.

Chaque zone est considérée stable si les variables climatiques qui y prévaudront dans le futur se retrouvent dans la gamme des valeurs actuellement observées. Similaire aux enveloppes bioclimatiques servant à prédire les changements de distributions d'espèces en fonction de leur limites climatiques actuelles (p.ex. les résultats de CC-Bio), la méthode d'analyse des variations de l'Atlas vise plutôt une maille territoriale compte tenu du manque de données continues sur les communautés et les espèces du Québec nordique.

Les variations sont évaluées en fonction de la moyenne et l'écart-type des variables climatiques observées à l'intérieur de la région à l'étude. Pour cette analyse préliminaire Les variations ont été calculées pour la Côte-Nord. Nous avons défini quatre types de variation, soit moins de 1, 2, 3, ou 4 écart-types de la moyenne actuelle pour deux variables : température annuelle moyenne ou précipitation totale annuelle. Une déviation d'écart-type d'une unité représente 68% d'écart statistique, tandis que deux et trois écart-types représentent respectivement 95% et 99,7% d'écart. On peut donc statistiquement affirmer que les zones où le climat futur est plus de 2 écart-types au-dessus de la moyenne actuelle possèdent une forte variation.

Étant donné que le climat futur projeté diffère légèrement selon les simulations climatiques, nous avons produit une fourchette de variations basée sur un ensemble de 12 simulations produites à Ouranos avec le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) à 45 km de résolution. Ces scénarios servent à définir les conditions climatiques futures (2041-2070) dans les districts écologiques établis par le MDDEP. Cette fourchette permet de représenter l'influence des changements climatiques projetés sur les zones.

## Résultats

La quantité de districts écologiques qui présente de forte variation (apparaissant en rouge sur la figure 17) est relativement similaire si l'on considère les changements de précipitations et ceux de température. Mais les patrons spatiaux diffèrent selon le choix de la variable climatique considérée. La température attendue en 2050 sera supérieure à la température la plus chaude observée dans la région pour 27% du territoire tandis que les précipitations seront plus abondantes en 2050 que celles observées aujourd'hui pour 28% du territoire. Le gradient nord-sud de la température implique que les districts côtiers devraient subir en 2050 des températures qui ne sont actuellement pas observées dans cette région, ce qui leur confère de fortes variations. Les patrons spatiaux de stabilité basée sur les changements de précipitations projetés montrent plutôt un gradient nord-est/sud-ouest avec les zones les plus stables dans la partie nord-ouest loin de la côte. La région de la Côte-Nord étant déjà soumise à de fortes précipitations, il est probable que l'augmentation de précipitation aura un impact relativement mineur sur les écosystèmes.

