

**MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DE LA VÉGÉTATION FORESTIÈRE ET DE LA MIGRATION  
DES LIMITES DE BIOMES SOUS L'INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE  
TERRITOIRE DE LA FORÊT MODÈLE DU PROJET LE BOURDON**

Rapport d'activités de recherche de la Phase 1

Pour la période du 1<sup>er</sup> au 30 avril 2010

**Effet du gradient latitudinal sur la succession forestière dans le  
sud-ouest du Québec**

Rapport technique

préparé par

**Frédéric Doyon, ing.f., Ph.D.**

pour

Raymond Barrette, ing.f.

Directeur du Projet Le Bourdon

Octobre 2010



INSTITUT QUÉBÉCOIS D'AMÉNAGEMENT  
DE LA FORÊT FEUILLUE



**Université  
du Québec  
en Outaouais**



**Équipe de réalisation de l'IQAFF**

**Coordonnateur scientifique :** Frédéric Doyon, ing.f., Ph.D.

**Équipe de rédaction :** Frédéric Doyon, ing.f., Ph.D.

**Équipe technique :** Régis Pouliot  
Pascal Rochon

**IQAFF :** Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue  
58 Principale, Ripon, Québec, J0V 1V0.  
Tél : 819-983-6589 ; Fax : 819-983-6588.  
Courriel : iqaff@iqaff.qc.ca  
Site internet : www.iqaff.qc.ca

**Suggestion pour citation :**

Doyon, F. 2010. Effet du gradient latitudinal sur la succession forestière dans le sud-ouest du Québec. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. Rapport technique, 31 p. + 2 Annexes

## **Remerciements**

Ce projet est financé par l'Initiative Circumboréale sur les Changements Climatiques du Réseau International des Forêts Modèles (RIFM), via le réseau national des Forêts Modèles supporté par Ressources naturelles Canada. Une contre-partie significative du financement provient aussi du Fonds Vert sur les changements climatiques du gouvernement du Québec. Nous remercions aussi la Forêt Modèle du Projet Le Bourdon pour sa contribution au projet ainsi que son directeur, Raymond Barrette, pour le support accordé depuis les tous premiers instants de ce projet. Cette étude utilise l'information recueillie dans le cadre de 3 projets réalisés auparavant par l'IQAFF (Nolet et al. 2001, Bouffard et al. 2003, Doyon et Bouffard 2009). Nous remercions donc par le même fait, toutes les personnes ayant aussi contribué à ces trois projets. Nous ne pouvons également passer sous silence la contribution plus que significative de Régis Pouliot et de Pascal Rochon (IQAFF) pour le montage des couches numériques d'information et des géobases de données.

## **Résumé**

Effet du gradient latitudinal sur la succession forestière dans le sud-ouest du Québec.

Frédéric Doyon<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IQAFF, 58 Principale, Ripon, Québec, J0V 1V0

<sup>2</sup>Université du Québec en Outaouais, 283 boulevard Alexandre-Taché, Gatineau, Québec, J9A1L8

Avec leur diversité de communautés végétales et des processus écologiques impliqués, les zones de transition biogéographique sont susceptibles de devenir très dynamique sous les effets du changement climatique. Dans le sud du Québec, nous observons un important gradient de végétation forestière en moins de 150 km de latitude, passant de l'érablière à bouleau jaune à la sapinière à bouleau blanc. Comprendre la dynamique de la végétation et des perturbations à l'échelle du paysage le long d'un tel gradient est important afin de mieux évaluer l'impact du changement climatique sur les communautés dépendantes des forêts. Dans cette étude, nous avons cartographié le couvert forestier et les perturbations de dix paysages-échantillons (~ 100 km<sup>2</sup>), répartis le long d'un gradient latitudinal en utilisant d'anciennes photographies aériennes, cartes forestières, et les inventaires forestiers du début, du milieu et de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle. La superposition des cartes ainsi obtenus à ces trois périodes nous a permis de décrire les transitions de communautés forestières après différents types de perturbations et d'évaluer l'effet de la latitude sur ces transitions. L'analyse des transitions montre que la succession de la végétation varie le long du gradient latitudinal pour tous les types, à l'exception des peuplements de feuillus tolérants. Plus un type de végétation sera perturbé au nord, plus il aura tendance à se transformer en peuplement mixte avec une composante de feuillus intolérants. Par contre, les peuplements de feuillus tolérants montrent une résistance à cette tendance. Ces résultats suggèrent qu'il est nécessaire d'inclure cette variabilité dans la dynamique forestière le long du gradient climatique afin de mieux prédire la composition future de la forêt sous le changement climatique.

## **Abstract**

### **Study of the effect of the latitude on forest succession in southwestern Quebec.**

Frédéric Doyon<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IQAFF, 58 Principale, Ripon, Québec, J0V 1V0

<sup>2</sup>Université du Québec en Outaouais, 283 boulevard Alexandre-Taché, Gatineau, Québec, J9A1L8

With their diversity of vegetation communities and ecological processes involved, biogeographical transition zones are likely to become very dynamic under climate change. In southern Quebec, we observe a sharp forest vegetation change in a 100 km latitudinal gradient, shifting from the Sugar maple-Yellow birch to the Balsam fir-White birch bioclimatic zones. Understanding vegetation and disturbance dynamics at the landscape scale along such gradient is important in order to predict the impact of climate change on forest-dependent communities. In this study, we have mapped the forest cover and the disturbances in ten ~ 100 km<sup>2</sup> sample-landscapes, distributed along a latitudinal gradient using old aerial photographs, forest maps, and forest inventories for three periods during the 20th century. Map overlaying of these periods has allowed us to describe forest community transitions after different disturbance types and to assess the effect of latitude on them. Latitudinal comparison of transition matrices shows that most vegetation response to disturbances varies along the latitudinal gradient for all but the tolerant hardwood forest types. Therefore, observed vegetation changes were driven by initial forest composition, disturbance type importance along the gradient, and succession response change along that gradient. Our results show that succession is sensitive to climate and these changes in dynamics along the climate gradient need to be included for predicting future forest composition under climate change.

## Table des matières

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>II</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>9</b>
<b>2. METHODOLOGIE</b> .....	<b>12</b>
2.1 DESCRIPTION DU TERRITOIRE A L'ETUDE .....	12
2.2 CONSTRUCTION DE LA GEOBASE DE DONNEES .....	13
2.2.1 Source de données .....	13
2.2.2 Montage de la géobase de données .....	14
2.2.3 Description du couvert du couvert forestier et des perturbations .....	15
2.2 ORDONNANCEMENT DES PAYSAGES SELON LES CARACTERISTIQUES DU CLIMAT .....	16
2.3 DESCRIPTION DU DYNAMISME DES PAYSAGES FORESTIERS .....	17
2.3 ANALYSES .....	17
<b>3. RESULTATS</b> .....	<b>18</b>
3.1 Simulation des conditions climatiques .....	18
3.2 Changement de composition des paysages au cours du 20 <sup>ème</sup> siècle .....	20
3.3 Évaluation de l'effet du gradient latitudinal sur la succession, sans tenir compte des perturbations ni de l'intervalle d'évaluation .....	21
3.4 Évaluation de l'effet du gradient latitudinal sur la succession, en fonction du type de perturbation .....	25
3.5 Évaluation de l'effet du gradient latitudinal sur la succession, en fonction de	

<i>l'intervalle d'évaluation</i> .....	26
<b>4. DISCUSSION</b> .....	<b>27</b>
<b>5. CONCLUSIONS</b> .....	<b>29</b>
<b>6. REFERENCES CITEES</b> .....	<b>31</b>

## Liste des tableaux

- Tableau 1. *Années de la prise des photos aériennes ou des inventaires forestiers utilisés pour la caractérisation du couvert forestier et des perturbations dans les études de l'évolution de la végétation forestière en Outaouais et Hautes-Laurentides.*..... 14
- Tableau 2. *Moyenne des degrés-jours pour les 10 paysages-échantillons en Outaouais et Hautes-Laurentides.* ..... 20

## Liste des figures

- Figure 1. *Répartition des paysages-échantillons (numérotés de 1 à 10) utilisées pour cette étude. Les différentes couleurs représentent les trois domaines bio-climaciques couvert par le territoire à l'étude.*..... 13
- Figure 2. *Le modèle d'élévation numérique montre la topographie du territoire à l'étude.* ..... 19
- Figure 3. *Le modèle d'élévation numérique montre la topographie du territoire à l'étude.* ..... 19
- Figure 4. *Représentation de la composition des dix paysages-échantillons dans l'espace représenté par les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales. Les flèches représentent les vecteurs de changement en composition entre le début (cercle accompagné du chiffre du paysage-échantillon), le milieu et la fin (pointe de la flèche) du siècle.*..... 21
- Figure 5. *Composition des vecteurs de transition, peu importe la perturbation et l'intervalle d'évaluation, pour les communautés mixte à dominance résineuse (MR). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en composante principale. Les croix (gris pâle) autour des points représentent la variabilité (IC 95%) des valeurs pour chaque paysage pour les deux axes.* ..... 22
- Figure 6. *Composition des vecteurs de transition, peu importe la perturbation et l'intervalle d'évaluation, pour les communautés mixte à de feuillus intolérants (MFI). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux*

premiers axes de l'analyse en composante principale. Les croix (gris pâle) autour des points représentent la variabilité (IC 95%) des valeurs pour chaque paysage pour les deux axes. .... 23

Figure 7. Composition des vecteurs de transition, peu importe la perturbation et l'intervalle d'évaluation, pour les communautés de feuillus tolérants (**FT**). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en composante principale. Les croix (gris pâle) autour des points représentent la variabilité (IC 95%) des valeurs pour chaque paysage pour les deux axes. .... 24

Figure 8. Composition des vecteurs de transition, selon le type de perturbation, peu importe l'intervalle d'évaluation, pour les communautés de feuillus tolérants (**R**). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en composante principale. .... 25

