

Avis scientifique sur  
l'impact des  
changements  
climatiques sur les forêts  
de l'Outaouais et  
l'adaptation du secteur  
forestier

Travail exécuté pour la

**Commission régionale sur les ressources  
naturelles et le territoire public de l'Outaouais**



## Synthèse

Synthèse réalisée par

Annie Montpetit

Frédéric Doyon

&

Dominic Cyr



Institut des Sciences  
de la Forêt tempérée



En collaboration avec



30 novembre 2012

## Remerciements

Nous tenons à remercier Travis Logan et Diane Chaumont du Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques pour leur collaboration importante dans l'évaluation de l'exposition aux conditions climatiques futures.

Plusieurs des réflexions qui sont apportées dans ce travail émergent non seulement des efforts associés à celui-ci mais aussi des travaux exécutés dans le cadre du programme de recherche du professeur Frédéric Doyon sur les vulnérabilités et l'adaptation aux changements climatiques du secteur forestier, réalisé en collaboration avec la Collectivité Forestière du Projet le Bourdon (Mont-Laurier, Qc).

Il serait aussi injuste de ne pas reconnaître la contribution provenant des échanges effectués dans le cadre de la Communauté de Pratiques sur les Vulnérabilités et l'Adaptation aux changements climatiques, instaurée par le Conseil canadien des Ministres des Forêts.

Nous voulons tout particulièrement aussi remercier les trois réviseurs externes, soit Héloïse Legoff (Ministère des ressources naturelles), Stephen Yamasaki, (Ecoterra Solutions) et Virginie-Arielle Angers (UQAM) qui ont fait un travail d'évaluation très pertinent, contribuant ainsi significativement à l'amélioration de cette synthèse.

J'aimerais aussi remercier Pierre Labrecque, Sébastien Meunier et Paméla Garcia-Cournoyer pour leur commentaires constructifs sur le document et leurs suggestions pour en améliorer le contenu.

Ce projet est financé par le Programme de mise en œuvre de l'approche intégrée et régionalisée du ministère des Ressources naturelles (MRN), administré par la Commission régionale sur les ressources naturelles et le territoire public de l'Outaouais (CRRNTO).

### Citation

Doyon, F., A. Montpetit, & D. Cyr. 2012. Avis scientifique sur l'impact des changements climatiques sur les forêts de l'Outaouais et l'adaptation du secteur forestier. Rapport de l'Institut des Sciences de la Forêt tempérée (UQO), Ripon, Qc, Novembre 2012. 95 p. + 5 annexes

## Résumé

Les changements climatiques affecteront les communautés dépendantes des ressources et du territoire forestier via multiples mécanismes complexes, provoquant des bouleversements majeurs à l'échelle de la planète, du Québec mais aussi de l'Outaouais. Pour atténuer ces impacts et réduire la vulnérabilité du secteur forestier de l'Outaouais à l'égard des changements climatiques, il est impératif de réfléchir aux mesures d'adaptation et aux mesures de renforcement de la capacité adaptative à mettre en œuvre. Or, les possibilités d'adaptation sont multiples et il existe peu de connaissances sur la pertinence de ces options d'adaptation pour atténuer les impacts des changements climatiques sur le secteur socio-économique forestier propre à l'Outaouais. En effet, ces mesures doivent être appropriées pour les expositions d'impacts spécifiques à la région et tenir compte des obstacles, des barrières et des exigences en ressources humaines et financières qui seront requises pour leur mise en œuvre (GIEC 2007), dans un contexte d'optimisation de nos investissements en forêt.

Ce travail présente donc une synthèse de la littérature sur les impacts potentiels des changements climatiques spécifiques aux domaines bioclimatiques de l'Outaouais. Pour ce faire, une évaluation spécifique de l'exposition au climat futur pour la région de l'Outaouais a été réalisée en collaboration avec le consortium Ouranos afin de présenter des analogues climatiques actuels. Cette évaluation emploie les données des Modèles Régionaux du Climat.

Une évaluation des vulnérabilités appréhendées est par la suite réalisée, basée sur les enjeux de développement identifiés dans le Plan Régional de développement Intégré du Territoire et des Ressources. Ce croisement permet d'aboutir à un ordonnancement des impacts appréhendés prioritaires.

Parmi les impacts biophysiques potentiels les plus susceptibles de rendre vulnérable secteur forestier, on note :

- des conditions plus sèches pour les arbres durant leur saison de croissance ;
- une variabilité accrue dans les conditions climatiques, incluant des phénomènes plus intense telles les crues subites printanières;
- des perturbations naturelles et des évènements climatiques extrêmes plus fréquents.

Ces impacts auront des répercussions importantes sur l'aménagement forestier et la sylviculture, les opérations de récolte et l'accès au territoire pour la pratique des activités récréatives. Une stratégie d'adaptation est développée pour atténuer chacun de ces impacts prioritaires comprenant a) des mesures d'adaptation à appliquer sur la forêt et le territoire, b) des mesures de renforcement de la capacité adaptative des acteurs du secteur forestier et c) des mesures de surveillance pour accroître la vigilance. Finalement, une évaluation sommaire des coûts pour la mise en œuvre des ces trois stratégies d'adaptation est réalisée basée sur les ressources requises en expertise et en support financier.

## Table des matières

Remerciements .....	i
Résumé.....	ii
Table des matières .....	iii
Tables des figures .....	vi
Tables des tableaux.....	viii
1. Introduction générale au projet.....	1
Références .....	2
2. Revue de la littérature sur les impacts potentiels des changements climatiques pour la forêt outaouaise.....	3
Introduction .....	3
Cadre conceptuel et définitions.....	3
Méthode .....	5
Impacts des changements climatiques.....	5
a. Les régimes de feux de forêt .....	5
b. Impacts des insectes nuisibles et des maladies.....	9
c. Impacts sur la croissance et la productivité des forêts .....	14
d. Migration des espèces et biodiversité.....	16
e. Impacts sur la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes.....	18
f. Impacts socio-économiques des changements climatiques .....	19
Références .....	21
3. Exposition aux changements climatiques .....	26
Résumé .....	26
Mise en contexte .....	27
Méthode .....	27
a. Variables et indices climatiques retenus, considération de l'incertitude et horizon temporel	28
b. Projections de base - Température et précipitations.....	28
c. Indices composites, saisonnalité, durée et fréquence d'épisodes.....	29

d. Climat de référence et horizon 2055.....	30
Résultats - Normales (1971-2000) et projections climatiques (horizon 2055) pour l'Outaouais et l'est de l'Ontario.....	31
a. Température et indices thermiques.....	31
b. Précipitations.....	38
c. Indices composites, saisonnalité, et épisodes de météo extrême.....	44
d. Commentaire sur les épisodes de météo extrême. ....	52
Références .....	53
4. Impacts appréhendés prioritaires.....	55
Introduction.....	55
Méthodes.....	55
Résultats .....	56
a. Défi 1 : Des forêts et un secteur forestier qui contribuent à la lutte contre les changements climatiques .....	56
b. Défi 2 : Un milieu naturel productif et créateur de richesses diversifiées;.....	58
c. Défi 3 : Une gestion des ressources naturelles du territoire qui intègre les valeurs et les besoins de la population outaouaise et des communautés autochtones; .....	64
d. Défi 4 : Un aménagement du territoire qui assure la durabilité des écosystèmes;.....	65
Références .....	72
5. Revue de littérature sur les mesures d'adaptation.....	73
Introduction.....	73
Méthode .....	73
Références .....	80
6. Sélection des mesures d'adaptation prioritaires .....	82
Introduction.....	82
Méthode .....	82
a. La sélection des mesures d'adaptation .....	82
b. L'évaluation des expertise et des ressources nécessaires à la mise en œuvre des mesures d'adaptation .....	83
Résultats .....	84

a. La sélection des mesures d'adaptation .....	84
b. L'évaluation des expertises et des ressources nécessaires à la mise en œuvre des mesures d'adaptation .....	90
Références .....	94
7. Annexes .....	95

## Tables des figures

Figure 1.	Processus d'évaluation suivi dans le cadre de cette étude.....	2
Figure 2.	Matrice de vulnérabilité basée sur l'importance des impacts et la capacité d'adaptation du système impacté.....	4
Figure 4.	Positionnement relatif des espèces d'arbres selon leur degré d'adaptation au feu. ....	7
Figure 5.	Évaluation du rôle de la composition forestière ( <b>maintien vs. migration sans contrainte</b> ) dans le changement du régime de feu sous changement climatiques pour la période 2071-2100.....	8
Figure 6.	Cartes du taux de croissance de la population de TBE par rapport à la distribution des espèces d'arbres hôtes en Amérique du Nord. Le scénario (a) représente la distribution sous le climat actuel (normales de 1971 à 2000) alors que le (b) illustre la distribution sous les projections du climat (2041-2070), sans considération de la répartition des espèces d'arbres hôtes. Pour (c) et (d), ce sont les taux de croissance modifiés par le % de couvert en espèces d'arbres hôtes, sous le même climat que (a) et (b) (Régnière et al. 2012). ....	12
Figure 7.	Zone de régulation de la spongieuse aux États-Unis (2006, zone gris pâle) et au Canada en 1974 (zones hachurée foncée, au sud de Montréal), 1989 (zone hachurée moyenne), et 2006 (zone hachurée pâle) (Régnière et al. 2009).....	13
Figure 8.	Simulation des changements de répartition de l'érable à sucre ( <i>Acer saccharum</i> ) (a) et du frêne d'Amérique ( <i>Fraxinus americana</i> ) (b) en 2100 par rapport à leur répartition actuelle (Morin & Chuine 2007) .....	17
Figure 9.	Température annuelle moyenne.....	32
Figure 10.	Température annuelle quotidienne a) maximale et b) minimale .....	33
Figure 11.	Température maximale quotidienne a) en été (moyenne estivale; juin, juillet et août) et b) en hiver (moyenne hivernale; décembre, janvier et février) .....	34

Figure 12. Température minimale journalière a) en été (moyenne estivale; juin, juillet et août) et b) en hiver (moyenne hivernale; décembre, janvier et février) .....	35
Figure 13. Degré-jours de croissance annuel et durée de la saison de croissance. ....	36
Figure 14. Degré-jours de gel annuel pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais. ....	37
Figure 15. Précipitations annuelles (mm) actuelles et projetées pour la région de l'Outaouais. ....	39
Figure 16. Précipitations estivales (juin, juillet et août) et hivernales (décembre, janvier, février). ....	41
Figure 17. Précipitations sous forme de neige (équivalent en mm d'eau) .....	42
Figure 18. Indice de sécheresse annuelle projeté pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais. ....	44
Figure 19. Indice de sécheresse projeté pour les mois de juillet et d'août pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais. ....	45
Figure 20. Variation saisonnière de la probabilité d'observer un indice de sécheresse d'un niveau modéré (200), élevé (300) et très élevé (400) pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais. ....	46
Figure 21. Fréquence annuelle des épisodes de gel/dégel pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais. ....	47
Figure 22. Distribution annuelle des probabilités d'observer une journée avec un épisode de gel-dégel pour la région de l'Outaouais. ....	48
Figure 23. Distribution de fréquence des épisodes de chaleur intense ( $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) entre 1971 et 2000, ainsi que pour l'horizon 2055 pour la région de l'Outaouais. ....	49
Figure 24. Distribution de fréquence des épisodes de froid intense ( $T_{\max} < -30^{\circ}\text{C}$ ) entre 1971 et 2000, ainsi que pour l'horizon 2055 pour la région de l'Outaouais. ....	50
Figure 25. Distribution de fréquence des épisodes de sécheresse (Précip. < 1 mm) entre 1971 et 2000, ainsi que pour l'horizon 2055 pour la région de l'Outaouais. ....	51



## Tables des tableaux

Tableau 1. Tableau synthèse des projections des variables climatiques pour l'horizon 2040-2070 pour la région de l'Outaouais .....	43
Tableau 2 . Attributs qui confèrent de la résilience à un système .....	75
Tableau 3 . Mesures d'adaptation de suivi/surveillance/monitoring .....	76
Tableau 4 . Mesures d'adaptation visant un changement de pratique et/ou procédure concernant les impacts associés aux feux de forêt, aux épidémies d'insectes et de maladies et au changement de la croissance et la productivité .....	77
Tableau 5 . Mesures d'adaptation visant un changement de pratique et/ou procédure concernant les impacts associés aux phénomènes météorologiques extrêmes de forêt, à la migration des espèces et biodiversité et aux impacts socio-économiques .....	78
Tableau 6. Mesures d'adaptation visant à renforcer la capacité d'adaptation .....	80
Tableau 7. Estimation des expertises et des ressources financières requises pour la mise en oeuvre des stratégies d'adaptation associée à l'impact potentiel appréhendé prioritaire I <sup>1</sup> .....	91
Tableau 8. Estimation des expertises et des ressources financières requises pour la mise en oeuvre des stratégies d'adaptation associée à l'impact potentiel appréhendé prioritaire II .....	92
Tableau 9. Estimation des expertises et des ressources financières requises pour la mise en oeuvre des stratégies d'adaptation associée à l'impact potentiel appréhendé prioritaire III.....	93

## 1. Introduction générale au projet

Les derniers rapports du GIEC démontrent sans équivoque que des changements climatiques importants se produiront au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, et cela à une vitesse sans précédent dans l'histoire connue de l'écosystème terrestre (GIEC 2007, Pachauri & Reisinger 2008), rendant la population humaine vulnérable du point de vue de la sécurité civile, de la santé et de ses activités socio-économiques. Déjà, les changements climatiques occasionnent des pertes importantes sur le PIB mondial (DARA and Climate Vulnerable Forum 2012). Les changements climatiques auront des impacts sur les écosystèmes forestiers et le secteur d'activités qui en dépend en raison de l'étroite relation qui existe entre les processus liés à la forêt et au climat (Johnston *et al.* 2010). En fait, la forêt est dans un équilibre dynamique avec le climat et les perturbations naturelles, elles-mêmes liées à ce dernier. Dès lors, en modifiant les conditions climatiques telles que la température et les précipitations, plusieurs relations forêt-climat s'en trouveront perturbées, tant à l'échelle des organismes vivants individuels, qu'à l'échelle du paysage. Cette rupture aurait des conséquences importantes sur les rôles multiples que joue la forêt, que ce soit au niveau des écosystèmes ou au niveau de la valeur économique et sociale associée aux forêts.