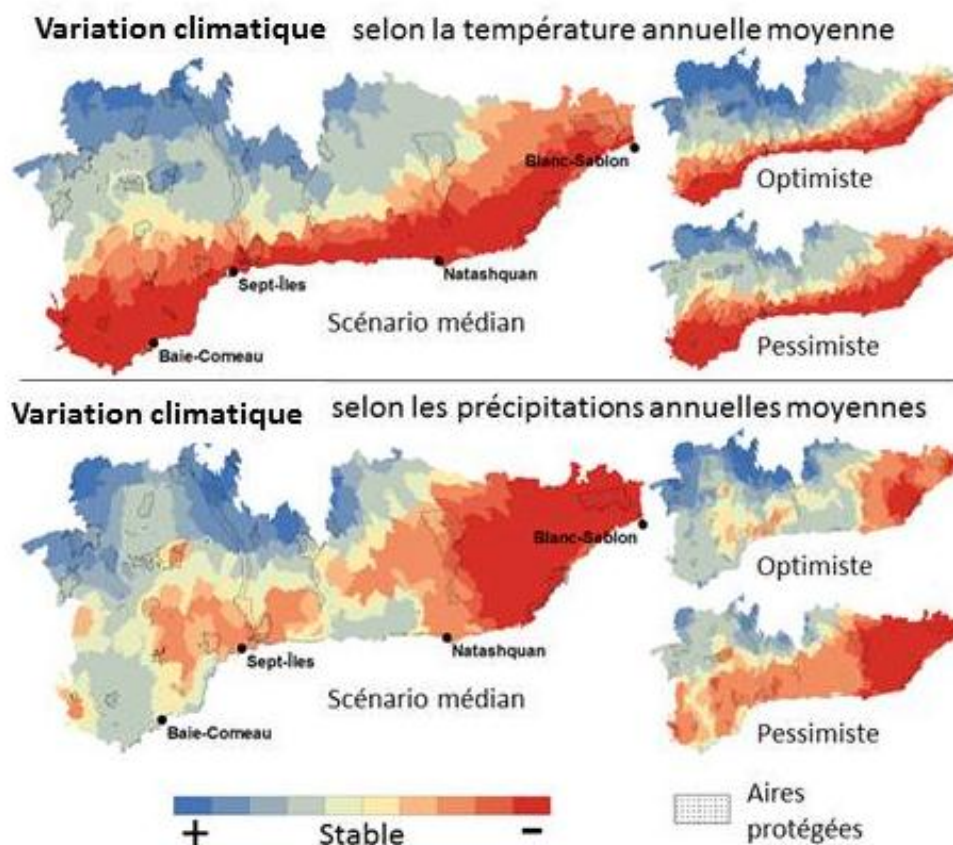


Figure 17. Variation climatique des districts écologiques dans la région de la Côte-Nord pour l’horizon 2050 basées sur la température annuelle moyenne et sur les précipitations annuelles moyennes. Le scénario climatique « pessimiste » - relié à une plus grande vulnérabilité des écosystèmes - représente le climat futur projeté selon le percentile 75% des 12 simulations, c’est-à-dire des changements plus grands que la moyenne, alors que le scénario « optimiste » relié à une plus faible vulnérabilité - utilise le quantile 25%, où les changements sont relativement de moins grande ampleur.

## Conclusions

### Résumé des travaux accomplis

Nous avons établis une base de données avec un grand nombre de variables climatiques qui devrait répondre aux besoins de l'Atlas de la biodiversité du Québec nordique. Ces variables climatiques sont basées tant sur les conventions standards (mois, année) que sur le concept de saison de croissance qui est beaucoup plus appropriée dans le cadre de l'analyse écologique du territoire. Cette base de données contient les données de stations météorologiques observées durant le passé récent et interpolées à une résolution de 10km. Elle contient aussi les données du MRCC à 15km de résolution pour le passé récent et les données d'un ensemble de 12 simulations du MRCC à 45km de résolution pour l'horizon 2050. Finalement, elle contient les données d'un ensemble de 77 simulations de GCM pour l'horizon 2050.

Nous avons testé le MRCC à 15km simulant le passé récent pour évaluer sa capacité à représenter les domaines bioclimatiques du Québec. Bien que d'autres analyses sont nécessaires, et que le modèle climatiques devrait être débiaisé, il semble que l'utilisation de MRCC à 15km puisse être un bon compromis entre l'incertitude de la modélisation et le manque de données climatiques dans le Nord du Québec.

Nous avons développé une stratégie d'analyse de l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes du Québec nordique basée sur le concept de variation climatique. Ce type d'analyse permet de cibler des régions d'un écosystème qui devraient expérimenter des conditions climatiques qui n'existent pas dans cet écosystème à ce jour, et qui pourrait donc être plus vulnérable aux changements climatiques. Nos analyses se limitent à la Côte-Nord pour ce prototype d'Atlas et d'autres analyses devraient être faites. Des études de sensibilités au choix de la région d'étude et des variables climatiques utilisées sont essentielles pour le développement de cette méthode.



Notre étude sur la phénologie du Nord du Québec suscite un grand intérêt de la part de plusieurs chercheurs et devrait pouvoir contribuer à une meilleure compréhension de la saisonnalité nordique et de développer des modèles pouvant prédire l'impact de cette asymétrie phénologique sur les écosystèmes et certaines espèces clés.