Figure 9. Composition des vecteurs de transition, selon l'intervalle, peu importe l'intervalle d'évaluation, pour les communautés de mixtes à dominance de feuillus intolérants (**MFI**). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en composante principale. .... 28

## **1. Introduction**

Les changements climatiques ont déjà commencé à affecter les forêts du Canada et ces changements risquent de s'accélérer dans un proche avenir (CCFM 2008). Ceux-ci toucheront la productivité des forêts (Duchesneau et al. in prep., Girardin et al. 2008), la distribution des espèces (Iverson et Prasad 1998, Brotons et Jiguet, F. 2010), la succession forestière (Doyon et al. 2010) et les perturbations naturelles (Flannigan et al. 2005). Comme ils impliquent plusieurs niveaux d'organisation biologiques (de l'arbre au paysage), interagissant à des échelles temporelles et spatiales multiples, ils génèrent des dynamiques complexes dont les impacts cumulés peuvent être très importants (Yamasaki et al. 2008a). Ainsi, les acteurs forestiers, et plus particulièrement les communautés canadiennes dépendantes des forêts, seront affectés soit dans leur approvisionnement en ressources et dans la qualité des services écologiques dont leurs activités dépendent, soit directement via leurs opérations (Williamson 2010). Il est donc important de développer des outils d'aide à la décision qui leur permettront de mieux appréhender les risques et leur vulnérabilité face à ceux-ci. Il sera alors possible d'envisager des mesures d'adaptation qui viendront atténuer les impacts (voir par exemple Yamasaki et al. 2008b, Doyon et Nolet 2010), conformément au cadre d'évaluation des vulnérabilités et des capacités d'adaptation proposé par Johnston et Williamson (2007).

Le changement dans l'aire de distribution des espèces d'arbres sera, parmi les effets associés aux changements climatiques, un des plus importants sur les forêts du monde. Ce phénomène de changement de la végétation forestière sera particulièrement important en marge des limites des biomes septentrionaux où on observe actuellement les transitions entre les grands cortèges floristiques qui les caractérisent. Un changement dans l'importance et la répartition des espèces aura des répercussions majeures sur les collectivités forestières, puisque que leurs activités socio-économiques sont hautement structurées par la mise en valeur des ressources forestières propres à chaque biome (Williamson et al. 2010). Ainsi, plusieurs d'espèces d'arbres du Canada pourront être très vulnérables aux changements climatiques (Johnston et al. 2009). Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons particulièrement à ce phénomène et à son impact sur les activités des partenaires de la Forêt Modèle du Projet Le Bourdon (FMPB). Le territoire de cette Forêt Modèle est caractérisé par un fort gradient biogéographique. Comme l'activité socio-économique de ce territoire est hautement structurée par la mise en valeur des ressources forestières (produits et services) propres à chacun des biomes qu'on y trouve, un changement dans l'importance et la répartition de ceux-ci aura des répercussions majeures

sur les collectivités. Les parties prenantes impliquées dans le processus de planification intégrée des ressources du territoire sont conscientes de cet enjeu et désire avoir une meilleure compréhension des effets des changements globaux sur leurs forêts afin d'élaborer dès maintenant des stratégies d'adaptation qui leur permettront de mieux gérer leurs options futures.

Nous nous proposons donc de modéliser les effets qu'auront les changements climatiques sur la forêt de ce territoire par voie de modélisation. Afin de caractériser les changements de la végétation selon les caractéristiques du climat, il est important de comprendre les processus qui sont responsables de la dynamique de la végétation forestière, tels la succession et le régime de perturbations naturelles, et d'évaluer comment ceux-ci peuvent agir différemment selon les caractéristiques du climat. Cependant, la difficulté majeure pour effectuer de telles études réside dans le fait que les caractéristiques du climat ne sont pas « expérimentables » et ne peuvent s'évaluer que sur de grandes étendues, soit à l'échelle du paysage. Il est donc impossible de reproduire, pour un même territoire, une expérience qui permettrait de tester et de comparer l'effet de différents climats sur la dynamique de la végétation forestière.

Afin de contourner cette difficulté, nous proposons d'utiliser l'approche des analogues latitudinaux. Une telle approche pose comme prémisse que les conditions climatiques méridionales (et les dynamiques qui s'y déroulent) s'appliqueront plus au nord avec les changements climatiques. Dans ce projet, nous voulons donc, dans un premier temps, caractériser la dynamique forestière en fonction du gradient latitudinal pour ainsi appliquer, dans un deuxième temps, un peu plus au nord les dynamiques observées au sud, en fonction des conditions climatiques futures prévues à cet endroit afin de simuler les effets des changements climatiques. Pour paramétrer notre modèle qui utilise cette approche des analogues latitudinaux, nous bénéficierons d'études sur l'évolution historique de la végétation forestière au cours du 20<sup>ème</sup> siècle d'un territoire couvrant l'est de l'Outaouais et une partie des Hautes-Laurentides (Nolet et al. 2001, Bouffard et al. 2003, Doyon et Bouffard 2009). L'ensemble de ces trois études regroupe 10 paysage-échantillons de 78 à 140 km<sup>2</sup> répartis sur un fort gradient latitudinal, qui passe de la forêt tempérée décidue à la forêt boréale, par la forêt mixte. Ces études ont déjà permis de caractériser l'évolution de des différents types de forêts selon les types perturbations à partir de photos aériennes anciennes.

Ainsi, dans un premier temps, et pour cette étude-ci, nous nous intéressons à l'effet du gradient latitudinal sur la **succession forestière**.

Plus particulièrement, les objectifs de cette première étude sont:

1. De développer une base de données commune sur l'évolution de la végétation au courant du siècle dernier à partir des 10 paysages-échantillons provenant des études de Nolet et al. (2001), Bouffard et al. (2003), Doyon et Bouffard (2009) ;
2. De modéliser les caractéristiques climatiques actuelles des 10 paysages-échantillons afin de pouvoir les placer dans un ordre de gradient latitudinal ;
3. De caractériser les changements de composition des paysages en fonction du gradient latitudinal ;
4. De tester l'effet du gradient latitudinal sur la succession forestière selon :
  - 4.1. La période (1<sup>ère</sup> et seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle);
  - 4.2. Le type de perturbation

## **2. Méthodologie**

### **2.1 Description du territoire à l'étude**

Bien que ce projet se déroule essentiellement sur le territoire de la Forêt Modèle du Projet Le Bourdon (FMPB), nous avons étendu le territoire sur la portion plus méridionale afin d'inclure des conditions climatiques qui pourront arriver au sud de la FMPB (Figure 1). Ce territoire est caractérisé par une très grande diversité d'écosystèmes forestiers, avec la présence de trois biomes soit, au sud, l'érablière à bouleau jaune (forêts feuillues), au centre, la sapinière à bouleau jaune (forêts mélangées) et au nord, la sapinière à bouleau blanc (forêts boréales). Les données qui sont utilisées pour les analyses de cette étude proviennent de 10 paysages-échantillons répartis dans ces 3 biomes (Figure 1). Une description écologique détaillée du relief, de la géologie, de l'hydrographie, des dépôts de surface, du climat, et de la végétation est fournie pour chacun des 10 paysages-échantillons dans Nolet et al. (2001), Bouffard et al. (2003), Doyon et Bouffard (2009).

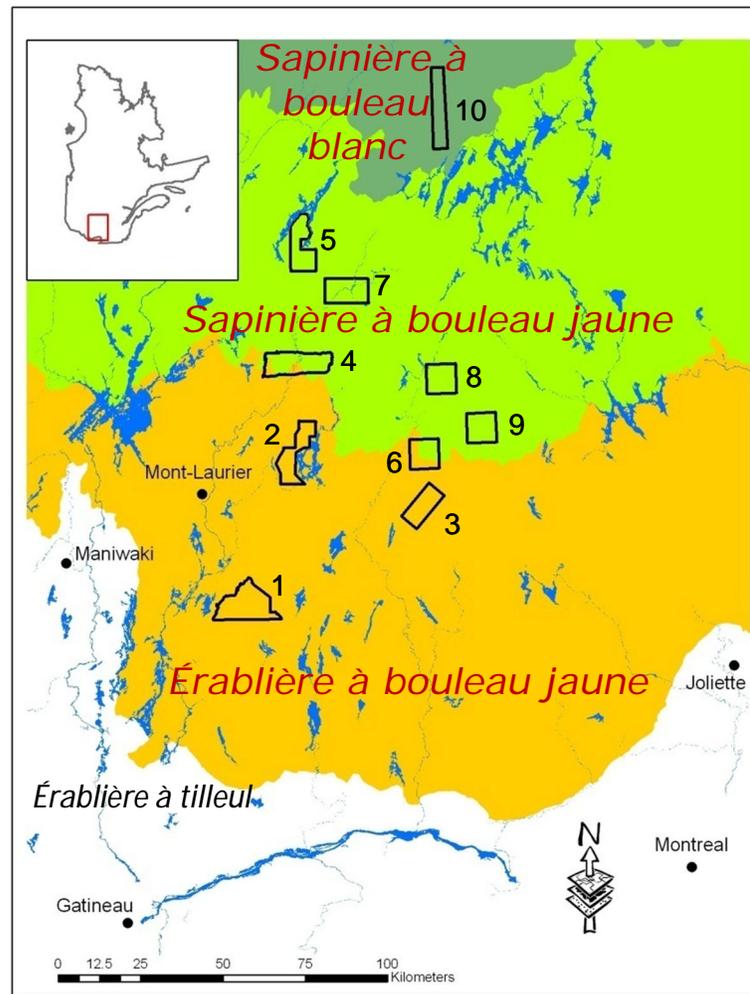


Figure 1. Répartition des paysages-échantillons (numérotés de 1 à 10) utilisées pour cette étude. Les différentes couleurs représentent les trois domaines bio-climaciques couvert par le territoire à l'étude.