Le climat est un régulateur écologique central dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers, et compte tenu de la complexité des relations multiples impliquant le climat, la réponse à des changements du climat demeure difficilement prévisible. De plus, beaucoup de ces réponses réagissent avec délai et dépendront ainsi non seulement de l'ampleur des changements climatiques mais aussi de la vitesse à laquelle ceux-ci se produisent. Néanmoins, afin de réduire les risques que représentent les changements climatiques sur les forêts et ses fonctions pour le bien-être des humains, il demeure important d'en évaluer les impacts potentiels sur les écosystèmes forestiers et d'anticiper leurs effets afin de développer des stratégies d'adaptation.

La présente étude vise à réaliser un tel exercice d'évaluation pour le secteur forestier de l'Outaouais. Nos objectifs sont donc 1) d'évaluer quels seront les impacts potentiels appréhendés des changements climatiques qui présentent les risques les plus importants compte tenu de visées régionales de mise en valeur du territoire et 2) de proposer des mesures d'adaptation en matière d'aménagement et de pratiques forestières en vue d'en atténuer les impacts. Pour atteindre ces objectifs, nous suivons le processus d'évaluation présenté en Figure 1. Dans un premier temps, une revue de la littérature permet de recenser parmi les écrits scientifiques les impacts potentiels appréhendés pour la forêt outaouaise. Les probabilités de réalisation de ces impacts potentiels sont ensuite évaluées en fonction de l'exposition aux conditions climatiques futures régionales, tel qu'exprimé par l'Atlas québécois des Changements climatiques (Logan *et al.* 2011). Par la suite, chacun des orientations/enjeux de développement pour le secteur forestier du PRDIRT est évalué sur la base 1) des risques que les impacts des changements climatiques les plus probables viennent mettre en péril l'atteinte de ceux-ci et 2) de l'importance des impacts qui en découlent sur les activités socio-économiques du secteur. Le croisement de ces informations permet alors d'identifier les impacts potentiels prioritaires. Une deuxième revue de la littérature vient recenser les mesures d'adaptation qui ont été préconisées jusqu'à présent ainsi que leur justification (quel impact est atténué). Finalement, sur la base des impacts potentiels prioritaires, des

mesures d'adaptation sont sélectionnées puis cette sélection est validée par un panel d'experts externes au projet. Une évaluation sommaire des ressources humaines et financières requises ainsi que les barrières potentielles à leur mise en œuvre est finalement présentée.

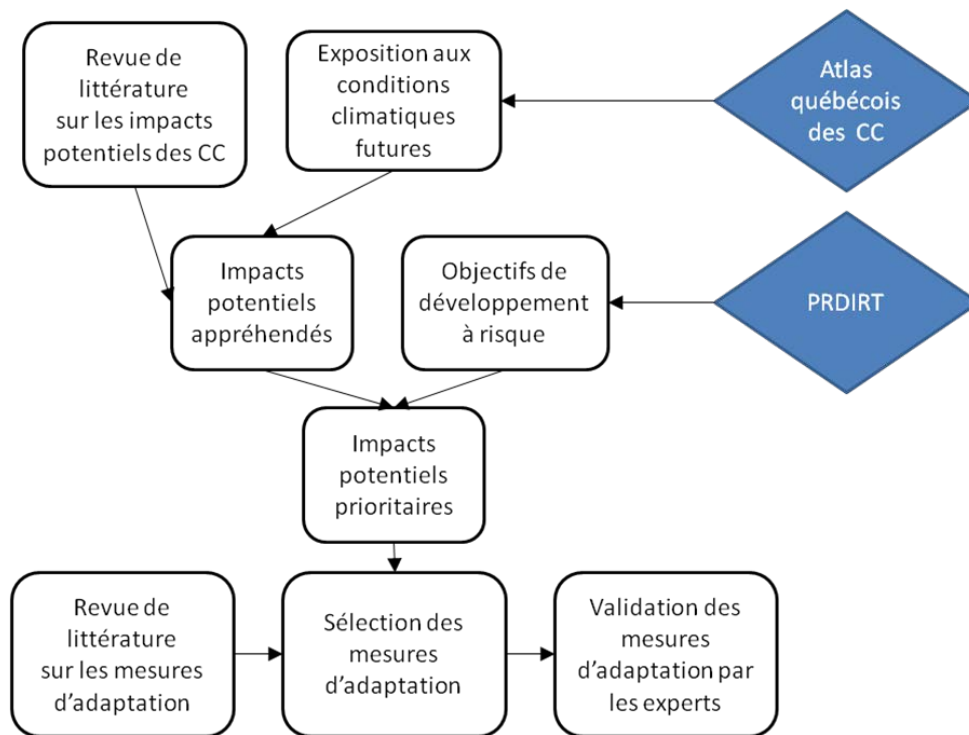


Figure 1. Processus d'évaluation suivi dans le cadre de cette étude.

## Références

DARA and Climate Vulnerable Forum 2012. Climate Vulnerability Monitor 2nd Edition. A Guide to the Cold Calculus of A Hot Planet. Madrid, Espagne. ISBN: 978-84-616-0567-5, 342p.

Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC). 2007. Résumé à l'intention des décideurs. In: Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

Johnston, M., Williamson, T., Munson, A., Ogden, A., Moroni, M., Parsons, R., 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.*

Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., et Houle, D. 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. [http://www.ouranos.ca/media/publication/162\\_AtlasForet2011.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011.pdf)

Pachauri, R., et Reisinger, A. (2008). Changements Climatiques 2007: Rapport de Synthèse. Rapport GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

## **2. Revue de la littérature sur les impacts potentiels des changements climatiques pour la forêt outaouaise**

### ***Introduction***

En dépit du fait que plusieurs études sur les impacts potentiels des changements climatiques sur les forêts du Québec et du Canada ont été conduites jusqu'à ce jour, peu d'études se sont penchées sur les impacts à l'échelle régionale. La présente revue de littérature vise donc, dans un premier temps, à faire le point sur les impacts potentiels des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers ayant des caractéristiques similaires aux forêts de l'Outaouais. Tel que mentionné dans le PRDIRT, on distingue cinq domaines bioclimatiques sur le territoire de l'Outaouais. Du sud au nord, le premier que l'on retrouve est l'érablière à caryer (3% du territoire), suivi par l'érablière à tilleul (29% du territoire). Le plus important est le domaine de l'érablière à bouleau jaune (43% du territoire). Enfin, 23% du territoire est occupé par la sapinière à bouleau jaune et 3%, par la sapinière à bouleau blanc (MRNF, 2006). Par conséquent, pour les besoins de cette étude, nous nous en tiendrons à une revue de littérature sur les effets des changements climatiques dans la forêt feuillue tempérée (les érablières et la sapinière méridionale). Les études portant sur les forêts du nord-est des États-Unis, de l'est de l'Ontario et du sud-ouest du Québec ont donc été privilégiées.

### ***Cadre conceptuel et définitions***

L'évaluation des vulnérabilités et de l'adaptation aux changements climatiques implique la compréhension des interdépendances et des multiples interrelations des systèmes écologiques, sociaux et économiques, organisés dans des structures hiérarchiques, s'exprimant à différentes échelles spatiales et temporelles (Figure 2). En effet, la vulnérabilité est le degré de capacité d'un système de faire face ou non aux effets néfastes du changement climatique et son évaluation demande de comprendre autant les impacts des changements climatiques que la capacité d'adaptation de la communauté (Füssel et Klein 2006, CCFM-CCTF 2010). L'importance des impacts dépendra autant de l'exposition que de la sensibilité du système exposé (Figure 2). L'exposition exprime la nature et le degré d'exposition d'un système à des variations climatiques significatives (éléments de forcing) alors que la sensibilité est le degré d'affectation positive ou négative d'un système par des stimuli liés au climat [ou autres en découlant] (GIEC 2001) (Figure 2). Ainsi, même un impact faible pourra rendre une communauté vulnérable si sa capacité d'adaptation est faible (Figure 3). La capacité d'adaptation s'exprime par les caractéristiques internes au système qui lui confère une capacité d'ajustement face aux changements climatiques. Cette capacité se traduit par l'adaptation, soit un ensemble d'actions entreprises pour en vue d'atténuer les impacts, d'exploiter les opportunités, ou de faire face aux conséquences des changements climatiques. Dans cette dynamique de système couplé, il est possible d'observer des effets, directs ou indirects, sur les communautés locales, venant des chaînes causales à plusieurs niveaux et pouvant être cumulés ou amplifiés par des rétroactions entre les systèmes humains

et naturels. Certaines de ces rétroactions peuvent être perverses, c'est-à-dire, il serait possible qu'en voulant corriger un problème on n'en arrive à en créer un nouveau, pouvant mener plutôt à un aggravement des effets ; c'est ce qu'on appelle la maladaptation (Frankhauser et al. 1998). Des dynamiques montrant de telles propriétés sont caractéristiques des systèmes complexes (Parrott et Meyer 2012) et justifient le cadre analytique proposé à la problématique de l'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation (V&A) aux changements climatiques.

Matrice de Vulnérabilité		Capacité d'adaptation		
		Haute	Modérée	Faible
Impacts	Haute			Haute
	Modérée		Moyenne	
	Faible	Basse		

$$\text{Impacts} = f(\text{exposition, sensibilité})$$

Figure 2. Matrice de vulnérabilité basée sur l'importance des impacts et la capacité d'adaptation du système impacté.

Ainsi, pour la suite de ce document, nous référons aux définitions suivantes :

Concept	Définition <sup>1</sup>
<b>Exposition</b>	Nature et degré d'exposition d'un système à des variations climatiques significatives
<b>Sensibilité</b>	Degré d'affectation positive ou négative d'un système par des stimuli liés au climat. L'effet peut être direct (modification du rendement des peuplements en réponse à une variation de la moyenne, de la fourchette, ou de la variabilité de température, par exemple) ou indirect (perturbations naturelles dont la fréquence, l'intensité, la sévérité varient en raison de leur propre sensibilité au climat, par exemple).
<b>Vulnérabilité</b>	Degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité est fonction du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques, ainsi

<sup>1</sup> Les définitions sont extraites du glossaire du troisième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (<http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipccterms-fr.pdf>) ainsi que sur le cadre de travail du Conseil canadien des ministres des forêts intitulé *Climate change and sustainable forest management in Canada : A framework for assessing vulnerability and mainstreaming adaptation into decision making* (version préliminaire février 2011)

	que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation.
<b>Adaptation</b>	Ensemble des actions entreprises pour combattre les impacts et risques associés aux changements climatiques, ainsi que celles entreprises pour augmenter la probabilité d'impacts positifs (opportunités) et des bénéfices en découlant. On distingue divers types d'adaptation, notamment l'adaptation anticipée et réactive.
<b>Capacité d'adaptation</b>	Capacité d'ajustement d'un système face aux changements climatiques, y compris à la variabilité climatique et aux phénomènes extrêmes, afin d'atténuer les effets potentiels, d'exploiter les opportunités, ou de faire face aux conséquences.

## **Méthode**

Le recensement de la littérature s'est limité aux impacts du changement de régime des feux de forêts, et des épidémies d'insectes défoliateurs, des dommages pouvant être causés par les pestes (insectes ou maladies, soit endémiques qui pourraient devenir épidémiques, soit exotiques), du climat sur la croissance des arbres et la productivité des peuplements, de la migration des espèces et de son effet sur la biodiversité, des phénomènes météorologiques extrêmes, et enfin, des impacts socio-économiques. Afin de réaliser cette revue, les publications d'organismes gouvernementaux ont d'abord été consultées. Suite à la lecture de ces ouvrages, les principaux auteurs pour chaque type d'impact potentiel ont été identifiés, puis leurs travaux respectifs, consultés. En somme, la sélection des ouvrages pertinents s'est effectuée selon la méthode boule-de-neige, c'est-à-dire la consultation de documents de base (revue, synthèse) nous suggère des références qui, à leur tour, nous en suggère d'autres.