Nous avons obtenu des données spatialement explicites et tenant compte des changements climatiques sur les grandes perturbations naturelles du Québec nordique. Ces données sont essentielles pour comprendre comment les changements climatiques pourraient influencer les écosystèmes du Québec nordique.

## **Priorité pour le développement futur du volet changements climatiques de l'Atlas**

### **Débiaisage du MRCC à 15km**

Ouranos a démontré un intérêt à débiaiser quelques variables du MRCC afin que l'Atlas puisse utiliser les simulations du passé récent comme climat de référence. Le processus de débiaisage étant complexe, il était impossible de le faire pour le prototype d'Atlas de la biodiversité du Québec nordique. Malgré cela, le débiaisage de données climatiques demeure un sujet d'étude d'importance en science du climat. Il est donc possible que dans les prochaines années Ouranos développe une base de données climatiques débiaisées qui pourra être utilisée pour améliorer le volet changement climatique de l'Atlas.

### **Sensitivité au choix de la région écologique à l'étude dans les études des variations climatiques**

Il est très important d'évaluer l'influence de la sélection de la région écologique dans l'évaluation des variations climatiques. Le choix devrait se faire en se basant sur les réalités écologiques plutôt que sur une division territoriale administrative ou bien physique. En effet, le

confort relatif d'une zone est basé sur le fait que sa biodiversité se reproduit présentement sous des conditions climatiques qui devraient être analogues dans un climat futur. Le choix de l'unité écologique se doit aussi de tenir en compte la magnitude des changements climatiques anticipés. Par exemple, un marais côtier a de forte chance d'être hors de sa zone de confort thermal compte tenu de la faible étendue de ce type d'habitat. À l'autre extrême, la forêt boréale a de forte chance d'être hors de sa zone de confort thermal à la limite sud de sa distribution et en confort à sa limite nord. La sélection d'une classification des écosystèmes se doit donc de produire des régions d'une superficie adéquate pour ce genre d'analyse. Il

### **Sensitivité au choix des variables climatiques dans les études des variations climatiques**

Le concept des variations climatiques est basé sur des analogues entre le climat présent et futur d'un écosystème. Puisque les variables climatiques disponibles pour l'Atlas ont des patrons spatiaux, tant pour le climat présent et futur, très différents, les variations climatiques seront fortement influencées par le choix des variables climatiques. Par exemple, la température a un fort gradient nord-sud et les changements anticipés demeurent relativement uniformes à moyenne échelle tandis que la précipitation a des patrons spatiaux tout autre. Il sera donc important d'évaluer plusieurs scénarios basés sur plusieurs variables climatiques, de faire des analyses avec une combinaison de variables et, lorsque possible, d'utiliser des variables qui sont écologiquement importantes pour la région selon nos connaissances du territoire et des écosystèmes.