## 2.2 Construction de la géobase de données

### 2.2.1 Source de données

Une base de données géoréférencées a été créée à partir de trois couches d'information relatives à 3 périodes, soit au début, au milieu et la fin du 20<sup>ème</sup> siècle. Ces 3 périodes sont différentes selon l'étude d'où provient l'information (Tableau 1). Les couches d'information des deux premières périodes ont été obtenues à partir de la photo-interprétation de photographies anciennes en provenance respectivement de la Bibliothèque des Archives nationales du Québec (BANQ) et de l'Institut québécois d'Aménagement de la

Forêt Feuillue (IQAFF). Afin de rendre l'information cohérente, la photo-interprétation de ces périodes a été réalisée à partir des normes de cartographie du 3<sup>ème</sup> programme de la connaissance de la ressource forestière du Québec (MRN 2000) en omettant les composantes écologiques. Quant à la couche la plus récente, les données provenaient directement de l'inventaire forestier mis à jour du 3<sup>ème</sup> programme de la connaissance de la ressource forestière. Dans un souci de mieux répondre aux besoins spécifiques de la présente étude, l'aire minimale d'interprétation a été de 4 ha et les appellations pour la composition des peuplements ont été regroupées en un nombre plus restreint de possibilités (Annexe 1).

Tableau 1. Années de la prise des photos aériennes ou des inventaires forestiers utilisés pour la caractérisation du couvert forestier et des perturbations dans les études de l'évolution de la végétation forestière en Outaouais et Hautes-Laurentides.

Étude	Période durant le 20ème siècle		
	Début	Milieu	Fin
Nolet et al. (2001)	1928-30	1974	1990
Bouffard et al. (2003)	1949	1975	1994
Doyon et Bouffard (2009)	1928-30	1961-1962	2000

### 2.2.2 Montage de la géobase de données

À la suite de la photo-interprétation des photos aériennes anciennes, les étapes de calage et d'ortho-rectification des images et de la numérisation des polygones ont été réalisées à l'aide du logiciel Arc Gis (version 9.2), menant à la production des bases de données propres à chaque période. Les couches numériques de chaque période ont été par la suite superposées, pour chaque paysage, afin de créer une base unique de données permettant d'associer à chaque polygone les informations relatives aux trois périodes étudiées simultanément. Enfin, il a fallu procéder à un nettoyage minutieux de ces bases de données avant de passer aux analyses du paysage et de son évolution. Cette étape consistait à supprimer les lignes de données pour lesquelles il y avait un manque ou une incohérence au niveau de l'information entre les périodes. Ainsi, les polygones dont la superficie était égale à zéro ou encore ceux contenant des invraisemblances en termes d'âge, de densité ou de code terrain ont été éliminés. L'ensemble des aberrations qui ont été détectées avait pour origine les causes suivantes : - a) les différentes échelles, la qualité et le moment de prise des photos utilisées pour la création des couches numériques; - b) l'effet de bordure (transition) présent lors de la phase de délimitation des polygones; et enfin -

c) le phénomène d'évolution des taux de mortalité ou de survie des arbres appelé réaction post-photo-interprétation.

### *2.2.3 Description du couvert forestier et des perturbations*

La description de l'état de la végétation à différents moments a été réalisée en termes de composition forestière et de perturbations. Pour la composition forestière, les communautés d'espèces d'arbre ont été regroupées en sous-types pour caractériser la succession dans le couvert forestier. Ces sous-types de composition sont : feuillus tolérants (**FT**), feuillus intolérants (**FI**), mélangés à dominance de feuillus tolérants (**MFT**), mélangés à dominance de feuillus intolérants (**MFI**), mélangés à dominance de résineux (**MR**) et résineux purs (**R**). La liste des groupements d'essences inclus dans chacun des sous-types de composition se retrouve à l'annexe 2. À cette étape, les peuplements trop jeunes pour être classés en sous-types de composition ont également été examinés sous les rubriques suivantes : jeunes feuillus (**JF**), jeunes résineux (**JR**) et jeunes mixtes (**JM**). Le maintien de ces classes exprime résulte de l'incapacité du photo-interprète à pouvoir subdiviser les types de composition en sous-types de composition chez les peuplements très jeunes. Ce phénomène est associé à la présence abondante de perturbations majeures ayant eu lieu à différentes périodes, particulièrement le feu et la coupe totale (paysage plus septentrionaux).

Deux autres catégories ont aussi été utilisées pour représenter 1) les zones trop récemment perturbées pour y identifier une des communautés précédentes (**NA**) et 2) les zones considérés comme non-productive (**NF**). Cette dernière catégorie (**NF**) représente principalement les zones de dénudés.

La nature des perturbations et l'étendue de celles-ci constituent le deuxième aspect analysé dans cette section. Pour ce faire, les perturbations ont été classées en deux types : - a) naturelles pour les épidémies, chablis et incendies; et - b) anthropiques pour les coupes forestières, le regarnie et les plantations. L'intensité des perturbations a été divisée en deux catégories selon quelle était partielle ou totale. Les perturbations partielles comprennent les épidémies légères, les brûlis partiels, les chablis partiels, le regarnie et les coupes autres que la coupe à blanc et la coupe avec protection de la régénération. Les brûlis, les chablis et les épidémies sévères, les plantations et les coupes à blanc avec ou sans protection de la régénération représentent les perturbations totales. Les superficies perturbées ont été compilées pour tous les types de perturbations, pour les trois périodes (début, milieu et fin du siècle).

## **2.2 Ordonnancement des paysages selon les caractéristiques du climat**

Afin de bien représenter le gradient latitudinal comme un analogue au climat, nous avons modélisé les caractéristiques du climat sur le territoire à l'aide du logiciel **BioSim** du Service Canadien des Forêts (Régnière 1996, Régnière et St-Amant 2007, Régnière et al. 2008). Ce logiciel permet d'extraire des données climatiques d'une base de données incluse dans le logiciel. Pour bien sélectionner les stations météorologiques qui seront utilisées pour extraire les données, **BioSim** choisit les stations comprises à l'intérieur des limites de notre zone. De plus, **BioSim** peut ajuster plus finement lors de l'interpolation entre les stations les caractéristiques du climat à partir d'un modèle d'élévation numérique (MÉN) du territoire.

**BioSim** implante une série de points de manière aléatoire sur le terrain pour des fins d'interpolation par modélisation de krigeage. Dans notre cas, nous avons utilisé 1000 points d'interpolation. Une fois ces points établis, **BioSim** attribue une valeur à chaque point en fonction de notre requête de paramètres climatiques. C'est avec l'ensemble des points que **BioSim** parvient ainsi à calculer une valeur pour chaque pixel du territoire en utilisant une fonction d'interpolation. Pour minimiser l'écart-type des valeurs obtenues, nous avons effectué 30 répétitions du processus de création de points et d'interpolation.

Dans la construction d'une simulation, **Biosim** propose 14 modèles différents. Pour les besoins de notre projet, nous avons utilisé le modèle "Climatic Annual". Ce modèle nous permet d'extraire de l'information sur les degrés-jours (Degree-Day  $\geq 1^{\circ}\text{C}$  day) et sur les précipitations (TotalPrecipitation (mm)) durant une année, soit les deux paramètres qui nous intéressaient plus particulièrement pour ce projet.

Comme il est prédit selon les modèles de changements climatiques qu'il y aura très peu de changements en termes de précipitation pour notre territoire d'étude (Consortium Ouranos, en préparation), nous nous sommes intéressés seulement à la variable degré-jours pour ordonnancer nos 10 paysages. Pour ce faire, nous avons fait la moyenne des degrés-jours sur l'ensemble des pixels (1 ha de résolution) de chaque paysage. Deux des 10 paysages étaient près de grands réservoirs (Paysage 2 près du réservoir du lac Kiamika, et Paysage 5 près du réservoir du lac Mitchinemicus, Figure 1)), mais comme **BioSim** ne permet pas d'inclure l'effet tampon des grandes masses d'eau, nous avons délibérément ajusté l'ordre de ces 2 paysages pour refléter le caractère plus tempéré de leur climat local.

### 2.3 Description du dynamisme des paysages forestiers

Nous avons regardé les changements au niveau de la composition végétale pour les deux intervalles d'évaluation suivants : 1930 à 1960 et 1960 à 2000. Pour ce faire, l'évolution des peuplements a été analysée en compilant les superficies par sous-types de composition et en calculant les transitions. Pour calculer les transitions, on a calculé la superficie en sous-type A qui a évolué en B au temps suivant, et cela, en fonction des 5 types de perturbation suivants (transitions conditionnelles aux perturbations):

- 1) Perturbation naturelle partielle ;
- 2) Perturbation naturelle partielle ;
- 3) Perturbation anthropique partielle ;
- 4) Perturbation anthropique partielle ;
- 5) Pas de perturbation (vieillessement)

### 2.3 Analyses

Pour tester l'effet de latitude sur la succession, nous avons dans un premier temps isolé le vecteur de composition représentant la transition de chaque sous-type mature (ce qui exclut les sous-types jeune (**FJ**, **MJ**, **RJ** et **NA**), après chaque type de perturbation, dans chacun des dix paysages, pour chaque intervalle d'évaluation (Figure 2). Nous avons ainsi obtenu 600 vecteurs de transition (10 paysages \* 5 perturbations \* 2 intervalles d'évaluation \* 6 sous-types).

Afin d'obtenir une compréhension globale de la succession, nous avons procédé à une analyse en composantes principales (ACP). Pour ce faire, nous avons utilisé comme « objet » chacun des vecteurs de transition et la proportion de transition en chacun des sous-types (incluant les sous-types **FJ**, **MJ**, **RJ** et **NA**) comme « descripteurs » de matrice d'entrée (600 lignes\*9 colonnes). L'ACP a été réalisée à l'aide de R (Version 2.9.1) en utilisant le module Rcmdr (1.4-10) et sa fonction d'analyse en composantes principales.