Des contacts privilégiés avec la communauté scientifique œuvrant dans le domaine des sciences des impacts des changements climatiques a permis aussi de compléter avec l'état, mis à jour, des travaux actuels sur le sujet. Ces informations seront ajoutées sous forme de communication personnelle avec les chercheurs impliqués.

## **Impacts des changements climatiques**

### **a. Les régimes de feux de forêt**

Un régime de feu de forêt est caractérisé par 6 composantes qui déterminent la dynamique et l'évolution du régime : la saison, la fréquence, la taille, l'intensité, la sévérité et l'origine du feu (Flannigan *et al.* 2000). Les changements climatiques sont susceptibles d'entraîner des modifications au sein de chacune de ces composantes, qui, une fois modifiées, seraient susceptibles d'avoir des répercussions sur les autres composantes du régime. Dans cette perspective, les impacts potentiels des changements sur le régime des feux supposent une interaction entre des éléments interdépendants, ce qui rend l'évaluation des répercussions encore plus complexe. Les impacts potentiels des changements climatiques sur chaque composante d'un régime de feu seront donc abordés en lien avec les facteurs qui influencent leur dynamique.

### *Saison*

La saison à laquelle un feu prend naissance a un impact décisif sur les trajectoires de succession post-incendies (Krezek-Hanes *et al.* 2011) et dans la même mesure, influence l'intensité du feu et la capacité de régénération de la forêt. Les changements climatiques pourraient créer un allongement de la saison des incendies de forêt, ce qui suppose que les feux pourraient débuter plus tôt au printemps et se terminer plus tard à l'automne (Wotton et Flannigan 1993 (dans Flannigan *et al.* 2000)). Une telle modification dans la saisonnalité pourrait grandement affecter la régénération des peuplements. Par exemple, un feu de faible intensité qui se produit au printemps, avant le débourrement, peut entraîner la mortalité chez le peuplier faux-tremble et le bouleau (de Groot *et al.* 2003 dans Krezek-Hanes et coll., 2011).

### *Fréquence*

Sur le plan de la fréquence des feux, il faut d'abord souligner qu'un incendie est le résultat d'une interaction complexe entre le combustible, la topographie, l'agent d'allumage et la température (Flannigan *et al.* 2000). Parmi ces facteurs, on peut d'ores et déjà avancer que les conditions climatiques et météorologiques ont l'influence la plus importante sur un régime de feux de forêt (Flannigan et Wotton 2001). Les conditions climatiques influencent l'humidité du combustible, l'allumage par la foudre et contribuent à la croissance du feu par l'action du vent. On suppose donc que la hausse des températures attendue pourrait entraîner une hausse de la fréquence des feux. Toutefois, les répercussions de ce réchauffement sur le régime des feux pourraient varier d'une région à l'autre. En effet, bien qu'une hausse de la fréquence des feux de forêts soit attendue dans l'ouest canadien, le Québec et l'est du Canada pourraient toutefois voir la fréquence de ses feux diminuer (Stock *et al.* 1998). Ces disparités seraient principalement dues à une augmentation des précipitations qui compenserait largement la hausse des températures. Il faut aussi ajouter que la modification de la fréquence des incendies pourrait être variable au Québec. En effet, alors qu'elle augmenterait dans le nord de la province, elle pourrait diminuer ou demeurer constante dans le sud et l'ouest (Bergeron *et al.* 2004).

### *Taille, intensité et sévérité*

Pour la superficie des feux de forêts, Flannigan *et al.* (2005) estiment qu'il y aurait une augmentation de la superficie brûlée due aux changements climatiques. Leur analyse, basée sur un scénario qui suppose une augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> trois fois supérieure au niveau actuel, prévoit une hausse de 74 à 78% de la superficie incendiée au Canada. Toutefois, tout comme pour la fréquence des feux, il y aura des variations entre les régions. Pour le Québec, les résultats anticipent une hausse de la superficie brûlée plus prononcée dans le centre du Québec par rapport au sud de la province. Quant à la sévérité du feu, elle est dépendante de la qualité et de la quantité du combustible brûlé et se mesure par la profondeur de brûlage. La hausse de la sévérité des feux pourrait avoir des conséquences importantes sur la structure des écosystèmes et son fonctionnement en raison de son impact direct sur les racines souterraines des plantes et des tissus reproductifs, et des populations microbiennes au sol (McLean 1969; Greene *et al.* 2007 dans Krezek-Hanes *et al.* 2011). La taille des incendies a aussi un effet sur la structure du paysage en influençant les distances sur lesquelles aura lieu la dispersion des graines par les espèces

pour la régénération. Enfin, l'augmentation de l'intensité du feu pourrait affecter certaines essences qui, comme le pin rouge (Flannigan et Bergeron 1998), dépendent de feu de faible intensité pour se régénérer, alors que les feux de cime intenses causent la mortalité chez l'espèce.

La Figure 4 présente les différentes espèces d'arbres selon leur gradient d'adaptation au feu tel que présenté par Doyon (2002). On constate que plusieurs espèces adaptées aux feux sont abondantes dans l'Outaouais, tant pour les résineux (pin gris, pin rouge, épinette noire, pin blanc) que chez les feuillus (chêne rouge, peupliers, bouleau blanc, érable rouge, cerisier de Pennsylvanie). Cependant, certaines espèces sont, à l'inverse, plus sensibles au feu (érable à sucre, hêtre, pruche, sapin baumier). Ainsi, une augmentation de l'importance des feux dans le paysage de l'Outaouais est susceptible de produire un changement important dans la composition vers les espèces mieux adaptées.

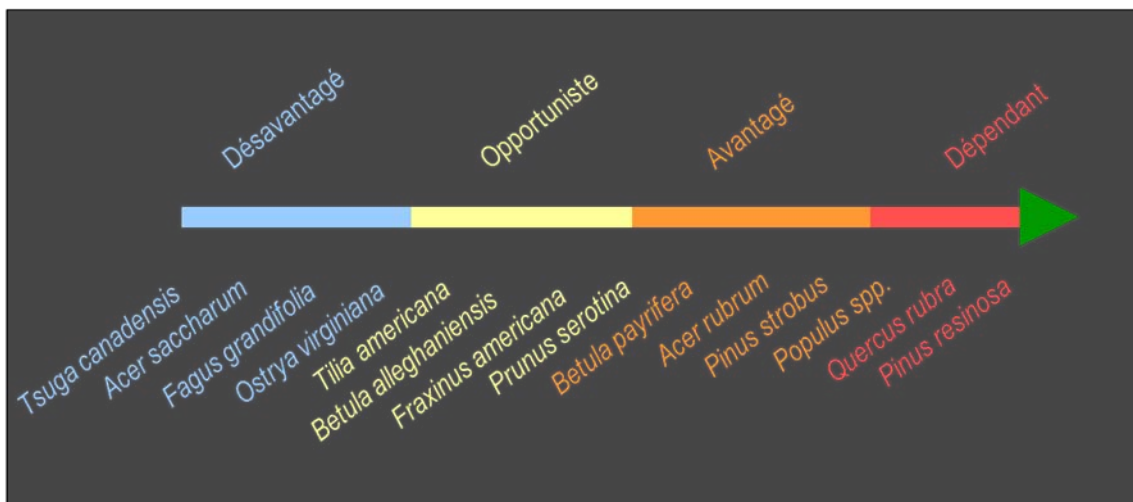


Figure 3. Positionnement relatif des espèces d'arbres selon leur degré d'adaptation au feu.

Cependant, comme le feu est très conditionné par le combustible, l'augmentation de la composante de feuillus associés à la migration de la végétation pourra contrecarrer ces conditions climatiques plus propices au feu. En effet, les récents travaux de Terrier *et al.* (2012) montrent que, pour la forêt boréale, l'augmentation de la fréquence des feux de grandes superficies sera contrecarrée par le changement de la composition des forêts qui deviendront moins inflammables avec l'augmentation des feuillus (Figure 5). Par contre, pour la région de l'Outaouais, les modèles suggèrent une augmentation importante des feux par rapport à actuellement, particulièrement en ce qui concerne les feux de grandes superficies (Figure 5). Cependant, l'effet compensatoire de la migration des espèces observé pour la forêt boréale ne se matérialise pas probablement car la région est déjà à forte composante de feuillus.



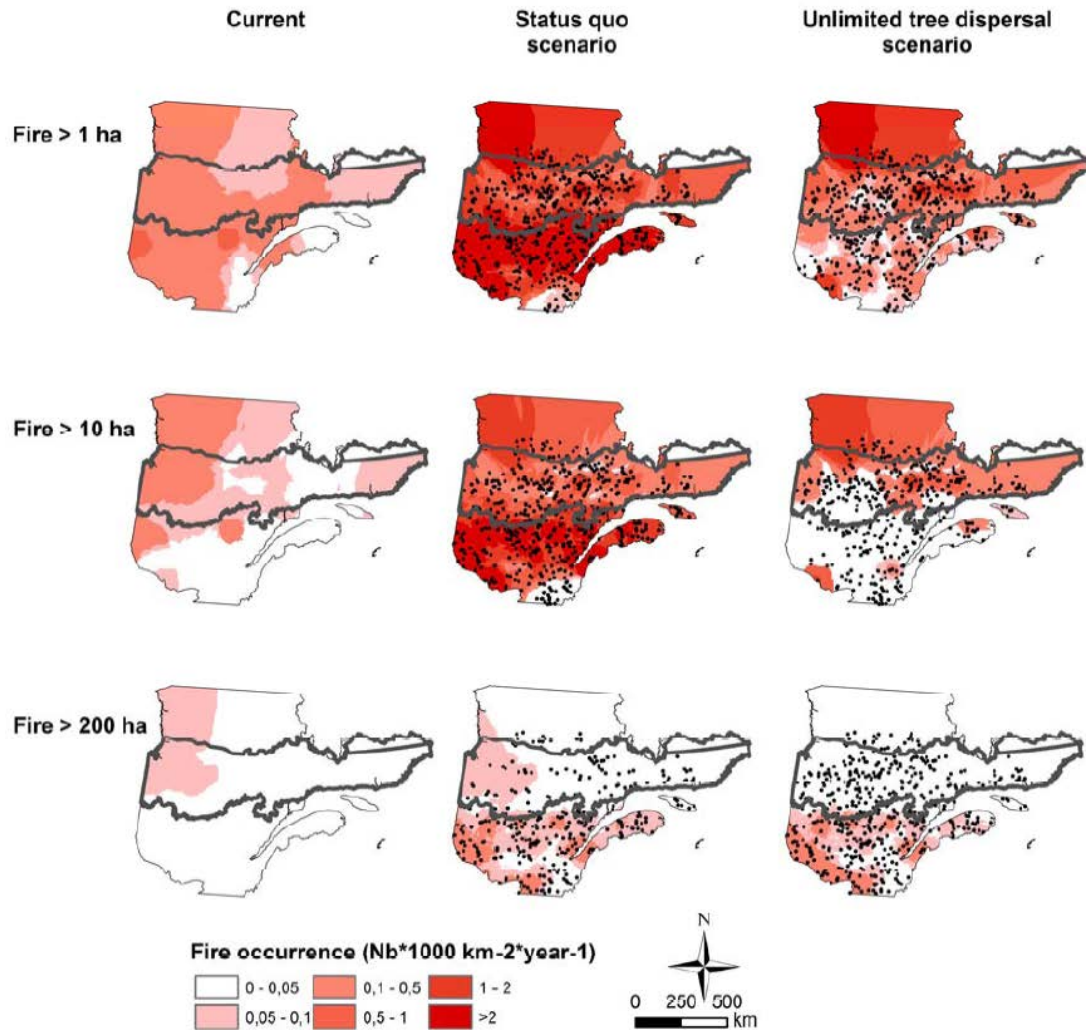


Figure 4. Évaluation du rôle de la composition forestière (**maintien vs. migration sans contrainte**) dans le changement du régime de feu sous changement climatiques pour la période 2071-2100. **Les auteurs mettent néanmoins en garde l'utilisation de cette figure pour la partie méridionale du Québec car ils n'ont pas ajusté la composition du sud à partir d'espèces actuellement exotiques au Québec (Terrier *et al.* En impression).**

#### Origine du feu

La foudre est le résultat de conditions météorologiques favorables conjuguées, c'est-à-dire d'une instabilité atmosphérique, d'un taux d'humidité élevé et d'agents élevateurs (topographie). En outre, l'allumage des feux causés par la foudre dépend aussi de l'humidité contenue dans la couche organique de la litière où un feu peut être contenu jusqu'à ce que le combustible de surface soit assez sec pour permettre la propagation du feu en surface (Wotton *et al.* 2003). Morrissette et Gauthier (2008) observe que l'activité de foudre est plus importante dans le sud que dans le nord du territoire québécois.