## Littérature citée

- Ballantyne, A.P., Alden, C.B., Miller, J.B., Tans, P.P. & White, J.W.C. (2012) Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, **488**, 70-72.
- Chuine, I. & Cour, P. (1999) Climatic determinants of budburst seasonality in four temperate-zone tree species. *New Phytologist*, **143**, 339-349.
- Churkina, G., Schimel, D., Braswell, B.H. & Xiao, X.M. (2005) Spatial analysis of growing season length control over net ecosystem exchange. *Global Change Biology*, **11**, 1777-1787.
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M. & Gowman, L.M. (2009) Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, **18**, 483-507.
- Gastineau, G. & Soden, B.J. (2009) Model projected changes of extreme wind events in response to global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L10810.
- Holtmeier, F.K. & Broll, G. (2010) Wind as an ecological agent at treelines in North America, the Alps, and the European subarctic. *Physical Geography*, **31**, 203-233.
- Koerner, C. & Basler, D. (2010a) Warming, Photoperiods, and Tree Phenology Response. *Science*, **329**, 278-278.
- Koerner, C. & Basler, D. (2010b) Phenology Under Global Warming. *Science*, **327**, 1461-1462.
- Linderholm, H.W. (2006) Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, **137**, 1-14.
- McManus, K.M., Morton, D.C., Masek, J.G., Wang, D., Sexton, J.O., Nagol, J.R., Ropars, P. & Boudreau, S. (2012) Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Quebec from 1986 to 2010. *Global Change Biology*, **18**, 2313-2323.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kubler, K., Bissolli, P., Braslavskaya, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatcza, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, O., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.E., Zach, S. & Züst, A. (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, **12**, 1969-1976.
- Munguía, M., Rahbek, C., Rangel, T.F., Diniz-Filho, J.A.F. & Araújo, M.B. (2012) Equilibrium of Global Amphibian Species Distributions with Climate. *PLoS ONE*, **7**, e34420.
- Murray, M.B., Cannell, M.G.R. & Smith, R.I. (1989) Date of budburst of 15 tree species in Britain following climatic warming. *Journal of Applied Ecology*, **26**, 693-700.
- Music, B. & Caya, D. (2007) Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian regional climate model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, **8**, 969-988.
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. & Nemani, R.R. (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, **386**, 698-702.
- Parmesan, C. & Yohe, G. (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, **421**, 37-42.
- Payette, S., Delwaide, A., Morneau, C. & Lavoie, C. (1996) Patterns of tree stem decline along a snow-drift gradient at treeline: A case study using stem analysis. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique*, **74**, 1671-1683.

- Pearman, P.B., D'Amen, M., Graham, C.H., Thuiller, W. & Zimmermann, N.E. (2010) Within-taxon niche structure: niche conservatism, divergence and predicted effects of climate change. *Ecography*, **33**, 990-1003.
- Ruel, J.C. (2000) Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies. *Forest Ecology and Management*, **135**, 169-178.
- Ruel, J.C., Mitchell, S.J. & Dornier, M. (2002) A GIS based approach to map wind exposure for windthrow hazard rating. *Northern Journal of Applied Forestry*, **19**, 183-187.
- Saino, N., Ambrosini, R., Rubolini, D., von Hardenberg, J., Provenzale, A., Hueppop, K., Hueppop, O., Lehikoinen, A., Lehikoinen, E., Rainio, K., Romano, M. & Sokolov, L. (2011) Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds. *Proceedings Of The Royal Society B-Biological Sciences*, **278**, 835-842.
- Tremblay B (2010) Augmentation récente du couvert ligneux érigé dans les environs de Kangiqsualujjuaq (Nunavik, Québec). MSc thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada.
- Vitasse, Y., Francois, C., Delpierre, N., Dufrene, E., Kremer, A., Chuine, I. & Delzon, S. (2011) Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**, 969-980.
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**, 389-395.
- White, M.A., Hoffman, F., Hargrove, W.W. & Nemani, R.R. (2005) A global framework for monitoring phenological responses to climate change. *Geophysical research letters*, **32**
- Zhou, L.M., Tucker, C.J., Kaufmann, R.K., Slayback, D., Shabanov, N.V. & Myneni, R.B. (2001) Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **106**, 20069-20083.
- Zhu, W., Tian, H., Xu, X., Pan, Y., Chen, G. & Lin, W. (2011) Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982–2006. *Global Ecology And Biogeography*, no-no.

## Annexe 1 : Description des variables climatiques utilisées

Les variables climatiques utilisées pour l'Atlas peuvent être regroupées selon le type de variable et la période de l'année représentée (table A1). Toutes les variables climatiques sont définies dans la table A2 et le rapport de Maja Rapaic contient des cartes pour chacune de ces variables ainsi que les équations utilisées pour les calculées lorsque nécessaire.