Nous avons pu ensuite évaluer, pour chaque sous-type, comment changeait la composition après les différentes perturbations pour chaque paysage et ainsi vérifier si ce changement dans la succession suivait une tendance le long du gradient latitudinal. Pour ce faire, nous avons effectué une régression entre l'ordonnement climatique des paysages et leurs positions le long des deux premiers axes de l'espace réduit de l'analyse en composantes principales (« PCA scores »). Ainsi, si une relation significative était décelée, on pouvait en déduire que la succession changeait en fonction des différentes conditions climatiques observées entre les paysages.

### 3. Résultats

#### 3.1 Simulation des conditions climatiques

Le modèle d'élévation numérique a été utilisé pour la modélisation des conditions climatiques du territoire à l'étude (Figure 2). On y note que la portion plus à l'est se trouve à des altitudes plus élevées. Conséquemment, ce patron topographique aura une influence sur les conditions climatiques du territoire.

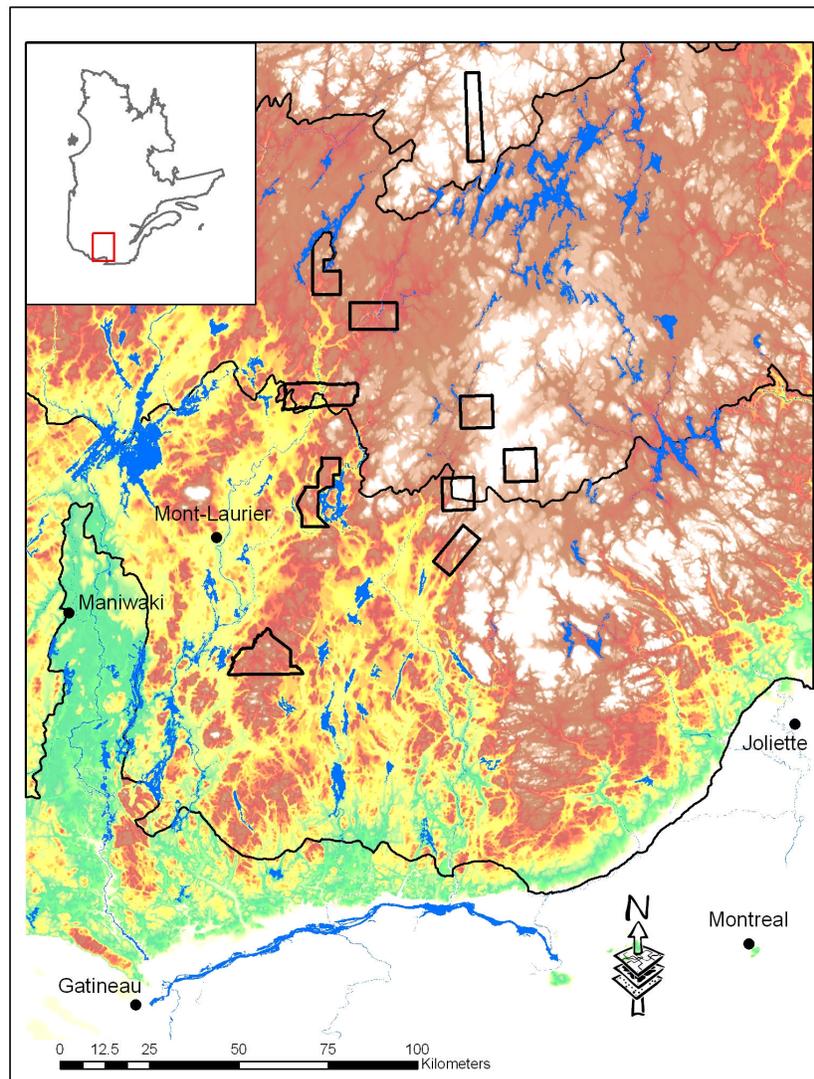


Figure 2. Le modèle d'élévation numérique montre la topographie du territoire à l'étude.

En effet, après l'application du modèle BioSim, on s'aperçoit que les paysages à l'est sont plus « froids » et reçoivent donc moins d'énergie durant une année, comme le démontre la carte des degrés-jours (Figure 3).

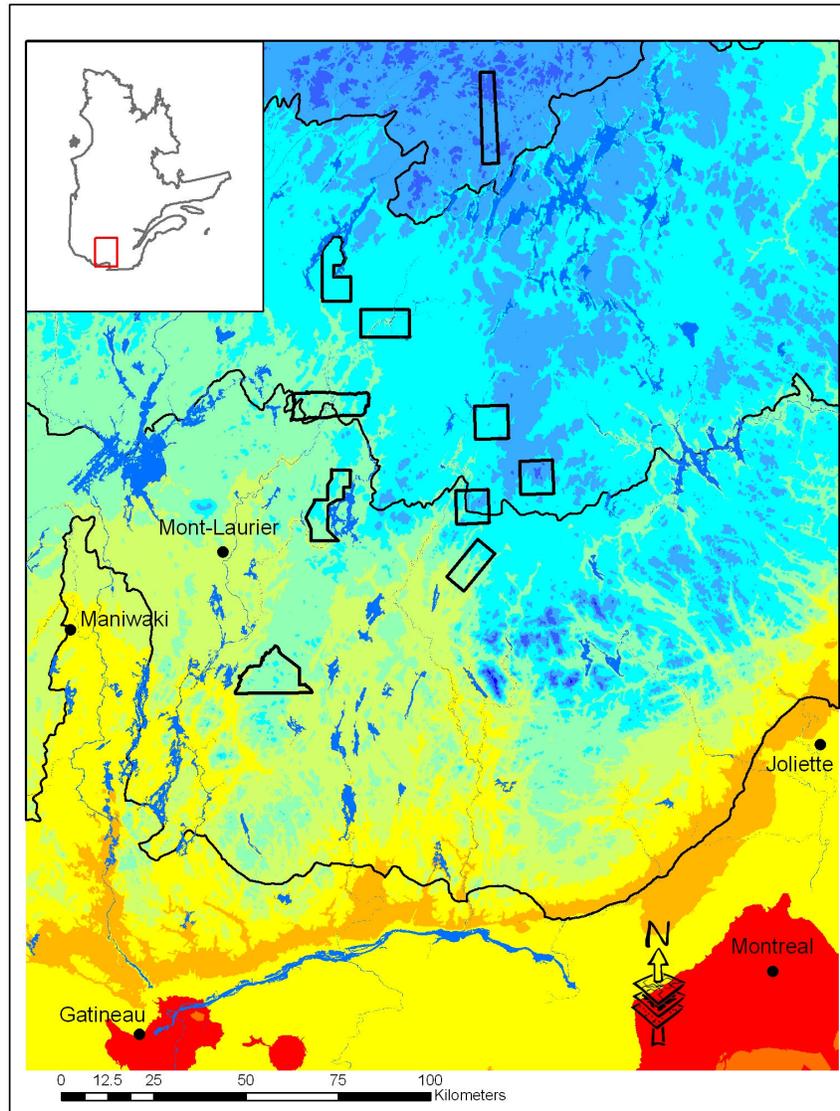


Figure 3. Le modèle d'élévation numérique montre la topographie du territoire à l'étude.

En faisant la moyenne des valeurs en degrés-jours, il a été possible de mettre en ordre, du

plus chaud au plus froid, les paysages-échantillons (Tableau 2).

Tableau 2. Moyenne des degrés-jours pour les 10 paysages-échantillons en Outaouais et Hautes-Laurentides.

Paysage		
Nom	Numéro	Degrés jours
Lac du Sourd	1	2243
Lac Kiamika	2	2178
Rivière Macaza	3	2192
Lac de la Ferme	4	2185
Lac Mitchinémicus	5	2070
Rivière Rouge	6	2045
Rivière Lièvre nord	7	2086
Lac Lenoir	8	2052
Lac Justine	9	1964
Lac Seymour	10	1864

### 3.2 Changement de composition des paysages au cours du 20<sup>ème</sup> siècle

L'analyse en composante principale nous a permis de caractériser les changements de composition des paysages-échantillons au cours du 20<sup>ème</sup> siècle à partir des deux premiers axes. Le premier axe, qui capture 27.1% de la variance, exprime surtout le passage d'une végétation méridionale (Feuillus tolérants (**FT**), mixte à feuillus tolérants (**MFT**), résineux de la forêt méridionale (**RM**)) à une végétation plus septentrionale (résineux boréaux (**RB**), mixtes à feuillus intolérants (**MFI**), feuillus intolérants (**FI**)) (Figure 4). Par conséquent, cet axe semble être celui qui est le plus représentatif du gradient climatique. On observe, en effet, que la position des 10 paysages suit approximative l'ordre climatique, de droite à gauche. Seul le paysage 6 semble être mal ajusté à l'ordre climatique que nous avons accordé aux paysages-échantillons.

Le deuxième axe, qui capture tout de même 19.7% de la variance, exprime plutôt l'importance que jouent les peuplements de jeunes forêts (**FJ**, **MJ**, **RJ**) (Figure 4). On s'aperçoit, pour la majorité des paysages-échantillons et plus particulièrement les paysages les plus septentrionaux, que les vecteurs de changements en composition du début à la fin du siècle, se déplacent surtout le long de cet axe, du haut vers le bas. Ce résultat exprime que l'importance des jeunes forêts s'est vue être réduite depuis le début du siècle pour ces

paysages-échantillons.