Cependant cette activité de foudre ne se traduit pas forcément en en termes d'allumage, car la forêt est moins inflammable en raison de sa composante feuillue plus importante, et de superficie brûlées car la protection contre les feux est meilleure dans le sud. Price et Rind (1994) prévoient une hausse de 44% des feux causés par la foudre, occasionnant une hausse de 78% de la superficie brûlée sous un scénario 2xCO<sub>2</sub>. Quoiqu'il soit difficile de prédire quelle sera la fréquence de telles cellules atmosphériques instables sous changements atmosphériques, il est reconnu qu'avec les changements climatiques, les systèmes atmosphériques seront plus « nerveux », avec plus d'énergie. Jusqu'à présent, le sud-ouest du Québec a été plus sujet à de telles cellules instables ayant généré des tempêtes de vents importantes (Bégin 2011). Des travaux récents en modélisation climatologique montrent que la fréquence et la sévérité des évènements convectifs seront plus fortes (Paquin *et al.* 2012) et que ce phénomène sera plus important en zones continentales que côtières (D. Paquin, communication personnelle). Comme l'Outaouais se trouve à la convergence du système climatique de l'Arctique et des Grands Lacs, cette zone sera appelée à être plus fortement touchée par une telle augmentation des cellules convectives orageuses (D. Paquin, communication personnelle). Cela pourra entraîner une augmentation de la production de foudre et des vents, favorisant ainsi l'assèchement du combustible, l'initiation et la dispersion des feux.

### *Impacts régionaux*

Au niveau des disparités régionales, on suppose que les impacts des changements climatiques sur le régime des feux risquent d'affecter, dans une plus grande mesure, les forêts boréales du nord du Québec. En outre, les forêts feuillues et mixtes du sud de la province risquent d'être moins affectées par ces impacts, car les essences feuillues sont moins inflammables et leur débris ligneux sont de moins bons combustibles que ceux des essences résineuses. Brown *et al.* (2009) abondent dans le même sens en mentionnant que les forêts feuillues du sud de l'Ontario sont moins susceptibles d'être affectées par les feux de forêt. Il semble donc que pour l'est du Canada, les impacts des changements climatiques sur le régime des feux de forêt risquent d'être moins importants au sud de la région qu'au nord de celle-ci. Néanmoins, il est important de contextualiser cette information à la région de l'Outaouais. L'Outaouais est une région qui déjà reçoit relativement peu de précipitations au Québec (autour de 900 mm/an). Ainsi, pour le biome de la forêt tempérée, cela en fait une région relativement plus sujette aux feux (Drever *et al.* 2005). On peut donc penser que la fréquence du régime de feu sera augmentée sous le climat futur (Bergeron *et al.* 2006, Drever *et al.* 2008, Terrier *et al.* en impression (Figure 5)).

### **b. Impacts des insectes nuisibles et des maladies**

Les insectes, les pathogènes et les parasites font partie intégrante des écosystèmes forestiers. Ils jouent notamment un rôle sur la structure et la fonction de ces derniers. La grande majorité des espèces qui s'alimentent sur les arbres sont inoffensives, et parfois même, bénéfiques pour la croissance et le développement de la forêt (Lemprière *et al.* 2008). Cependant, certaines espèces, qui peuvent développer des dynamiques épidémiques, sont susceptibles d'avoir des effets dévastateurs sur les arbres en se propageant sur de vastes étendues, en entraînant un retard de croissance et parfois même, la

mort. Les effets des changements climatiques sur les insectes forestiers peuvent être de trois natures : directs, en affectant la physiologie de l'insecte (mortalité, cycle et vitesse de développement), indirects, en agissant sur les hôtes (phénologie<sup>2</sup>, modification d'aire, stress hydrique) et/ou encore, affecter les interactions entre l'espèce considérée et ses compétiteurs et ennemis naturels (Roques et Robinet, 2005). Encore une fois, la température est une variable déterminante pour la survie et l'accroissement des populations d'insectes (Volney et Fleming 2000). De plus, d'autres variables, telles que les précipitations, l'humidité, la durée d'insolation ou la concentration en CO<sub>2</sub> sont à considérer en raison de leur influence sur les populations hôtes. Par conséquent, les changements climatiques peuvent affecter la distribution et l'abondance des insectes et des maladies.

### *Effets directs*

Une hausse des températures pourrait avantager le métabolisme de certains insectes (Ayres et Lombardo 2000), accélérer leur développement et leur reproduction (Daniel et Myers 1995, dans Forget *et al.* 2003). En effet, le taux de développement des insectes est directement influencé par la température (Boivin 2012). Des températures plus chaudes combinées à une baisse des précipitations pourraient donc mener à une augmentation de la défoliation et de la fréquence des épidémies pour certaines espèces (Fleming et Candau 1998) mais être défavorables pour d'autres (Régnière 2012). Qui plus est, un hiver plus clément augmenterait aussi le taux de survie des insectes, même si une diminution de l'épaisseur de neige pourrait en défavoriser certains (Ayres et Lombardero 2000). La dernière épidémie du dendroctone du pin (*Dendroctonus ponderosa*) dans l'ouest Canadien en est un exemple patent. Plus précisément, ce sont surtout les larves et les insectes à l'état adulte qui sont le plus susceptibles d'être avantagés par des conditions plus clémentes.

### *Effets indirects*

Malgré une hausse prévue de la fréquence des épidémies d'insectes, il faut souligner que le succès de certains insectes à s'établir sur un site au printemps dépend aussi de la synchronisation de leur développement avec celui de certains organes (tel les bourgeons) de leur hôte. Il s'agit d'un couplage phénologique intime dont la dynamique de la population dépend. Par exemple, pour la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*, TBE), la tordeuse du pin gris (*Choristoneura pinus*) et la livrée des forêts (*Malacosoma disstria*), cet effet indirect du climat semble critique à l'émergence d'une épidémie (Volney et Fleming 2000). Les gels tardifs du printemps peuvent notamment tuer les nouveaux bourgeons et par le fait même, priver les insectes de leur nourriture.

Un autre effet indirect qui peut être important en lien avec la dynamique des populations est le « décrochage trophique » (Boivin 2012). En effet, plusieurs populations d'insecte sont maintenues en équilibre via le contrôle des prédateurs et des parasitoïdes. Ces relations trophiques (prédateurs-proies-parasitoïdes) sont souvent régies par un synchronisme de développement et de comportement entre les acteurs de la relation. Comme chaque espèce a une réponse de développement qui lui est propre en fonction de la température (courbe de taux de développement), le différentiel de réponse lorsque la

---

<sup>2</sup> Événements périodiques saisonniers tels que la floraison, les migrations, la reproduction, etc. (Aber *et al.* 1995; Arora et Boer 2005).

température change occasionne un « décrochage », qui réduit l'efficacité du prédateur ou du parasitoïde à contrôler la population de l'insecte. Les chaînes trophiques qui sont impliquées dans le contrôle d'une population d'insecte comme la TBE ou la livrée des forêts sont extrêmement complexes et peuvent impliquer plus d'une centaine d'organismes différents, et comme ceux-ci peuvent être en interaction entre eux, la prédiction du changement dans le système trophique est extrêmement difficile (G. Boivin, comm. pers.).

La sécheresse, qui par la même occasion entraîne une hausse de la concentration de sucres dans le feuillage des hôtes (Scarr 1998 dans Forget *et al.* 2003), peut favoriser certains insectes. À l'opposé, il a été démontré qu'une baisse de la qualité nutritionnelle d'un feuillage peut être associée à l'effondrement d'une épidémie, comme c'est le cas pour la TBE (Fleming et Candau 1998).

Finalement, il est noté par Fleming *et al.* (2002) que l'augmentation du combustible disponible causée par mortalité massive d'arbres à la suite d'une épidémie d'insecte contribue indirectement à l'augmentation du risque d'incendies de forêt. On pourrait donc voir s'installer une boucle de rétroaction positive entre le feu et les épidémies d'insecte avec une augmentation des températures.

#### *Impacts régionaux*

La livrée des forêts (*Malacostoma disstria*) et la tordeuse du pin gris (*Choristoneura pinus*) sont des insectes défoliateurs qui causent des dommages considérables aux forêts. La livrée des forêts est d'ailleurs l'insecte le plus susceptible de causer des dommages aux forêts feuillues du Québec et s'attaque principalement au peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) et à l'érable à sucre (*Acer saccharum*) (Cooke et Lorenzetti 2006). Volney et Fleming (2000) ont estimé qu'il pourrait y avoir une augmentation de la fréquence des épidémies de livrée des forêts et de tordeuse du pin gris le long de la limite sud de leur aire de répartition en raison de la sécheresse causée par les changements climatiques. La région de l'Outaouais pourrait donc être touchée par de telles épidémies.

Le dendroctone du pin (*Dendroctonus ponderosea*) vient du sud de la côte ouest de l'Amérique du Nord et s'attaque principalement aux pins Ponderosa (*Pinus ponderosa*), d'où son nom en latin. Il est d'abord apparu au Canada dans les forêts de la Colombie-Britannique pour s'attaquer au pin tordu latifolié (pin lodgepole, *Pinus contorta*). Jusqu'à tout récemment, la rigueur des hivers dans les hauteurs des Rocheuses avaient empêché cet insecte de venir s'attaquer aux pins tordus latifoliés de l'Alberta. Or, lors de la dernière épidémie en Colombie-Britannique, il y a eu au même moment des hivers très doux dans les Rocheuses, permettant des débordements en Alberta. La barrière physique des Rocheuses ayant été traversée, plusieurs chercheurs pensent que l'insecte pourrait poursuivre sa progression vers l'est du Canada, en s'attaquant aux peuplements de pin gris (*Pinus banksiana*), qui a une aire de répartition presque ininterrompue entre l'ouest canadien et les forêts de l'Atlantique (Terre-Neuve & Labrador) (SCF 2007).

Du côté de la TBE, Gray (2008) prévoit qu'avec les changements climatiques, les infestations de cet insecte dureront plus longtemps et entraîneront davantage de défoliation dans sa zone actuelle. Précisons que la TBE est un défoliateur largement présent dans les forêts nord-américaines, s'étendant de l'Alaska à l'ouest aux maritimes à l'est. Les hôtes principaux de la TBE sont le sapin baumier (*Abies*

*balsamea*), l'épinette blanche (*Picea glauca*) et l'épinette rouge (*Picea rubens*). Cependant, contrairement à ce que Gray (2008) prévoit, Régnière *et al.* (2012) ont étudié l'effet du changement de climat sur la TBE et sont plutôt d'avis que les changements climatiques affecteront la distribution de l'insecte ; certaines régions in affectées par le passé le deviendront et vice-et-versa. La Figure 6 illustre d'ailleurs les effets du changement climatique sur la distribution de l'insecte au cours des prochaines décennies. Tel qu'il est possible de le constater, les modèles prédisent que la distribution de la TBE devrait migrer vers le nord au cours des 50 prochaines années; ainsi le réchauffement prévu du climat en Outaouais devrait causer une réduction de la prévalence des épidémies de TBE.

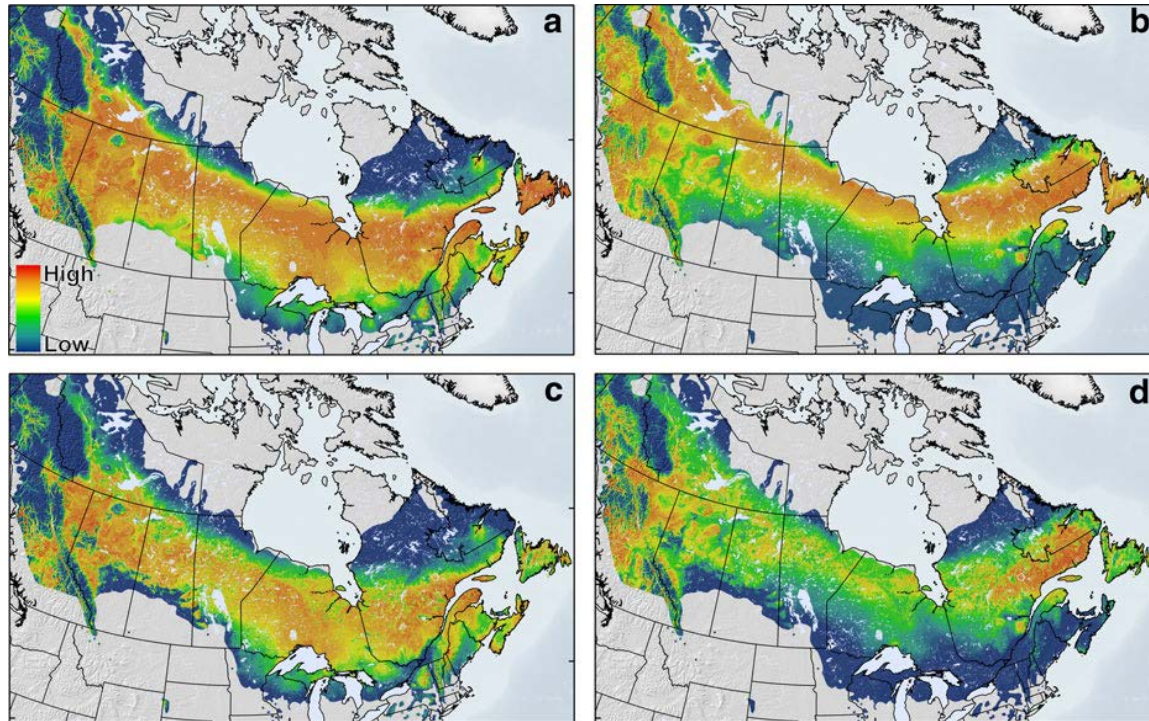


Figure 5. Cartes du taux de croissance de la population de TBE par rapport à la distribution des espèces d'arbres hôtes en Amérique du Nord. Le scénario (a) représente la distribution sous le climat actuel (normales de 1971 à 2000) alors que le (b) illustre la distribution sous les projections du climat (2041-2070), sans considération de la répartition des espèces d'arbres hôtes. Pour (c) et (d), ce sont les taux de croissance modifiés par le % de couvert en espèces d'arbres hôtes, sous le même climat que (a) et (b) (Régnière *et al.* 2012).