Table A1. Catégorisation des variables climatiques utilisées pour l'Atlas. Voir table A2 pour une description de chacune des variables.

| Type de variable   | Période de l'année | # de variables |
|--------------------|--------------------|----------------|
| Température        | Annuelle           | 4              |
| Température        | Croissance         | 6              |
| Température        | Dormance           | 4              |
| Température        | Mensuelle          | 36             |
| Précipitation      | Annuelle           | 4              |
| Précipitation      | Croissance         | 2              |
| Précipitation      | Dormance           | 4              |
| Précipitation      | Mensuelle          | 12             |
| Phénologie         | Croissance         | 6              |
| Phénologie         | Dormance           | 2              |
| Neige              | Annuelle           | 1              |
| Neige              | Mensuelle          | 12             |
| Gel-dégel          | Annuelle           | 4              |
| Gel-dégel          | Croissance         | 2              |
| Gel-dégel          | Dormance           | 2              |
| Gel-dégel          | Trimestrielle      | 2              |
| Extrême            | Annuelle           | 18             |
| Évapotranspiration | Annuelle           | 1              |
| Endurcissement     | Annuelle           | 3              |
| Degré-jour         | Croissance         | 6              |
| budget hydrique    | Annuelle           | 1              |

| Variable                                                          | Type de variable | Période de l'année | Unité | Description                                          |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------|------------------------------------------------------|
| Saisonnalité de la température                                    | Température      | Annuelle           | NA    | Coefficient de variation des températures mensuelles |
| Température moyenne annuelle                                      | Température      | Annuelle           | oC    |                                                      |
| Température minimal annuelle                                      | Température      | Annuelle           | oC    |                                                      |
| Température maximum annuelle                                      | Température      | Annuelle           | oC    |                                                      |
| Température moyenne durant la saison de croissance (seuil à 0oC)  | Température      | Croissance         | oC    | °                                                    |
| Température minimale durant la saison de croissance (seuil à 0oC) | Température      | Croissance         | oC    |                                                      |
| Température maximale durant la saison de croissance (seuil à 0oC) | Température      | Croissance         | oC    |                                                      |
| Température moyenne durant la saison de croissance (seuil à 5oC)  | Température      | Croissance         | oC    |                                                      |
| Température minimale durant la saison de croissance (seuil à 5oC) | Température      | Croissance         | oC    |                                                      |
| Température maximale durant la saison de croissance (seuil à 5oC) | Température      | Croissance         | oC    |                                                      |
| minimum température durant la saison de dormance (seuil 0oC)      | Température      | Dormance           | oC    |                                                      |
| maximum température durant la saison de dormance (seuil 0oC)      | Température      | Dormance           | oC    |                                                      |
| minimum température durant la saison de dormance (seuil 5oC)      | Température      | Dormance           | oC    |                                                      |
| maximum température durant la saison de dormance (seuil 5oC)      | Température      | Dormance           | oC    |                                                      |
| Température moyenne durant janvier                                | Température      | Mensuelle          | oC    |                                                      |
| Température moyenne durant octobre                                | Température      | Mensuelle          | oC    |                                                      |
| Température moyenne durant novembre                               | Température      | Mensuelle          | oC    |                                                      |
| Température moyenne durant décembre                               | Température      | Mensuelle          | oC    |                                                      |

| Variable                              | Type de variable | Période de l'année | Unité | Description |
|---------------------------------------|------------------|--------------------|-------|-------------|
| Température moyenne durant février    | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température moyenne durant mars       | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température moyenne durant avril      | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température moyenne durant mai        | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température moyenne durant juin       | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température moyenne durant juillet    | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température moyenne durant août       | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température moyenne durant septembre  | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant janvier   | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant octobre   | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant novembre  | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant décembre  | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant février   | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant mars      | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant avril     | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant mai       | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant juin      | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant juillet   | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant août      | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température minimale durant septembre | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant janvier   | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant octobre   | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant novembre  | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant décembre  | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant février   | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant mars      | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant avril     | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant mai       | Température      | Mensuelle          | oC    |             |
| Température maximale durant juin      | Température      | Mensuelle          | oC    |             |