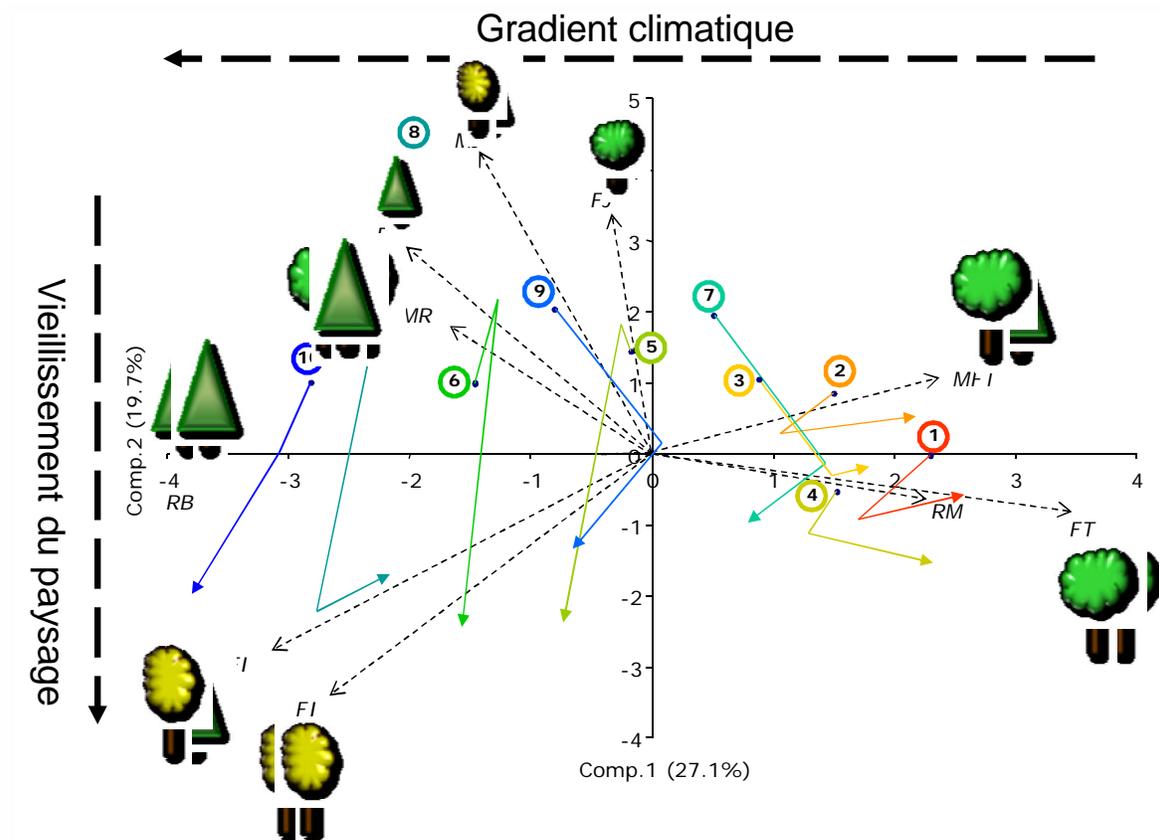


Figure 4. Représentation de la composition des dix paysages-échantillons dans l'espace représenté par les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales. Les flèches représentent les vecteurs de changement en composition entre le début (cercle accompagné du chiffre du paysage-échantillon), le milieu et la fin (pointe de la flèche) du siècle.

### 3.3 Évaluation de l'effet du gradient latitudinal sur la succession, sans tenir compte des perturbations ni de l'intervalle d'évaluation

Ce premier résultat nous confirme que l'approche analytique est suffisamment puissante pour pouvoir déceler les patrons de changements associés au climat. Nous avons donc évalué, pour chaque sous-type, comment la composition des vecteurs de transition changeait selon l'ordre climatique attribué aux paysages-échantillons. Ainsi, par exemple, lorsqu'on examine l'évolution des communautés forestières **MR** (mixte à dominance de

résineux), peu importe la perturbation et l'intervalle d'évaluation que cette communauté a tendance à se transformer vers les peuplements de **MFT** et de **FT** pour les paysages méridionaux alors qu'elle se transforme plutôt en **MFI** et **R** pour les paysages plus septentrionaux (Figure 5).

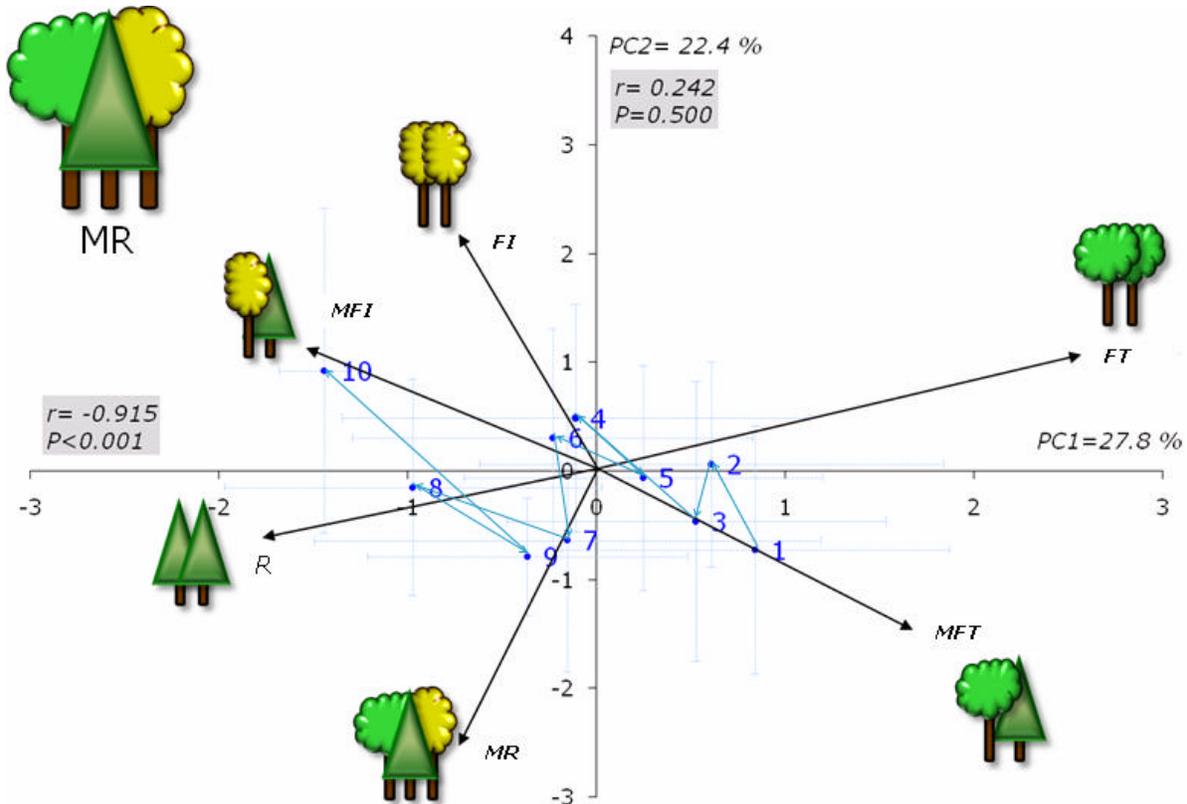


Figure 5. Composition des vecteurs de transition, peu importe la perturbation et l'intervalle d'évaluation, pour les communautés mixte à dominance résineuse (MR). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en composante principale. Les croix (gris pâle) autour des points représentent la variabilité (IC 95%) des valeurs pour chaque paysage pour les deux axes.

On peut ainsi dire que la succession pour cette communauté varie en fonction de la latitude et donc du climat). On remarque, en effet, que la relation entre l'ordre climatique des paysages-échantillons et le premier axe de l'ACP est très forte ( $r = -0.95$ ,  $P < 0.001$ ). Si on effectue le même exercice pour tous les types de communauté mature (**FT**, **FI**, **MFT**, **MFI**, **MR** et **R**), on observe qu'il existe une relation entre l'ordre climatique des paysages-

échantillons et un des deux premiers axes de l'ACP (Tableau 3).

Tableau 3. Coefficients de corrélations de Pearson de la relation entre l'ordre climatique des paysages-échantillons et un des deux premiers axes de l'ACP (PC1, PC2) pour les 6 type de communauté mature. Les valeurs en grises sont significatives ( $P < 0.05$ ).

Communauté	FI	FT	MFI	MFT	MR	R
PC1	-0.875	-0.719	-0.438	-0.773	-0.915	-0.825
PC2	0.120	-0.098	0.677	0.115	0.242	0.335

Contrairement aux autres communautés, on observe pour la communauté des **MFI** que la relation est plutôt avec l'axe 2 (PC2) de l'ACP que l'axe 1 (Tableau 3, Figure 6).