Enfin, la spongieuse (*Lymantria dispar*), qui est une espèce exotique envahissante apparue au Massachusetts à la fin des années 1980, continue sa progression vers le nord et pourrait donc s'étendre jusqu'au sud du Québec (Gray 2004). La Figure 7 illustre cette progression au niveau des zones de régulation, c'est-à-dire les régions pour lesquelles il est important d'établir une stratégie de monitoring et de contrôle. Malgré les efforts d'éradication des dernières décennies au Québec et en Ontario, la spongieuse continue à migrer vers le nord (Régnière *et al.* 2009). Cette migration est susceptible d'affecter les forêts situées en Outaouais. De plus, les espèces hôtes de prédilection pour la spongieuse

sont le chêne rouge (*Quercus rubra*) et le peuplier (*Populus* spp.), deux espèces très abondantes en Outaouais. Les récents travaux de Régnière (2012) confirment ce risque pour l'Outaouais.

Un scénario similaire est prévu pour le longicorne asiatique qui pourrait affecter les érables, les ormes et les bouleaux du sud du Québec (Gray 2004).

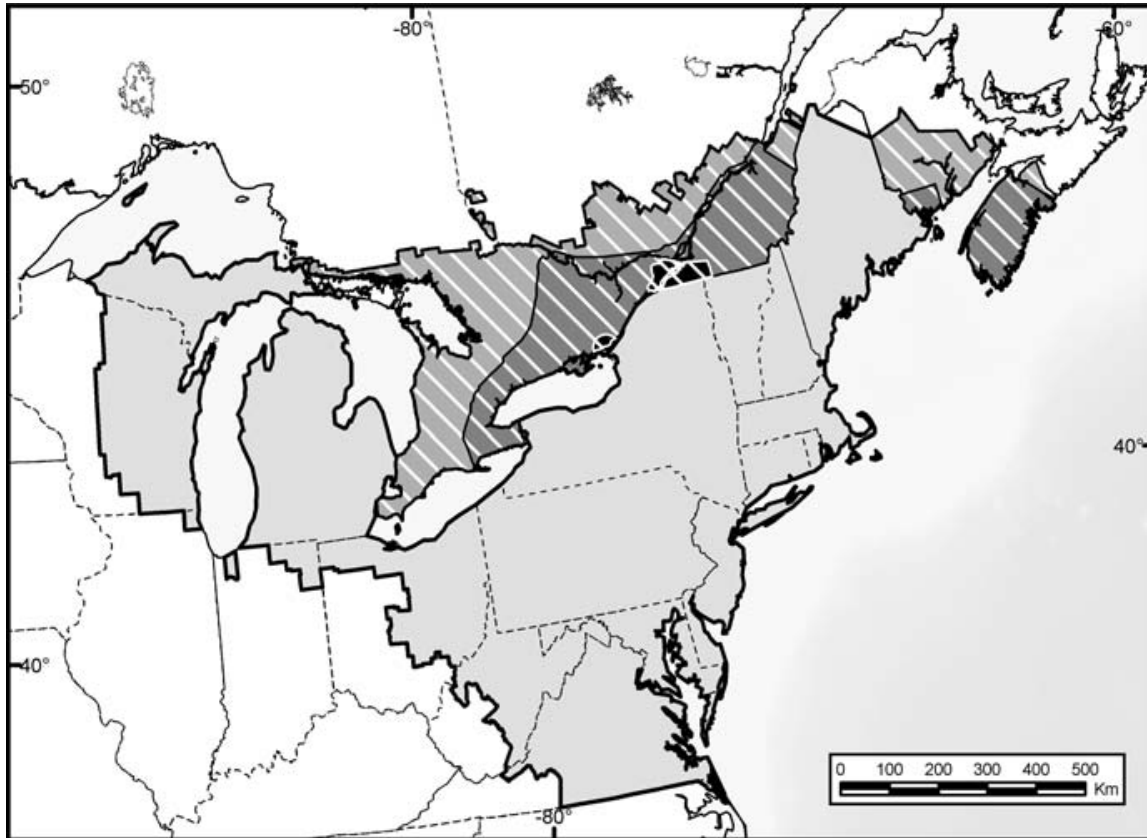


Figure 6. Zone de régulation de la spongieuse aux États-Unis (2006, zone gris pâle) et au Canada en 1974 (zones hachurée foncée, au sud de Montréal), 1989 (zone hachurée moyenne), et 2006 (zone hachurée pâle) (Régnière *et al.* 2009).

### *Les maladies*

Les maladies ont un fonctionnement et des interactions similaires à ceux des insectes; en affectant les arbres, elles peuvent avoir un effet très structurant sur les écosystèmes forestiers. Les maladies résultent de l'interaction entre les hôtes, les agents pathogènes (champignons, bactérie, virus) et de facteurs externes. Parmi ceux-ci, les facteurs climatiques ont des effets souvent importants, voire déterminants, dans les processus d'interaction (Desprez-Loustau *et al.* 2005).

Les facteurs du climat (température, humidité, rayonnement) affectent directement, d'une part, les champignons dans les différentes phases de leur développement (survie, croissance, reproduction,

dispersion) et d'autre part, exercent une influence sur la résistance et la tolérance de l'hôte (Desprez-Loustau *et al.* 2005). Par exemple, l'augmentation des températures pourrait influencer le taux de survie et le niveau de développement de certains organismes et parasites. L'augmentation de la contrainte hydrique est, quant à elle, plutôt défavorable pour les stades libres des champignons, mais les effets indirects via la physiologie de l'hôte (stress hydrique) favorisent certains parasites, plus particulièrement certains parasites corticaux, et diminuent de façon générale la tolérance des plantes aux infections (Desprez-Loustau *et al.* 2005). Il faut également souligner que bien que les pathogènes indigènes soient généralement bénins sur le fonctionnement de l'écosystème, les pathogènes exotiques peuvent, en revanche, débalancer l'équilibre forestier en modifiant les dynamiques de population, en réduisant le nombre d'individus d'une espèce et en changeant la structure et les voies privilégiées de succession des forêts (Lemprière *et al.* 2008). Pour juger de l'importance de tels impacts, on peut rappeler l'histoire de la brûlure du châtaignier américain (Chancre de l'écorce du châtaignier, *Cryphonectria parasitica*) qui est apparue à New York en 1905, d'où elle a contaminé et éliminé, en 50 ans, plus de 4 milliards d'arbres qui occupaient 1 million de km<sup>2</sup> dans la zone mésophytique de l'est des États-Unis (The American Chestnut Foundation : <http://www.acf.org>).

Un exemple plus récent de cela et touchant l'Outaouais est la maladie corticale du hêtre (MCH) qui est arrivée très récemment. Cette maladie est causée par une combinaison complexe entre un insecte (le kermès, un puceron) et un champignon (*Nectria coccinea*) (Le Guerrier *et al.* 2003 dans Yamasaki *et al.* 2008). La MCH a déjà des effets importants sur les forêts feuillues d'Amérique du Nord et demeure une source de préoccupation majeure. L'étude de Yamasaki *et al.* (2008) a permis de démontrer, par l'utilisation de modèles, que la MCH transformera la composition de la forêt feuillue de l'Outaouais de façon significative. Il semblerait qu'un scénario combinant les changements climatiques et la MCH pourrait accroître le taux de mortalité des hêtres plus âgés et favoriser la croissance des drageons des racines des hêtres infectés. Cette situation augmenterait l'importance de cette espèce par une boucle de rétroaction positive. Ces impacts pourraient éventuellement entraîner l'exclusion d'autres espèces. L'envahissement par le hêtre des érablières est un problème très criant au Québec (Duchesne *et al.* 2005) et particulièrement en Outaouais (Doyon et Gravel 2003). L'arrivée de la MCH et son expansion pourraient facilement exacerber le phénomène d'envahissement des forêts feuillues par le hêtre.

### c. Impacts sur la croissance et la productivité des forêts

La température, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère, la disponibilité des nutriments, de même que les précipitations constituent des facteurs qui ont une influence directe sur la croissance et la productivité des forêts (Reed *et al.* 1992; Graumlich 1993 dans Forget *et al.* 2003). Les changements climatiques pourraient, en modifiant ces facteurs, avoir des impacts considérables sur la croissance et la productivité des forêts.

#### *Hausse des températures*

Tout d'abord, l'augmentation des températures pourrait se traduire par un allongement de la saison de croissance. Cette variable correspond en fait au nombre consécutif de jours sans gel. Julien et Sobrino (2009) ont estimé qu'il y a eu une augmentation de la longueur de la saison de croissance de 0.8 jour par

année entre 1981 et 2004. Au niveau des projections prévues pour 2050, le modèle régional estime qu'il y aura des augmentations d'environ 25 à 30 jours (Logan *et al.* 2003 dans Desjarlais *et al.* 2010, Logan *et al.* 2011).

La prolongation de la saison de croissance due à la hausse de la température affectera la productivité primaire des forêts (Kirschbaum 2000). Selon Logan *et al.* (2003), la prédiction médiane de l'ensemble des modèles globaux montre une augmentation d'environ 300 à 400 degrés-jours de croissance (nombre de degrés-jours au-dessus de 5°C) pour la période 2041 à 2070 par rapport à la période 1971-2000. Cette augmentation dans le nombre de degrés-jours se traduira par une augmentation de la productivité. En effet, dans les modèles de prédiction de la croissance potentielle des espèces d'arbres du Québec développés par Périé *et al.* (2012), on détecte un effet positif des hausses de température sur la croissance des arbres sur un grand nombre d'espèces (bouleau à papier, épinette noire, érable rouge, pin gris, sapin baumier, peuplier faux-tremble, et le groupe des « Autres feuillus intolérants »). La seule espèce qui semble défavorisée par une augmentation de la température dans son aire actuelle de répartition est le bouleau jaune. Il est à noter que l'augmentation de température n'a pas été détectée comme significative pour expliquer les variations de croissance potentielle de l'érable à sucre, de l'épinette blanche, du thuya occidental, du groupe des « Autres feuillus tolérants », et du groupe des « Autres résineux tolérants ».

L'augmentation de la température pourrait aussi jouer un rôle dans la phénologie des arbres. On observe en outre un avancement des stades phénologiques de printemps, dû à l'augmentation des températures qui accélère la croissance des bourgeons suite à leur période de dormance, c'est-à-dire en automne et en hiver (Morin et Chuine 2007). Selon une étude réalisée par Chuine (2007 dans Morin et Chuine 2007), le débourrement des ligneux tempérés nord-américains a été devancé de 2.9 jours par décennie en moyenne pour 46 espèces étudiées. De plus, selon Beaubien et Freeland (2000), il semblerait que la floraison du peuplier faux-tremble en Alberta se produise en moyenne 26 jours plus tôt que durant le siècle dernier. Morin (2006) a aussi permis de démontrer que la phénologie de 22 espèces étudiées sera fortement affectée par les changements climatiques, même s'il y aura des réponses contrastantes entre les espèces. Sur la zone étudiée (nord-est des États-Unis et sud-est du Canada), les résultats indiquent un avancement plus prononcé au nord de la région sous étude. Plus précisément, on note que la date de débourrement de l'érable à sucre serait devancée jusqu'à 25 jours d'ici 2100.

#### *Hausse du CO<sub>2</sub>*

Une hausse de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pourrait causer un effet fertilisant sur les forêts. Selon Koerner (2005), il semblerait qu'une augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> favoriserait davantage les espèces d'arbres feuillus que les conifères. Par exemple, le peuplier semblerait bien réagir à une hausse de concentration de CO<sub>2</sub>, montrant un accroissement de son volume de 20 à 30% (Dickson *et al.* 1998, Isebrands *et al.* 2001 dans Forget *et al.* 2003). Toutefois, les effets de cette hausse pourraient être annulés par d'autres facteurs dont l'acclimatation des arbres aux nouvelles concentrations de CO<sub>2</sub> (DeLucia *et al.* 1999 dans Desjarlais *et al.* 2010) ou encore limités par le manque d'éléments nutritifs tels que l'azote. De plus, les arbres plus jeunes seraient plus avantagés par une hausse de CO<sub>2</sub> que les arbres



plus vieux (Körner *et al.* 2005). L'effet d'une hausse de CO<sub>2</sub> sur la croissance des plantes pourrait donc être très variable en fonction de l'espèce, de l'âge de l'arbre, et du site.