| Variable                                                                                              | Type de variable | Période de l'année | Unité   | Description                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|---------|--------------------------------------------------------|
| Température maximale durant juillet                                                                   | Température      | Mensuelle          | oC      |                                                        |
| Température maximale durant août                                                                      | Température      | Mensuelle          | oC      |                                                        |
| Température maximale durant septembre                                                                 | Température      | Mensuelle          | oC      |                                                        |
| Précipitation moyenne annuelle (ATTENTION: les changements sont en %)                                 | Précipitation    | Annuelle           | mm/jour |                                                        |
| Saisonnalité des précipitations (ATTENTION: les changements sont en %)                                | Précipitation    | Annuelle           | NA      | Coefficient de variation des précipitations mensuelles |
| Durée des périodes d'au moins 7 jours sans précipitation (i.e. <1mm)                                  | Précipitation    | Annuelle           | jour    |                                                        |
| Fréquence des périodes d'au moins 7 jours sans précipitation (i.e. <1mm)                              | Précipitation    | Annuelle           | NA      |                                                        |
| Précipitation durant la saison de croissance (seuil à 0oC) (ATTENTION: les changements sont en %)     | Précipitation    | Croissance         | mm/jour |                                                        |
| Précipitation durant la saison de croissance (seuil à 5oC) (ATTENTION: les changements sont en %)     | Précipitation    | Croissance         | mm/jour |                                                        |
| Précipitation moyenne durant la saison de dormance (seuil 0oC) (ATTENTION: les changements sont en %) | Précipitation    | Dormance           | mm/jour |                                                        |
| Température moyenne durant la saison de dormance (seuil 0oC)                                          | Précipitation    | Dormance           | mm/jour |                                                        |
| Précipitation moyenne durant la saison de dormance (seuil 5oC) (ATTENTION: les changements sont en %) | Précipitation    | Dormance           | mm/jour |                                                        |
| Température moyenne durant la saison de dormance (seuil 5oC)                                          | Précipitation    | Dormance           | mm/jour |                                                        |
| Précipitation durant janvier (ATTENTION: les changements sont en %)                                   | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                        |

| Variable                                                              | Type de variable | Période de l'année | Unité   | Description                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Précipitation durant octobre (ATTENTION: les changements sont en %)   | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant novembre (ATTENTION: les changements sont en %)  | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant décembre (ATTENTION: les changements sont en %)  | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant février (ATTENTION: les changements sont en %)   | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant mars (ATTENTION: les changements sont en %)      | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant avril (ATTENTION: les changements sont en %)     | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant mai (ATTENTION: les changements sont en %)       | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant juin (ATTENTION: les changements sont en %)      | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant juillet (ATTENTION: les changements sont en %)   | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant août (ATTENTION: les changements sont en %)      | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Précipitation durant septembre (ATTENTION: les changements sont en %) | Précipitation    | Mensuelle          | mm/jour |                                                                                                     |
| Fin de la saison de croissance (seuil à 0oC)                          | Phénologie       | Croissance         | jour    | La saison de croissance se termine le dernier jour d'une série de 5 jours consécutifs où Tmoy>seuil |
| Longueur de la saison de croissance (seuil à 0oC)                     | Phénologie       | Croissance         | jour    |                                                                                                     |