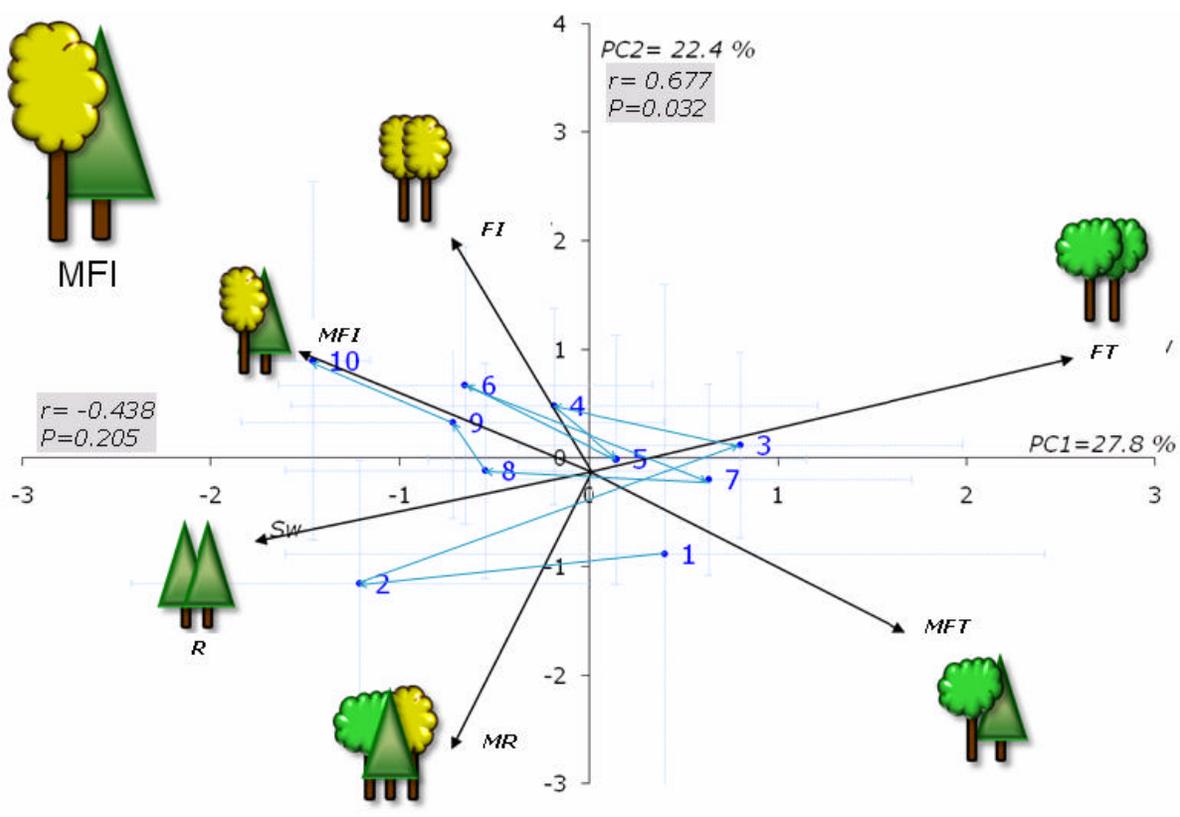


Figure 6. Composition des vecteurs de transition, peu importe la perturbation et l'intervalle d'évaluation, pour les communautés mixte à de feuillus intolérants (MFI). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en

composante principale. Les croix (gris pâle) autour des points représentent la variabilité (IC 95%) des valeurs pour chaque paysage pour les deux axes.

L'observation de l'ordre des paysages dans l'ACP exprime qu'il y a donc une tendance pour cette communauté à demeurer de plus en plus **MFI** à mesure que l'ordre climatique des paysages augmente (Figure 6).

Lorsqu'on regarde plus en détail le cas des **FT**, on s'aperçoit que la relation est moins forte que pour les autres communautés (à part la **MFI**) (Tableau 3). On remarque en effet que si on retire le paysage 10, l'effet du gradient latitudinal devient très faible (Figure 7). Ce type de communauté semble donc très résistant au changement de succession (il aura tendance à demeurer le même type de communauté) et sa succession ne semble pas être modifiée par la latitude.

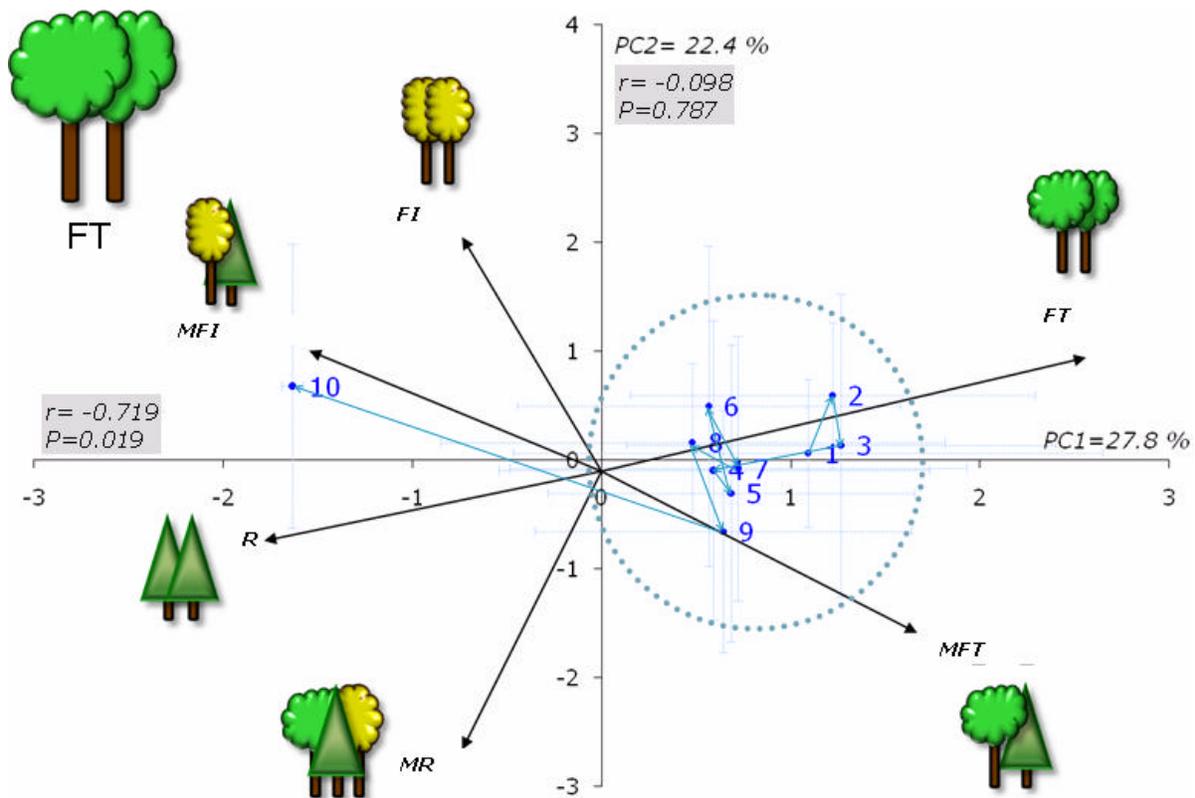


Figure 7. Composition des vecteurs de transition, peu importe la perturbation et l'intervalle d'évaluation, pour les communautés de feuillus tolérants (**FT**). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en

composante principale. Les croix (gris pâle) autour des points représentent la variabilité (IC 95%) des valeurs pour chaque paysage pour les deux axes.

### 3.4 Évaluation de l'effet du gradient latitudinal sur la succession, en fonction du type de perturbation

Cette relation entre l'ordre climatique des paysages et les deux premiers axes de l'ACP est aussi variable selon le type de perturbation. Par exemple, on peut observer, dans le cas des peuplements de résineux (**R**) qu'en absence de perturbations il existe une relation très forte entre l'ordre climatique des paysages et le premier axe (Figure 8). Cette relation demeure aussi bien décelable pour le cas de la succession après coupe partielle. Cependant, après perturbation naturelle partielle (NP), ou après coupe totale, cette relation disparaît.

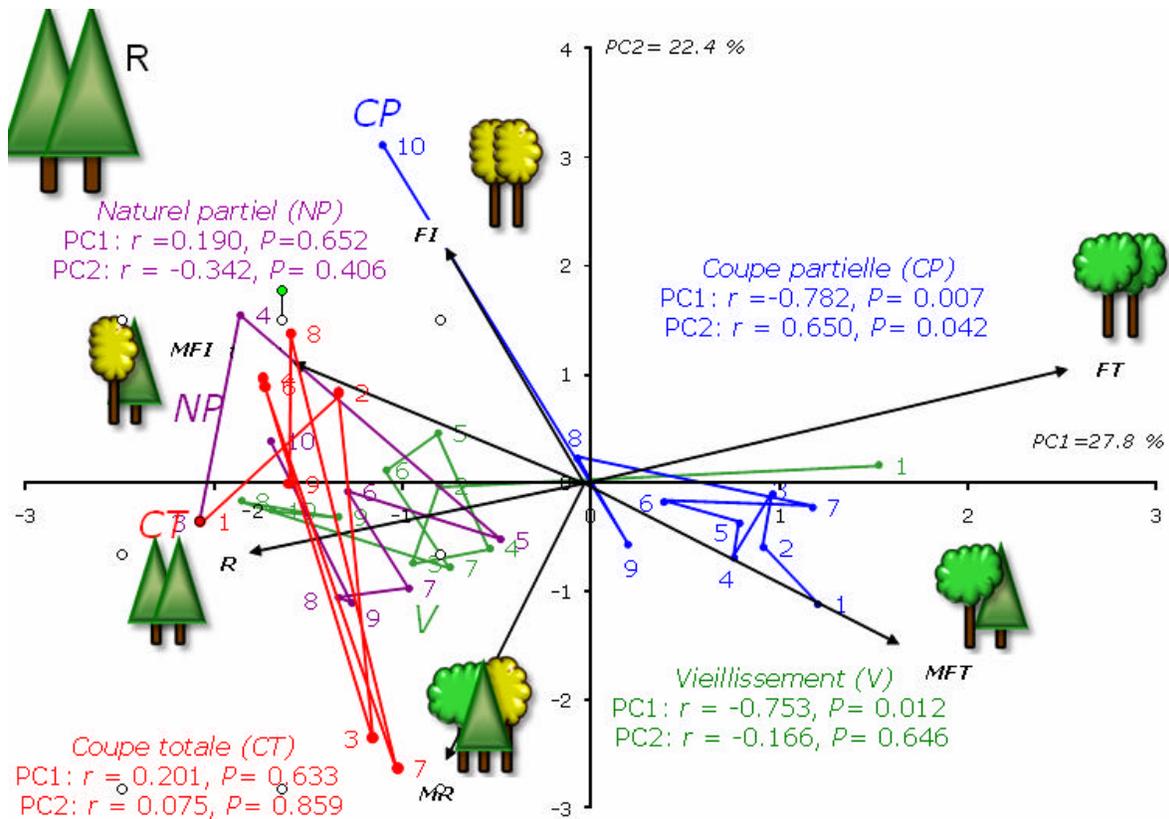


Figure 8. Composition des vecteurs de transition, selon le type de perturbation, peu importe l'intervalle d'évaluation, pour les communautés de feuillus tolérants (**R**). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en composante principale.