### *Précipitations*

Au niveau des précipitations, les perspectives envisagées laissent présager des éléments moins favorables à la croissance des arbres forestiers. En effet, les changements de précipitations prévus dans la majeure partie du Québec seront minimes pendant la période de croissance (juin, juillet, août) (voir chapitre suivant). Par conséquent, des précipitations pour le moins identiques combinées à une hausse des températures pourraient accroître l'évapotranspiration et causer un assèchement des sols (Desjarlais *et al.* 2010). Certaines espèces qui sont sensibles aux conditions d'aridité, comme le bouleau jaune (particulièrement), l'épinette noire, le peuplier faux-tremble et le sapin baumier, pourraient être défavorisées (Périé *et al.* 2012) alors que d'autres, plus tolérantes à ces conditions, tels les chênes, les pins, le hêtre, le frêne d'Amérique et l'ostryer de Virginie, seraient avantagées.

#### d. Migration des espèces et biodiversité

Les changements de température, de concentration de CO<sub>2</sub>, et la longueur des saisons de croissance sont des facteurs qui peuvent influencer la composition des peuplements forestiers (Iverson et Prasad 2001). En effet, la hausse de température annuelle moyenne appréhendée de 3.2°C d'ici à 2050 au centre du Québec entraînerait un déplacement des zones climatiques d'environ 500 km au nord. L'équilibre forêt-climat serait donc fortement compromis. En supposant que la niche réalisée suive la niche climatique, il serait alors possible d'observer des érablières jusqu'à Chibougamau (Iverson et Prasad 2002)! Les récents travaux de Périé (présentés dans Berteaux 2012) confirment que la répartition spatiale de la niche climatique de plusieurs espèces d'arbres au Québec sera considérablement changée.

En utilisant l'approche des analogues des niches climatiques, Iverson et Prasad (2001) ont déterminé, selon cinq scénarios de changements climatiques, que les deux types de forêts les plus susceptibles de s'étendre sont la forêt chêne-caryer et la forêt chêne-pin de la forêt carolinienne. La forêt chêne-caryer est présente de la Georgie au Sud jusqu'à l'État de New York au nord. Une extension de cette forêt vers le nord, entraînerait donc une hausse de ces espèces dans les forêts du sud du Québec. Plusieurs espèces qui se trouvent actuellement dans la forêt carolinienne en Ontario verront leur niche climatique se déplacer dans l'Outaouais (tels les caryers (*Carya spp.*), le charme de Caroline (*Carpinus carolina*), le chêne blanc (*Quercus alba*) et le genévrier de Virginie (*Juniperus virginiana*). D'autres espèces réputées pour leur valeur commerciale et leur croissance pourront trouver un terrain fertile pour leur croissance en Outaouais tel le noyer noir (*Juglans nigra*), et le tulipier de Virginie (*Tulipifera virginiana*). D'autre part, la latitude de croissance optimale de plusieurs espèces des forêts feuillues de l'est de l'Amérique du Nord pourrait migrer vers le nord. Par exemple, le sapin baumier (*Abies balsamea*), le cèdre occidental (*Thuja occidentalis*), le pin rouge (*Pinus resinosa*), l'érable à sucre (*Acer saccharum*), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), le bouleau à papier (*Betula papyrifera*), le frêne noir (*Fraxinus nigra*), le peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata*) et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), assez fréquentes en Outaouais, pourraient voir leur abondance réduite (Iverson et Prasad 2001, 2002).

Cependant, plusieurs facteurs associés aux réponses phénologiques des espèces au climat peuvent limiter cette dispersion. Morin et Chuine (2007) ont utilisé un modèle de répartition basée sur les processus phénologiques (PHENOFIT) plutôt que sur les analogues de niches climatiques pour simuler l'aire de répartition des espèces en 2100. Ils démontrent aussi des différences flagrantes entre les deux types de modèles dans les zones de colonisation et d'extinction (Morin et Thuiller 2009). Les prédictions obtenues suggèrent que les espèces seront généralement affectées par les changements climatiques bien qu'à des degrés divers. La plupart des espèces étudiées (11 sur 16) seront fortement contraintes par leur capacité de dispersion. Les simulations démontrent également qu'aucune des espèces étudiées ne sera en mesure de se maintenir sur son aire de répartition actuelle (voir Figure 8), ce qui entraînera des extinctions au sud et des colonisations au nord de ces aires (Kirschbaum 2000; Morin et Chuine 2007). Pour la région de l'Outaouais, on verra notamment une hausse de la probabilité de présence de l'érable à sucre et du frêne d'Amérique. Tant pour les modèles de niche climatique que pour les modèles basés sur les réponses phénologiques, la migration de ces espèces pourrait cependant être ralentie par plusieurs autres facteurs d'influence locale tels que les sites, la fragmentation du paysage et les régimes de perturbations (Flannigan *et al.* 2000) et les interaction biologiques.

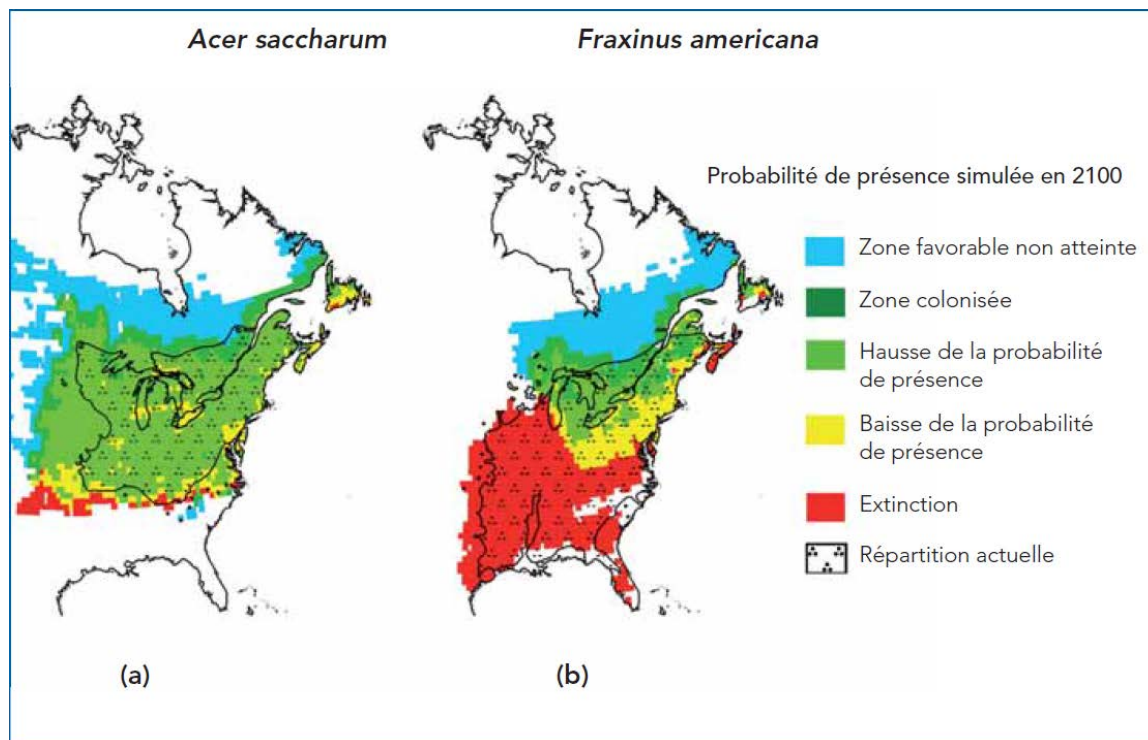


Figure 7. Simulation des changements de répartition de l'érable à sucre (*Acer saccharum*) (a) et du frêne d'Amérique (*Fraxinus americana*) (b) en 2100 par rapport à leur répartition actuelle (Morin & Chuine 2007)

Les travaux de Woodwall *et al.* (2008, 2009) ont porté sur la migration actuelle des espèces d'arbres en évaluant la différence spatiale entre le front septentrional des aires de répartition entre les arbres matures et la régénération pour chaque espèce. Ces travaux montrent que les espèces ne migrent pas

toutes à la même vitesse, ce qui suppose que des barrières physiques (fragmentation) et biologiques interfèrent fortement sur les processus de migration. Au Québec, cette approche a été reprise par l'équipe de Sylvie Deblois (McGill). Ils ont pu, en utilisant le réseau de placettes permanentes du MRNF, et suivant une approche similaire à celle utilisée par Woodwall, caractériser les espèces qui présenteraient déjà des signes probants de migration (extension, contraction) dans les trois dernières décennies (Boisvert-Marsh 2012). Parmi les espèces démontrant une extension septentrionale de leur aire de répartition on trouve le bouleau jaune, l'érable rouge (*Acer rubrum*), et le hêtre à grandes feuilles pour les espèces méridionales et le peuplier faux-tremble et le bouleau à papier pour les espèces boréales. Le thuya de l'est (*Thuja occidentalis*), et la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*) montrent aussi des signes d'extension au nord. En revanche, d'autres espèces ont commencé à démontrer des signes de contraction, telles que l'érable à sucre et l'épinette noire (*Picea mariana*) dans le sud de leur aire de distribution sans démontrer une migration au nord. Finalement, l'ostryer de Virginie (*Ostrya virginiana*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*) ont vu leur abondance augmenter dans le sud.

L'utilisation de l'approche de la caractérisation de la niche climatique et de son évolution en fonction des changements climatiques a été développée et élargie pour un ensemble imposant d'espèces animales et végétales dans le projet CC-Bio, dirigée par Dominique Berteaux (UQAR). Leurs travaux montrent qu'en général, le climat sera plus favorable à moult espèces au sud de l'Outaouais, pouvant amener une augmentation de la biodiversité (Berteaux 2012). En effet, plusieurs espèces (animales et végétales) qui sont à leur limite septentrionale de leur aire de distribution et qu'on trouve actuellement jusque dans la région du Niagara, verront leur niche climatique prendre de l'expansion en Outaouais, Parmi ces espèces, certaines peuvent être la cause de risques d'invasion biologique susceptible de causer des problèmes de fonctionnement des écosystèmes (Deblois 2012).

#### e. Impacts sur la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes

Les événements climatiques extrêmes incluant les sécheresses, les précipitations intenses, les vagues de chaleur, les hivers chauds, les orages violents, les tempêtes de verglas et les ouragans devraient croître en fréquence et en intensité avec les changements climatiques (Johnston et Williamson 2007). Un exemple de la manifestation de ce type d'événement est les pluies diluviennes qui ont frappé la région de l'Outaouais en juin 2011. Une hausse de la fréquence de ces événements pourrait modifier la dynamique des populations et des communautés, et affecter les dynamiques de l'écosystème forestier (Williamson *et al.* 2009)

Il semblerait qu'une augmentation juste au-dessus de 2°C de la température moyenne risquerait d'accentuer la fréquence des épisodes d'événements météorologiques extrêmes (Mastrandea et Schneider 2004 dans Williamson *et al.* 2009). La hausse de la fréquence de ces événements pourrait avoir des conséquences importantes sur les perturbations naturelles telles que les chablis. Ces derniers sont causés par des vents violents résultant de tempêtes, d'ouragans ou de tornades, et pourraient donc être potentiellement affectés par les changements climatiques (Dale *et al.* 2001 dans Forget *et al.* 2003). Comme mentionné précédemment pour les feux, la fréquence et la sévérité des événements convectifs seront plus fortes (Paquin *et al.* 2012), particulièrement pour l'Outaouais qui est à la convergence de

grands systèmes climatiques de l'Arctique et des Grands Lacs, entraînant une augmentation de systèmes extrêmes (vents, orages, foudre, crues, etc.).

Au niveau du verglas, l'accumulation de glace sur les branches peut leur causer des dommages sérieux en augmentant le poids supporté par la branche, ce qui entraîne dans certains cas, des dommages et parfois, la mort de l'arbre par renversement, pliage ou cassure du tronc. Les ouvertures créées en même plus de lumière au sous étage, influençant ainsi sur les processus de régénération et de la croissance. Les facteurs déterminants pour l'augmentation de la fréquence des tempêtes de verglas en raison des changements climatiques sont la fréquence des températures près du point de congélation et l'augmentation des précipitations (Irland 2000; Dale *et al.* 2001; Environnement Canada 2002 dans Forget *et al.* 2003). Il faut toutefois souligner que les effets à moyen et long terme d'une possible augmentation de la fréquence des tempêtes de verglas demeurent à ce jour encore incertains.