| Variable                                          | Type de variable | Période de l'année | Unité | Description                                                                                         |
|---------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Début de la saison de croissance (seuil à 0oC)    | Phénologie       | Croissance         | jour  | La saison de croissance commence le premier jour d'une série de 5 jours consécutifs où Tmoy>seuil   |
| Fin de la saison de croissance (seuil à 5oC)      | Phénologie       | Croissance         | jour  | La saison de croissance se termine le dernier jour d'une série de 5 jours consécutifs où Tmoy>seuil |
| Longueur de la saison de croissance (seuil à 5oC) | Phénologie       | Croissance         | jour  |                                                                                                     |
| Début de la saison de croissance (seuil à 5oC)    | Phénologie       | Croissance         | jour  | La saison de croissance commence le premier jour d'une série de 5 jours consécutifs où Tmoy>seuil   |
| Longueur de la saison de dormance (seuil à 0oC)   | Phénologie       | Dormance           | jour  |                                                                                                     |
| Longueur de la saison de dormance (seuil à 5oC)   | Phénologie       | Dormance           | jour  |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige annuel              | Neige            | Annuelle           | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant janvier      | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant octobre      | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant novembre     | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant décembre     | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant février      | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant mars         | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant avril        | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant mai          | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant juin         | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant juillet      | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |
| Équivalent en eau de la neige durant août         | Neige            | Mensuelle          | mm    |                                                                                                     |

| Variable                                                                   | Type de variable | Période de l'année | Unité                | Description                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Équivalent en eau de la neige durant septembre                             | Neige            | Mensuelle          | mm                   |                                                                    |
| Nombre de jour avec gel-dégel durant l'année                               | Gel-dégel        | Annuelle           | jour                 | Journée durant laquelle Tmin<0C et Tmax>0C                         |
| Dégel cumulatif en hiver                                                   | Gel-dégel        | Annuelle           | oC (degré-jour/jour) | Accumulation de degré-jour au-dessus de 0C durant la saison froide |
| Dégel cumulatif en hiver dernier jour                                      | Gel-dégel        | Annuelle           | jour                 | Dernier jour de l'hiver où Tmin<-15C                               |
| Dégel cumulatif en hiver premier jour                                      | Gel-dégel        | Annuelle           | jour                 | Premier jour de l'hiver où Tmin<-15C                               |
| Nombre de jour avec gel-dégel durant la saison de croissance (seuil à 0oC) | Gel-dégel        | Croissance         | jour                 | Journée durant laquelle Tmin<0C et Tmax>0C                         |
| Nombre de jour avec gel-dégel durant la saison de croissance (seuil à 5oC) | Gel-dégel        | Croissance         | jour                 | Journée durant laquelle Tmin<0C et Tmax>0C                         |
| Nombre de jour avec gel-dégel durant la saison de dormance (seuil à 0oC)   | Gel-dégel        | Dormance           | jour                 | Journée durant laquelle Tmin<0C et Tmax>0C                         |
| Nombre de jour avec gel-dégel durant la saison de dormance (seuil à 5oC)   | Gel-dégel        | Dormance           | jour                 | Journée durant laquelle Tmin<0C et Tmax>0C                         |
| Nombre de jour avec gel-dégel en printemps                                 | Gel-dégel        | Trimestrielle      | jour                 | Journée durant laquelle Tmin<0C et Tmax>0C                         |
| Nombre de jour avec gel-dégel durant l'hiver (DJF)                         | Gel-dégel        | Trimestrielle      | jour                 | Journée durant laquelle Tmin<0C et Tmax>0C                         |
| Cumulatif annuel des degré-jour au-dessous de 30oC                         | Extrême          | Annuelle           | degré-jour           |                                                                    |
| Cumulatif annuel des degré-jour au-dessous de 35oC                         | Extrême          | Annuelle           | degré-jour           |                                                                    |
| Cumulatif annuel des degré-jour au-dessous de 40oC                         | Extrême          | Annuelle           | degré-jour           |                                                                    |
| Cumulatif annuel des degré-jour au-dessus de 20oC                          | Extrême          | Annuelle           | degré-jour           |                                                                    |
| Cumulatif annuel des degré-jour au-dessus de 25oC                          | Extrême          | Annuelle           | degré-jour           |                                                                    |