Lorsqu'on fait la synthèse des relations entre l'ordre climatique des paysages et les deux premiers axes de l'ACP en fonction du type de perturbation, on observe aussi que l'effet du gradient latitudinal varie selon le type de perturbation et le type de communauté (Tableau 4). Ainsi, on détecte en effet du gradient latitudinal sur la succession après la coupe partielle et après vieillissement pour les **FI**, les **MR** et les **R**, alors que l'effet du gradient latitudinal se détecte seulement sur les **MFT** et **MR** après coupe totale. On détecte un effet du gradient latitudinal sur la succession après les perturbations de type naturel partiel seulement pour les **MFT**. On note, pour les **FT**, que l'effet de la latitude sur la succession n'a pu être décelé après aucun type de perturbation.

Tableau 4. Coefficients de corrélations de Pearson de la relation entre l'ordre climatique des paysages-échantillons et un des deux premiers axes de l'ACP (PC1, PC2) pour les 6 types de communauté mature selon 4 types de perturbation. Les valeurs en grises sont significatives ( $P < 0.05$ ).

Type de perturbation	Axe	Type de communauté					
		FI	FT	MFI	MFT	MR	R
Coupe partielle	PC1	-0.701	-0.053	0.078	-0.192	-0.642	-0.782
	PC2	0.286	0.216	0.792	0.447	0.623	0.650
Coupe totale	PC1	-0.909	-0.458	-0.236	-0.801	-0.836	0.201
	PC2	-0.244	-0.292	-0.111	0.008	-0.236	0.075
Naturel partiel	PC1	-0.287	-0.595	-0.514	-0.817	-0.265	0.190
	PC2	0.051	0.004	-0.387	0.062	0.128	-0.342
Vieillesse-ment	PC1	-0.695	-0.521	-0.465	-0.492	-0.843	-0.753
	PC2	0.220	-0.488	-0.061	-0.383	-0.160	-0.166

### 3.5 Évaluation de l'effet du gradient latitudinal sur la succession, en fonction de l'intervalle d'évaluation

Comme les transitions de succession ont été évaluées pour 2 intervalles (1930-60 et 1960-90), nous avons voulu vérifier si l'effet du gradient latitudinal sur la succession était constant entre les deux intervalles d'évaluation ou si il changeait. On observe que l'effet du gradient latitudinal sur la succession était plus important durant la dernière moitié du siècle que durant la première moitié du siècle (Tableau 5). On note en effet que l'effet du gradient latitudinal sur la succession n'est significatif que pour le type de communauté MR durant le premier intervalle d'évaluation alors que l'effet est significatif pour tous sauf les FT durant le deuxième intervalle d'évaluation.

Tableau 5. Coefficients de corrélations de Pearson de la relation entre l'ordre climatique des paysages-échantillons et un des deux premiers axes de l'ACP (PC1, PC2) pour les 6 types de communauté mature selon les 2 intervalles d'évaluation. Les valeurs en grises sont significatives ( $P < 0.05$ ).

Intervalle d'évaluation	Axe	Type de communauté					
		FI	FT	MFI	MFT	MR	R
1930-60	PC1	-0.586	-0.598	-0.038	-0.655	-0.716	-0.621
	PC2	-0.051	-0.279	0.152	0.070	0.190	0.384
1960-90	PC1	-0.746	-0.582	-0.782	-0.704	-0.882	-0.798
	PC2	0.404	-0.244	0.473	-0.271	0.150	0.102

À titre d'exemple, on peut observer sur le diagramme de l'ACP pour les MFI qu'aucune tendance n'est décelable pour la deuxième intervalle d'évaluation alors qu'il l'est pour le premier (Figure 9).

#### 4. Discussion

Cette étude montre que la succession est un processus influencé par la latitude. De plus, nous avons pu démontrer que cet effet du gradient latitudinal sur la succession dépend du type de communauté et du type de perturbation. Nous avons aussi démontré que cet effet a été plus important durant la dernière partie du siècle que la première. Cette dernière observation suggère deux avenues:

- 1) Il y a eu un effet d'interaction entre le climat et l'intervalle d'évaluation sur l'effet du gradient latitudinal sur la succession. Cela suggère que durant la deuxième moitié du siècle, le climat aurait déjà changé suffisamment pour influencer la relation entre la latitude et la succession. Si c'est le cas, comme il y aurait déjà un effet de forcing du climat sur la dynamique de la végétation, l'utilisation de l'analogie de la latitude pour exprimer l'effet des changements climatiques serait inappropriée. Cependant, les données climatiques montrent que les changements climatiques ne commenceraient à être décelés qu'à partir de la décennie 1990, ce qui rend cette option peu probable;

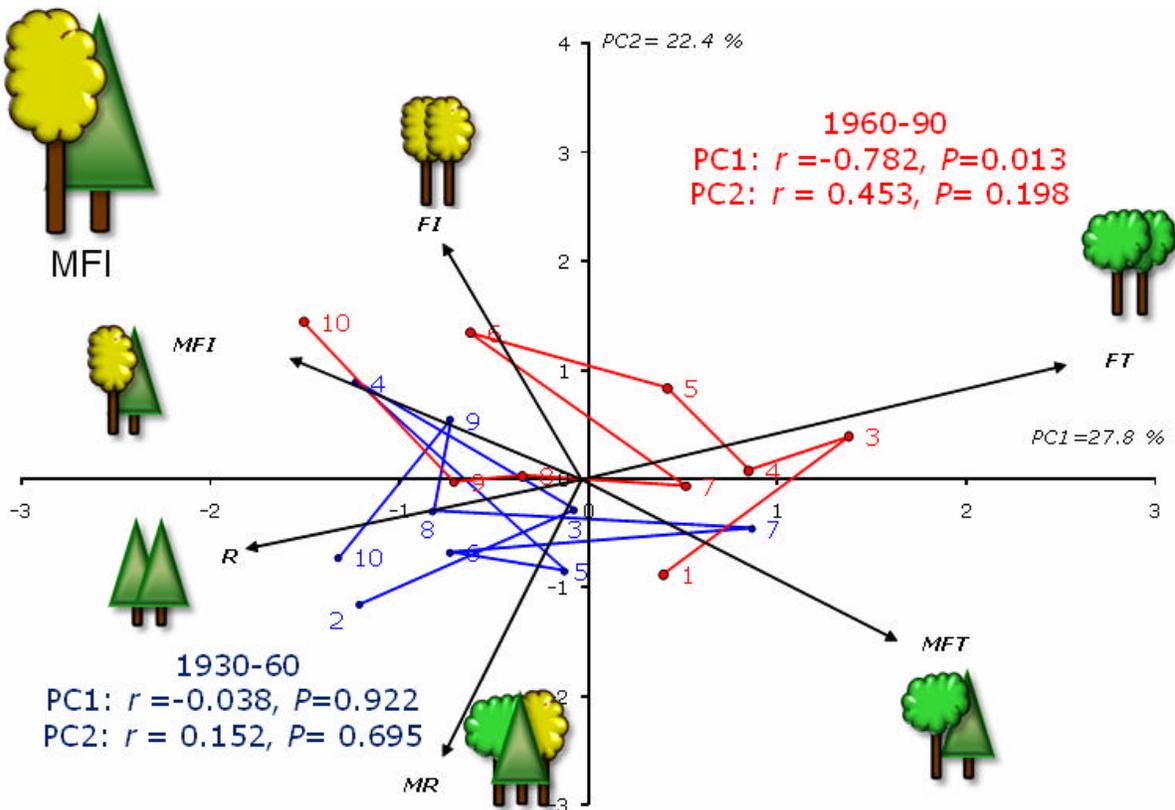


Figure 9. Composition des vecteurs de transition, selon l'intervalle, peu importe l'intervalle d'évaluation, pour les communautés de mixtes à dominance de feuillus intolérants (**MFI**). Les chiffres représentent la position des dix paysages échantillons répartis selon l'ordre climatique du plus chaud au plus froid dans l'espace réduit des deux premiers axes de l'analyse en composante principale.

- 2) La différence entre les deux intervalles proviendrait de l'effet de la perturbation de TBE non détecté (légère) qui a été généralisée durant les années 70-80. Si c'est le cas, l'importance de l'effet du gradient latitudinal sur la succession pourrait être aussi expliqué par le différentiel d'abondance du sapin baumier du sud au nord plutôt que par un effet de différence de climat aux différentes latitudes. Cette base de données pourrait alors être exploitée plus en détail pour évaluer l'interaction entre le type de perturbation et l'intervalle sur l'effet du gradient latitudinal sur la succession.

Notre analyse nous a aussi permis de constater que le type de communauté des feuillus tolérants était 1) plus résistant au changement de composition pour tous les types de perturbation que les autres types de communauté et 2) que l'effet du gradient latitudinal sur

la succession n'avait pas été décelé pour ce type de communauté. Ce résultat est extrêmement intéressant car il aide à expliquer la forte augmentation que ce type de végétation a eue durant le siècle dernier dans toute la forêt tempérée (décidue et mixte). En effet, le changement de composition le plus important qui a été décelé dans tous les paysages, sauf dans celui le plus au nord, dans le domaine bioclimacique de la sapinière à bouleau blanc, est l'augmentation des peuplements de feuillus tolérants. Il sera alors important de voir si cette tendance sera exacerbée par les changements climatiques ou bien si on observera une période de régression de ce type de communauté. Cependant, les résultats obtenus dans cette étude suggèrent plutôt que ce phénomène d'enfeuillement en feuillus tolérants sera accéléré par les changements climatiques.