#### f. Impacts socio-économiques des changements climatiques

Les impacts des changements climatiques sur les activités socio-économiques sont les plus complexes à cerner parce qu'ils dépendent à la fois des impacts biophysiques, encore mal quantifiés, et de réactions complexes telles que les mécanismes de marché, les perceptions, les valeurs et enjeux du territoire et les développements technologiques (Lemmen *et al.* 2008). Le principal défi en la matière réside dans l'effort de définition des problématiques et dans la mise en place de solutions durables qui s'intègrent à la fois à un système de gouvernance complexe. Les propriétaires d'entreprises forestières, les acteurs de la filière de transformation du bois et les communautés dépendantes des ressources forestières sont susceptibles d'être affectées par les impacts qu'auront les changements climatiques sur les écosystèmes forestiers. L'approche de Vulnérabilités et Adaptation, qui met l'accent sur la reconnaissance de mécanismes de vulnérabilités et l'évaluation de la capacité d'adaptation du système humain, a été mise de l'avant par le GIEC pour favoriser le niveau de préparation des communautés humaines (GIEC 2007).

##### *Secteur forestier*

Les changements climatiques, en modifiant la composition des espèces sur un site donné, pourraient avoir des conséquences sur l'approvisionnement en bois de valeur commerciale, bouleverser la disponibilité d'essences commercialement disponibles et changer le rendement des forêts (Williamson *et al.* 2009). Si l'on examine le cas de l'approvisionnement en bois, les principales préoccupations concernent les phénomènes météorologiques extrêmes, les agents perturbateurs, le changement dans les régimes de perturbation, la hausse des températures, les insectes et la composition des essences (Lemprière *et al.* 2008, Doyon *et al.* 2011). Les effets prévus, à court terme (10 ans et moins), en lien avec ces préoccupations incluent l'augmentation de bois de récupération, une variation dans la productivité, une mortalité importante (ex : due à la sécheresse), une variation dans la qualité de la fibre ligneuse et la nécessité pour les gestionnaires de diversifier leur matériel de plantation. Bien évidemment, ces préoccupations pourraient entraîner d'autres types d'effet à moyen (jusqu'à 50 ans) et à long terme (au-delà de 50 ans).

Les changements climatiques auront donc des effets sur la qualité et la quantité du bois d'œuvre et sur la quantité et l'emplacement de la matière récupérée. Tel que souligné précédemment, il est possible que la productivité de certaines régions augmente en raison des changements climatiques. Il se peut donc que le réchauffement climatique améliore l'approvisionnement de bois d'œuvre dans certaines régions (Lemprière *et al.* 2008). Par conséquent, les impacts des changements climatiques sur l'approvisionnement en bois pourront être positifs ou négatifs, dépendamment de la location, de la période et de la capacité d'adaptation des populations locales (Johnston et Williamson 2007). En fait, il y a plusieurs facteurs qui entrent en jeu pour déterminer l'impact des changements climatiques sur l'approvisionnement, dont l'impact du changement sur la zone forestière, la croissance des arbres, les perturbations naturelles, les activités sylvicoles, la régénération, la composition des espèces et les contraintes régulatrices (Johnston *et al.* 2010).

Sur le plan des opérations et des pratiques forestières, les changements climatiques auront une influence sur la période de récolte et la gestion et l'entretien du réseau routier. La durée des saisons et le climat auront une influence certaine sur les pratiques de récolte. En effet, le raccourcissement de la saison hivernale combiné à la réduction du couvert nival rendra l'accès aux sites de récoltes de plus en plus difficile en raison de la réduction de la qualité des chemins d'hiver (Lemprière *et al.* 2008). Devant ce constat, les entreprises forestières disposent de peu d'options pour palier la réduction du gel du sol. À court terme, elles peuvent effectuer plus de coupes en été, mais cela ne constituerait pas une solution viable à long terme (Johnston *et al.* 2010). Notons à cet effet que l'étude sur l'évaluation des vulnérabilités du secteur forestier des Hautes-Laurentides face aux impacts biophysiques des changements climatiques (Doyon *et al.* 2011) a permis de faire ressortir la problématique de l'accès au territoire comme une préoccupation transversale qui affecte la plupart des acteurs associés au secteur forestier. Ces difficultés entraîneront à leur tour une augmentation des coûts d'infrastructure et de façon plus globale, de mise en opération des activités de récolte. Les travaux de modélisation hydrologique de Fernando Cabral de Vasconcellos sur l'évaluation de la vulnérabilité de l'accès au territoire forestier associés aux risques de bris des infrastructures de drainage routier dans un contexte de changements climatiques (présentés dans Doyon *et al.* (2012) montrent que plus de la moitié des traverses de cours d'eau d'une zone pilote de l'UAF 064-01 dans les Hautes-Laurentides serait à risque très élevé, dont plusieurs sont névralgiques pour les activités sur le territoire. La réduction de la période d'accès pourrait aussi accentuer la saisonnalité des emplois (Lemmen *et al.* 2008). Par ailleurs la récupération du bois mort causé, par exemple, par des épidémies d'insectes ravageurs causera également un casse-tête logistique pour les opérateurs forestiers. Les technologies de transformation de la pâte et des produits du bois pourraient aussi ne pas être adaptées aux changements prévus dans l'approvisionnement du bois, dont l'augmentation du bois de récupération de moindre qualité. La réduction et l'instabilité de l'accès au territoire viennent contrecarrer les efforts de développer une approche optimisée pour les opérations forestières.

#### *Services écologiques et produits forestiers non ligneux*

Les possibilités de loisirs offertes par les parcs et les aires protégées pourraient faire face à des défis de taille si la préservation des espèces naturelles qui s'y trouvent était compromise. Les aires protégées pourraient ne plus être en mesure d'assurer leur rôle de protection, ce qui mènerait à leur

désintégration (Lemmen et Warren 2004; Scott et Lemieux 2007 dans Lemprière *et al.* 2008). Les travaux de Louis Bélanger (U. Laval) et son équipe s'intéressent actuellement à cette question pour le cas du Québec et testent des approches de gestion adaptative de conservation dans le contexte des changements climatiques (Domaine 2012).

Les activités conduites dans le cadre de l'étude de Doyon *et al.* (2011) ont permis d'identifier les vulnérabilités perçues par les intervenants du secteur récréotouristique. La réduction de la saison hivernale pourrait, selon eux, entraîner des pertes de revenus considérables en ce qui concerne les activités telles que la motoneige, le ski et autres activités de plein-air hivernales. En outre, les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers pourraient aussi entraîner des changements dans les espèces fauniques qui se retrouvent sur leur territoire. Ces modifications viendraient affecter considérablement l'offre dans les activités de chasse et de pêche et pourraient entraîner des pertes de revenus à court terme pour les exploitants si ceux-ci ne s'y adaptent pas. Mais d'autres espèces pourraient venir occuper le territoire et présenter d'autres attraits pour la chasse. L'industrie de la chasse a donc une bonne capacité d'adaptation face à ce changement.

Du côté des PFNL, le Québec est le plus grand producteur de sirop d'érable au monde. La production de cette denrée dépend d'une succession de jours au cours desquels la température de nuit descend sous zéro et la température de jour monte au-dessus de zéro. Les résultats de scénarios climatiques laissent présager une baisse de la production de 15 à 22% en 2050 et 2090 respectivement (Duchesne *et al.* 2009 dans Desjarlais *et al.* 2010). Cependant, les récents travaux de Houle (2012) montrent que l'impact principal sera du point de vue de la variabilité interannuelle de production qui augmentera; des années de production faible seront plus fréquentes dû à des épisodes de dégel et de chaleur importante en hiver. Cette perte de régularité dans la saison de production a été identifiée par les acteurs de ce sous-secteur comme une dimension cruciale à la vitalité économique, ce qui les rend très vulnérables aux changements climatiques (Doyon *et al.* 2011).

## Références

- Aber, J., Ollinger, S., Fédérer, C. A., Reich, P., Goulden, M., Kicklighter, D., Melillo, J., et al. (1995). Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research*, 5(3), 207–222. doi:10.3354/cr005207
- Arora, V. K., & Boer, G. J. (2005). A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. *Global Change Biology*, 11(1), 39–59. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00890.x
- Ayres, M. P., & Lombardero, M. J. (2000). Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Science of The Total Environment*, 262(3), 263-286.
- Beaubien, E., & Freeland, H. (2000). Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology*, 44(2), 53-59.
- Bergeron, Y., Gauthier, S., Flannigan, M., & Kafka, V. (2004). Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec. *Ecology*, 85(7), 1916-1932.

- Berteaux, D. 2012. CC et biodiversité du Québec: vers un nouveau patrimoine naturel. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Boisvert-Marsh, L. 2012. Spatiotemporal change at the northern limit of tree distribution in Quebec since 1970. Thèse de Maîtrise, McGill University, Montreal, Qc, Canada. 74p. + 2 annexes.
- Boivin, G. 2012. Estimation de la température de base de développement d'un insecte. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Brown, H. C. P. (2009). Climate change and Ontario forests: Prospects for building institutional adaptive capacity. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14(6), 513-536.
- Cooke, B. J., & Lorenzetti, F. (2006). The dynamics of forest tent caterpillar outbreaks in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 226(1-3), 110-121. doi: 10.1016/j.foreco.2006.01.034
- Deblois, S. 2012. Outils pour évaluer les risques d'invasion biologique dans un contexte de changements climatiques. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- de Groot, W. J., Bothwell, P. M., Carlsson, D. H., & Logan, K. A. (2003). Simulating the effects of future fire regimes on western Canadian boreal forests. [Article]. *Journal of Vegetation Science*, 14(3), 355-364.
- Desjarlais, C., Allard, M., Bélanger, D., Blondlot, A., Bouffard, A., Bourque, A., . . . Villeneuve, C. (2010). Savoir s'adapter aux changements climatiques: Ouranos.
- Desprez-Loustau, M.-L., Belrose, V., Bergot, M., Cloppet, E., Husson, C., Piou, D., . . . Marcais, B. (2005). *Impact des changements climatiques sur les maladies des arbres forestiers*. Paper presented at the La forêt face aux changements climatiques: acquis et incertitudes, Paris.
- Domaine, É. 2012. Adaptation aux changements climatiques et adaptation des organisations. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Doyon, F. 2002. Quelle est l'importance du rôle écologique du feu dans la forêt méridionale du Québec? Pages 33-42 in *L'aménagement forestier et le feu*, M. Chabot et S. Gauthier (éds.) Actes de colloque, avril 2002, Chicoutimi.
- Doyon, F. et Gravel, D. 2003. L'envahissement par le hêtre dans les érablières de l'Outaouais: phénomène fantôme ou glissement de balancier? Rapport de l'Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue et du Groupe de recherche en écologie forestière interuniversitaire. 18p.
- Doyon, F., Cyr, D., Poirier, J., Chiasson, G., & Boukendour, S. (2011). Évaluation des vulnérabilités du secteur forestier dans les Hautes-Laurentides face aux impacts biophysiques des changements climatiques: IQAFF.
- Duchesne, L., R. Quimet, J.-D. Moore & R. Paquin. 2005. Changes in structure and composition of maple-beech stands following sugar maple decline in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management* 208 : 223-236.
- Flannigan, M., Bergeron, Y., Engelmark, O., & Wotton, B. (1998). Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. *Journal of Vegetation Science*, 9(4), 469-476.
- Flannigan, M., Logan, K., Amiro, B., Skinner, W., & Stocks, B. (2005). Future Area Burned in Canada. *Climatic Change*, 72(1), 1-16. doi: 10.1007/s10584-005-5935-y

- Flannigan, M. D., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2000). Climate change and forest fires. *Science of The Total Environment*, 262(3), 221-229. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00524-6
- Fleming, R. A., Candau, J.-N., & McAlpine, R. S. (2002). Landscape-Scale Analysis of Interactions between Insect Defoliation and Forest Fire in Central Canada. *Climatic Change*, 55(1), 251-272. doi: 10.1023/a:1020299422491
- Fleming, R. A., & Candau, J. N. (1998). Influences of climatic change on some ecological processes of an insect outbreak system in Canada's boreal forests and the implications for biodiversity. *Environmental Monitoring and Assessment*, 49(2), 235-249.
- Forget, E., Drever, R., & Lorenzetti, F. (2003). Changements climatiques: impacts sur les forêts québécoises—Revue de littérature. *Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue*.
- Fankhauser, S., Smith, R.B., Tol, R.S.J. 1998. Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions, *Ecological Economics* 30(1): 67-78.
- Girardin, M. P., Ali, A. A., Carcaillet, C., Gauthier, S., Hély, C., Le Goff, H., . . . Bergeron, Y. (2012). Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. *Forest Ecology and Management*(0). doi: 10.1016/j.foreco.2012.07.005
- Gray, D. R. (2004). The gypsy moth life stage model: landscape-wide estimates of gypsy moth establishment using a multi-generational phenology model. *Ecological Modelling*, 176(1), 155-171.
- Gray, D. R. (2008). The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in eastern Canada. *Climatic Change*, 87(3), 361-383.
- Houle, D. 2012. Analyse des impacts des changements climatiques sur la production de sirop d'érable au Québec et solutions d'adaptations. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Iverson, L. R., & Prasad, A. M. (2001). Potential changes in tree species richness and forest community types following climate change. *Ecosystems*, 4(3), 186-199.
- Iverson, L. R., & Prasad, A. M. (2002). Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. *Forest Ecology and Management*, 155(1), 205-222.
- Johnston, M., & Williamson, T. (2007). A framework for assessing climate change vulnerability of the Canadian forest sector. *The Forestry Chronicle*, 83(3), 358-361.
- Johnston, M., Williamson, T., Munson, A., Ogden, A., Moroni, M., Parsons, R., . . . 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*.
- Julien, Y., & Sobrino, J. (2009). Global land surface phenology trends from GIMMS database. *International Journal of Remote Sensing*, 30(13), 3495-3513.
- Kirschbaum, M. U. F. (2000). Forest growth and species distribution in a changing climate. *Tree Physiology*, 20(5-6), 309-322.
- Körner, C., Asshoff, R., Bignucolo, O., Hättenschwiler, S., Keel, S. G., Peláez-Riedl, S., . . . Zotz, G. (2005). Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO<sub>2</sub>. *Science*, 309(5739), 1360-1362.