| Variable                                                          | Type de variable   | Période de l'année | Unité      | Description                                                             |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Cumulatif annuel des degré-jour au-dessus de 30oC                 | Extrême            | Annuelle           | degré-jour |                                                                         |
| Durée des périodes au-dessous de moins 30oC                       | Extrême            | Annuelle           | jour       |                                                                         |
| Durée des périodes au-dessous de moins 35oC                       | Extrême            | Annuelle           | jour       |                                                                         |
| Durée des périodes au-dessous de moins 40oC                       | Extrême            | Annuelle           | jour       |                                                                         |
| Durée des périodes au-dessus de 20oC                              | Extrême            | Annuelle           | jour       |                                                                         |
| Durée des périodes au-dessus de 25oC                              | Extrême            | Annuelle           | jour       |                                                                         |
| Durée des périodes au-dessus de 30oC                              | Extrême            | Annuelle           | jour       | Nombre de jour où la température est plus haute (ou basse) que le seuil |
| Fréquence des périodes au-dessous de moins 30oC                   | Extrême            | Annuelle           | NA         | Nombre de jour où la température est plus haute (ou basse) que le seuil |
| Fréquence des périodes au-dessous de moins 35oC                   | Extrême            | Annuelle           | NA         | Nombre de jour où la température est plus haute (ou basse) que le seuil |
| Fréquence des périodes au-dessous de moins 40oC                   | Extrême            | Annuelle           | NA         | Nombre de jour où la température est plus haute (ou basse) que le seuil |
| Fréquence des périodes au-dessus de 20oC                          | Extrême            | Annuelle           | NA         | Nombre de jour où la température est plus haute (ou basse) que le seuil |
| Fréquence des périodes au-dessus de 25oC                          | Extrême            | Annuelle           | NA         | Nombre de jour où la température est plus haute (ou basse) que le seuil |
| Fréquence des périodes au-dessus de 30oC                          | Extrême            | Annuelle           | NA         | Nombre de jour où la température est plus haute (ou basse) que le seuil |
| Évapotranspiration potentielle annuelle (méthode de Thornthwaite) | Évapotranspiration | Annuelle           | cm         |                                                                         |

| Variable                                                                                | Type de variable | Période de l'année | Unité      | Description                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cumulatif des degré-jour en période d'endurcissement automnale                          | Endurcissement   | Annuelle           | degré-jour | L'endurcissement commence le jour où l'accumulation des différences entre DJF5 (degré jour au-dessous du seuil de 5C) et DJ5 (degré-jour au-dessus de 5C) demeure au-dessus de 0C. |
| Fin de la période d'endurcissement automnale                                            | Endurcissement   | Annuelle           | jour       |                                                                                                                                                                                    |
| Début de la période d'endurcissement automnale                                          | Endurcissement   | Annuelle           | jour       |                                                                                                                                                                                    |
| Cumulatif des degré-jour au-dessus de 0oC durant la saison de croissance (seuil à 0oC)  | Degré-jour       | Croissance         | degré-jour |                                                                                                                                                                                    |
| Cumulatif des degré-jour au-dessus de 5oC durant la saison de croissance (seuil à 0oC)  | Degré-jour       | Croissance         | degré-jour |                                                                                                                                                                                    |
| Cumulatif des degré-jour au-dessus de 10oC durant la saison de croissance (seuil à 0oC) | Degré-jour       | Croissance         | degré-jour |                                                                                                                                                                                    |
| Cumulatif des degré-jour au-dessus de 0oC durant la saison de croissance (seuil à 5oC)  | Degré-jour       | Croissance         | degré-jour |                                                                                                                                                                                    |
| Cumulatif des degré-jour au-dessus de 5oC durant la saison de croissance (seuil à 5oC)  | Degré-jour       | Croissance         | degré-jour |                                                                                                                                                                                    |
| Cumulatif des degré-jour au-dessus de 10oC durant la saison de croissance (seuil à 5oC) | Degré-jour       | Croissance         | degré-jour |                                                                                                                                                                                    |
| budget hydrique annuel                                                                  | budget hydrique  | Annuelle           | mm         | Différence entre les précipitations totales annuelles et l'évapotranspiration potentielle cumulative annuelle                                                                      |