Nous sommes conscient que l'approche de la latitude comme analogue au climat est basé sur plusieurs prémisses qui peuvent s'avérer être fausses. La première et la plus important est celle qui suppose que le climat ne fera qu'une translation vers le nord. Or, le climat est plus que juste la température. Il est fort probable que les nouvelles conditions de température observées soient accompagnées de conditions de précipitations qui ne soient pas comparables à la zone plus au sud. Ce découplage température/précipitations limite l'utilisation de l'approche de l'analogue de la latitude pour substituer le climat.

Il est d'ailleurs aussi reconnu que lors des changements climatiques, ce n'est pas seulement la moyenne des températures qui changera mais aussi la variabilité de celles-ci qui augmentera. Or, la distribution géographique des espèces n'est pas contrainte par la moyenne des conditions climatiques mais beaucoup plus par les valeurs extrêmes que celles-ci peuvent prendre à un endroit donné. La niche écologique d'une espèce est exprimée par les conditions extrêmes qu'une espèce peut tolérer. L'approche par l'analogue qui vise à substituer le climat par la latitude ne permet pas de tenir compte de cet effet de variabilité.

## **5. Conclusions**

Nous avons décelé pour plusieurs cas de combinaison entre les communautés forestière et le type de perturbation un effet du gradient latitudinal sur la succession. En considérant la prémisse que la latitude peut être considérée comme un effet analogue au réchauffement climatique, ce résultat demande à ce que cet effet de la latitude (et donc du climat) sur la succession soit inclus dans la modélisation des effets des changements climatiques sur la végétation forestière. L'inclusion d'un tel effet permet de faire intervenir un processus

mécanistique dans l'évolution de la végétation forestière sous changement climatique.

Bien que l'approche de l'analogie de la latitude pour substituer au climat comporte plusieurs failles de raisonnement, elle demeure une approche rapide et élégante pour dégrossir dans un premier temps les changements qui pourront subvenir. Nous voulons donc dans une prochaine étape :

- 1) utiliser les prédictions climatiques du Modèle Régionale de Climat sous différents scénarios d'émissions de GES afin d'évaluer comment appliquer la substitution latitude pour le climat et ainsi ;
- 2) appliquer les transitions conditionnelles correspondant au changement de climat ;
- 3) pour pouvoir évaluer quel seront les changements de composition à prévoir sous les changements climatiques pour le territoire d'étude.

## 6. Références citées

- Bouffard, D., F. Doyon et E. Forget. 2003. Historique et dynamisme écologique de la végétation forestière de la réserve faunique Rouge-Matawin de 1930 à nos jours. Rapport de l'Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue. 75 p + annexes.
- Doyon, F. et D. Bouffard. 2009. Reconstitution historique du dynamisme du paysage forestier de l'UAF 64-51 au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. Rapport technique, 84 p. + 9 Annexes.
- Brotons, L. & Jiguet, F. 2010. Bird communities and climate change. In: A. P. Møller, W. Fielder and P. Berthold (eds) Effects of climate change on birds. Oxford University Press. Oxford.
- CCFM (Canadian Council of Forest Ministers). 2008. A vision for Canada's forests: 2008 and beyond. Canadian Council of Forest Ministers, Secretariat Office, Canadian Forest Service, Ottawa ON, 16 pages. Available on-line at: <http://67.199.15.75/ccfm/english/coreproducts-nextnscf.asp>, accessed 23 December 2008.
- Consortium Ouranos. En préparation. Atlas des changements climatiques du Québec.
- Doyon, F., D. Bouffard, P. Nolet, É. Forget. 2010. One century of forest vegetation change along a biogeographical gradient between the temperate and the boreal forest in southern Quebec. Communication orale. US-IALE 25<sup>TH</sup> annual meeting: Is what human do natural? Athens, Georgia, É-U, avril 5-9, 2010.
- Doyon, F. et P. Nolet. 2010. Modelling forest vegetation change under climate change between the temperate and the boreal forest in Southern Quebec using latitude-shifted transition matrices. Communication orale. IUFRO, Landscape Ecology Working Group International Conference. Braganca, Portugal, Sept. 21-24, 2010.
- Duchesneau, R., S. Yamasaki et F. Doyon. In prep. The influence of global climate change on the productivity of white spruce - trembling aspen boreal mixedwood communities in west-central Alberta Climatic Change.
- Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D., Skinner, W.R., and Stocks, B.J. 2005. Future area burned in Canada. *Climatic Change* 72: 1–16.
- Girardin, M.P., Raulier, F., Bernier, P.Y. and Tardif, J.C. 2008. Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: a comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling approaches. *Ecological Modelling* 213: 209–228.
- Iverson LR, et Prasad AM. 1998. Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecological Monographs* 68:465–85.
- Johnston, M. and Williamson, T. 2007. A framework for assessing climate change vulnerability of the Canadian forest sector. *The Forestry Chronicle* 83: 358-361.
- Johnston, M., Williamson, T., Munson, A., Ogden, A., Moroni, M., Parsons, R., Price, D. and Stadt, J. 2010. Climate change and forest management in Canada: impacts, adaptive capacity and adaptation options. A State of Knowledge report. Sustainable Forest Management Network, Edmonton, Alberta. 54 pp.
- Nolet, P., É. Forget, D. Bouffard et F. Doyon. 2001. Reconstitution historique du dynamisme du paysage forestier du bassin de La Lièvre au cours du 20<sup>ième</sup> siècle. Rapport de l'Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue. 114 p.
- Régnière, J. 1996. A generalized approach to landscape-wide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environ. Entomol.* 25: 869-881

- Régnière, J., St-Amant, R. 2007. Stochastic simulation of daily air temperature and precipitation from monthly normals in North America north of Mexico. *International Journal of Biometeorology*. 51: 415-430
- Régnière, J., R. Saint-Amant, B. Cooke et V. Bergeron, 2008. BioSIM Version 9.5.2. Planification saisonnière de la lutte antiparasitaire. Ressource Naturelles Canada, Service canadien des forêts, C.P. 10380 succ. Sainte-Foy, QC, Canada G1V 4C7.
- Robitaille, A. et J-P. Saucier, 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. MRN, Gouvernement du Québec. Éd. Les publications du Québec. 213 p.
- Williamson, T.B.; Price, D.T., Beverly, J.L., Bothwell, P.M., Frenkel, B., Park, J. and Patriquin, M.N. 2008. Assessing potential biophysical and socioeconomic impacts of climate change on forest-based communities: a methodological case study. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, AB. Inf. Rep. NOR-X-415E*. 166 pp.
- Yamasaki, S., F. Doyon, R. Duchesneau, T. Gooding, J. Russell. 2008a. Making the case for cumulative impacts assessment: modeling the potential impacts of climate change, harvesting, oil and gas, and fire. *Forestry Chronicle* 84(3) : 349-368.
- Yamasaki S.H., S. Delagrangé, F. Doyon, F. Lorenzetti, É. Forget, et Travis Logan. 2008b. Climate change adaptation strategies for the tolerant hardwood forests of eastern Canada. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. Rapport technique remis au Climate Change Impacts and Adaptation Program, Natural Resources Canada. 61p. + 2 Annexes.

# **Annexe 1**

**Appellations utilisées lors des travaux de  
photointerprétation après regroupement  
de celles provenant des normes du  
3<sup>ème</sup> inventaire décennal**

Appellation du 3 <sup>ème</sup> inventaire décennal	Appellation utilisées lors des travaux de photointerprétation
BB	BB
BB1	BB
BB1E	BBR
BB1R	BBR
BB1S	BBR
BBBB	BB
BBBBE	BBR
BBBBR	BBR
BBBBBS	BBR
BBE	BBR
BBPE	BB
BBPEE	BBR
BBPER	BBR
BBPES	BBR
BBR	BBR
BJ	BJ
BJ+C	BJR
BJ+PB	BJR
BJ+R	BJR
BJ-R	BJR
CBJ-	RBJ
CC	CC
CE	CR
CE	CR
CR	CR
EBB	RBB
EC	ER
EE	EE
EF	EF
EFI	RFI
EME	ER
EO	FT
EOR	RFT
EPE	RPE

Appellation du 3 <sup>ème</sup> inventaire décennal	Appellation utilisées lors des travaux de photointerprétation
EPG	ER
EPH	PLAN
EPL	PLAN
EPN	PLAN
EPO	PLAN
ER	FT
ERBB	FTFI
ERBJ	FT
ERFI	FTFI
ERFT	FT
ERPE	FTFI
ERR	FTR
ES	ER
F	F
FEPL	PLAN
FEPN	PLAN
FEPO	PLAN
FI	FI
FIBB	FI
FIBBE	FIR
FIBBR	FIR
FIR	FIR
FT	FT
FTFI	FTFI
FTPB	FTR
FTR	FTR
M	M
MEE	MER
PB+FT	RFT
PE1	PE
PE1R	PER
PE1S	PER
PEBB	PE
PEBBS	PER

Appellation du 3 <sup>ème</sup> Inventaire décennal	Appellation utilisées lors des travaux de photointerprétation
PEBBR	PER
PEPE	PE
PEPER	PER
PEPES	PER
PGE	PGR
PGPG	PG
PIG	PLAN
PU	PU
PUR	PUR
R	R
RBB	RBB
RBJ	RBJ
RBJ+	RBJ
RBJ-	RBJ
REO	RFT
RFH	RFT
RFI	RFI
RFT	RFT
SBB	RBB
SC	SR
SE	SR
SFI	RFI
SPE	RPE
SR	SR
SS	SS

## **Annexe 2**

**Répartition par sous-types de composition  
des appellations utilisées lors des  
travaux de photointerprétation**

Sous-types de composition	Appellation utilisées lors des travaux de photointerprétation
<b>FI</b>	BB FI PE
<b>FT</b>	BJ FT FTFI
<b>MFI</b>	BBR FIR PER PLAN
<b>MFT</b>	BJR FTR
<b>MR</b>	EF RBB RBJ RFI RFT RPE
<b>R</b>	CC CR EE ER MER PG PGR PLAN PU PUR SR SS