- Krezek-Hanes, C. C., Ahern, F., Cantin, A., & Flannigan, M. D. (2011). *Tendances des grands incendies de forêts au Canada, de 1959 à 2007. Biodiversité canadienne: état et tendance des écosystèmes en 2010*. Ottawa: Conseils canadiens des ministres des ressources.
- Lemmen, D. S., Warren, F. J., Lacroix, J., & Bush, E. (2008). *Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007*. Ottawa (Ontario).
- Lemprière, T. C., Bernier, P., Carroll, A., Flannigan, M., Gilsenan, R., McKenney, D., . . . Blain, D. (2008). *The importance of forest sector adaptation to climate change*: Northern Forestry Centre.
- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., & Houle, D. 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise (p. 124). Montréal. Retrieved from [http://www.ouranos.ca/media/publication/162\\_AtlasForet2011.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011.pdf)
- Morin, X. (2006). *Biogéographie des espèces d'arbres européens et nord-américains: déterminisme et évolution sous l'effet des changements climatiques*. PhD, Université Montpellier II, Montpellier.
- Morin, X., & Chuine, I. (2007). Réponse des essences ligneuses au changement climatique - Modifications de la phénologie, des risques de gel, et de la répartition des essences ligneuses nord-américaines. In ONF (Ed.), *Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques (Vol. 3): Hors série. Rendez-vous techniques*.
- Morin, X. & Thuiller, W. 2009. Comparing niche- and process-based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology* 90(5):1301–1313.
- Morrisette, J., & Gauthier, S. 2008. Study of cloud-to-ground lightning in Quebec: 1996–2005. *Atmosphere-Ocean* 46(4): 443-454.
- MRNF. (2006). *Portrait territorial. Outaouais*.
- Pachauri, R., & Reisinger, A. (2008). *Changements Climatiques 2007: Rapport de Synthèse*. Rapport GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- Paquin, D. (2012). De la fréquence et de la force des orages sévères dans un Québec soumis à un climat en changement. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Périé, C., Duchesne, L., Lambert, M.-C. 2012. Prédire la croissance potentielle des arbres au Québec à l'aide des caractéristiques cartographiables des peuplements et des stations. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la Recherche forestière, mémoire de recherche forestière no. 164. 42p. + 1 Annexe.
- Price, C., & Rind, D. (1994). The impact of a 2× CO<sub>2</sub> climate on lightning-caused fires. *Journal of Climate*, 7(10), 1484-1494.
- Régnière, J., Nealis, V., & Porter, K. (2009). Climate suitability and management of the gypsy moth invasion into Canada. *Biological Invasions*, 11(1), 135-148. doi: 10.1007/s10530-008-9325-z
- Régnière, J. (2012). Les insectes forestiers indigènes et exotiques face aux changements climatiques. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Régnière, J., St-Amant, R., & Duval, P. (2012). Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example. *Biological Invasions*, 14(8), 1571-1586. doi: 10.1007/s10530-010-9918-1

- Rocques, A., & Robinet, C. (2005). *Impact du changement climatique sur les populations d'insectes*. Paper presented at the La forêt face aux changements climatiques: acquis et incertitudes, Paris.
- SCF. (2007). Le dendroctone du pin: penser stratégie. *L'éclaircie*, 37.
- Stocks, B. J., Fosberg, M. A., Lynham, T. J., Mearns, L., Wotton, B. M., Yang, Q., . . . McKenney, D. W. (1998). Climate Change and Forest Fire Potential in Russian and Canadian Boreal Forests. *Climatic Change*, 38(1), 1-13. doi: 10.1023/a:1005306001055
- Terrier, A., M. P. Girardin, C. Périé, P. Legendre, & Y. Bergeron. (En impression). Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecological Applications*. <http://dx.doi.org/10.1890/12-0425.1>
- Volney, W. J. A., & Fleming, R. A. (2000). Climate change and impacts of boreal forest insects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1), 283-294.
- Williamson, T. B., Colombo, S. J., Duinker, P. N., Gray, P. A., Hennessey, R. J., Houle, D., . . . Spittlehouse, D. L. (2009). *Les changements climatiques et les forêts du Canada: des impacts à l'adaptation*. Edmonton (Alberta).
- Woodall, C.W., Oswalt, C.M., Westfall, J.A., Perry, C.H., Nelson, M.D. & Finley, A.O. 2009. An indicator of tree migration in forests of the eastern United States. *Forest Ecology and Management* 257 :434–1444.
- Woodall, C.W., Oswalt, C.M., Westfall, J.A., Perry, C.H. & Nelson, M.D. 2008. Treemigration detection through comparisons of historic and current forest inventories. In: McWilliams, W. (Ed.), *Forest Inventory and Analysis Symposium, 2008*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Park City, UT, October 21–23, 2008. Gen. Tech. Rep. Rocky Mountain Research Station.
- Wotton, B., & Flannigan, M. (1993). Length of the fire season in a changing climate. *The Forestry Chronicle*, 69(2), 187-192.
- Wotton, B., Martell, D., & Logan, K. (2003). Climate change and people-caused forest fire occurrence in Ontario. *Climatic Change*, 60(3), 275-295.
- Yamasaki, S. H., Delagrangé, S., Doyon, F., Lorenzetti, F., Forget, É., & Logan, T. (2008). *Climate Change Adaptation Strategies for the Tolerant Hardwood Forests of Eastern Canada*: Natural Resources Canada.

### 3. Exposition aux changements climatiques

#### **Résumé**

L'exposition aux changements climatiques est la composante la plus quantitative du concept de vulnérabilité. Malgré cela, des choix subjectifs doivent être faits quant aux variables et indices climatiques à présenter aux acteurs locaux pour appuyer l'évaluation des vulnérabilités. Ce choix est d'autant plus important qu'il a le potentiel d'influencer l'identification et la priorisation des impacts potentiels par les acteurs locaux.

Dans un tel contexte où les valeurs d'intérêt sont diverses, parfois même en compétition, et où la capacité d'analyse des données climatiques et météorologiques est très variable, nous avons choisi d'abord offrir un portrait régionalisé, simple et généraliste du climat projeté pour l'horizon 2055, qui est malgré tout adapté au système forestier. De plus, nous avons accordé une grande importance à la transparence dans la présentation de l'incertitude associée aux projections climatiques, et ce, par les moyens suivants:

1. Nous avons utilisé le jeu de données CMIP3, qui est à la base du 4<sup>e</sup> rapport du *Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat* (rapport synthèse: GIEC 2007) et est reconnu internationalement. Ce jeu de données est issu d'un ensemble de 71 simulations climatiques effectuées à partir de 3 familles de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A1b, A2 et B1) et de 14 modèles de circulation générale développés par des équipes indépendantes.
2. Nous présentons des enveloppes de projections contenant une plage de conditions climatiques futures équiprobables, délimitées par les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> percentiles de ces 71 simulations, au moyen de cartes et graphiques simplifiés pour des acteurs n'ayant pas nécessairement de compétence technique ou scientifique en la matière.
3. Afin de faciliter l'interprétation, la zone analysée et représentée dans les cartes a été étendue significativement en sa partie méridionale (en Ontario), afin que le lecteur puisse mieux évaluer les changements climatiques projetés pour l'Outaouais en les comparant avec les analogues latitudinaux contemporains.
4. Nous présentons de l'information de "bas niveau", tirée directement des sorties journalières des simulations climatiques décrites plus haut, en leur appliquant un post-traitement minimal limité à une correction de biais et une interpolation spatiale. Cette décision vise à affecter aussi peu que possible l'enveloppe d'incertitude associée aux données-source en évitant le recours à des modèles prédictifs additionnels pour lesquels il est souvent impossible de connaître l'effet sur l'enveloppe d'incertitude.

Nous décrivons ensuite les principaux signaux pouvant être dégagés de ces projections, en départageant ceux qui sont robustes de ceux qui sont plus ambigus. Ce travail se fonde en bonne partie sur celui préalablement réalisé par une équipe du Consortium Ouranos pour l'élaboration de l'Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise (Logan *et al.* 2011).

## **Mise en contexte**

Telle que définie par le Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la vulnérabilité aux changements climatiques dépend de l'exposition, de la sensibilité et de la capacité d'adaptation des acteurs concernés (Intergovernmental Panel on Climate Change - Working Group II, 2007). Cette section dresse un portrait régional de l'exposition aux changements climatiques pour le territoire de l'Outaouais, par l'entremise d'une comparaison entre le climat présent et l'horizon 2055.

Bien que l'exposition soit possiblement la composante du concept de vulnérabilité la plus facile à quantifier, des choix subjectifs doivent être faits en ce qui a trait aux variables et indices climatiques offrant le plus grand potentiel pour appuyer l'évaluation des vulnérabilités, en particulier lorsque l'identification des impacts potentiels les plus importants est faite en partenariat avec les acteurs locaux et qu'aucune prémisses à ce sujet n'est imposée par l'équipe responsable de l'évaluation. En effet, le climat et la météo qui en découlent sont constitués d'un ensemble de dimensions qui peuvent être illustrées d'une multitude de manières. De plus, l'horizon temporel choisi influence grandement le portrait du climat futur. Bien entendu, ces choix influencent l'état des tendances moyennes et de la variabilité climatique projetées, mais aussi, et il s'agit là d'un élément central sur lequel nous allons insister, puisqu'ils influencent l'incertitude associée aux projections. C'est donc dans l'optique de devoir présenter l'information à des acteurs locaux dont on ne pouvait assumer aucune expertise en matière de climatologie et de météorologie, ayant des intérêts et préoccupations extrêmement variés en ce qui a trait à l'influence du climat sur leurs activités, que nous avons fait nos choix. Ceux-ci sont justifiés plus bas.

## **Méthode**

L'information présentée est tirée de l'*Atlas des scénarios climatiques pour la forêt québécoise* (Logan, Charron, Chaumont et Houle 2011), élaboré par Ouranos pour le MRNF. Cet atlas présente les projections climatiques pour l'ensemble du Québec, et synthétisent l'information pour plusieurs variables et indices climatiques jugés pertinentes pour la forêt. Pour les fins de l'évaluation des impacts potentiels pour le secteur forestier de l'Outaouais, nous avons repris une partie de cette information, l'avons régionalisée, et y avons ajouté quelques variables et indices jugés pertinents par les acteurs locaux. Nous avons porté un soin particulier à la clarté de la présentation graphique de l'information afin de la rendre à la fois la plus complète et la plus accessible possible aux acteurs locaux. Tel que mentionné précédemment, nous avons aussi accordé une très grande importance à la notion d'incertitude, que nous avons souhaité illustrer de la façon la plus simple et transparente possible tout au long de l'exercice.

Afin de faciliter l'interprétation, la zone analysée et représentée dans les cartes a été étendue significativement en Ontario, afin que le lecteur puisse mieux évaluer les changements climatiques projetés pour l'Outaouais en les comparant avec les analogues latitudinaux contemporains plus au sud.

Fondés sur les cartes et graphiques illustrant le climat futur, nous avons dégagé les signaux les plus importants et tenté de distinguer ceux qui sont sans ambiguïté de ceux qui sont associés à une plus grande incertitude.

#### a. Variables et indices climatiques retenus, considération de l'incertitude et horizon temporel

Le choix des variables et indices décrits dans le présent document a d'une part été basé sur les préoccupations généralement identifiées dans la littérature sur l'adaptation du secteur forestier aux changements climatiques, mais il a aussi été contraint par la disponibilité de l'information. Nous avons aussi choisi de nous limiter à l'information pouvant être tirée directement des modèles climatiques, c'est-à-dire tout ce qui pouvait être dérivé directement des données de température (Tmin, Tmax, et Tmoy) et précipitations journalières, sans avoir à recourir à d'autres méthodes d'estimation qui auraient ajouté de l'incertitude et complexifié son illustration. Concrètement, cela signifie que nous n'avons pas utilisé de modèles, statistiques ou autres, afin d'estimer d'autres indices plus intimement liés à certains processus donnés comme les feux de forêt ou la croissance des arbres, par exemple. Ainsi, seules les variables et indices pouvant être dérivés directement des sorties journalières des modèles climatiques, température maximale, température minimale et précipitation journalière totale, ont été considérés. En d'autres termes, nous avons privilégié une information simple, de plus bas niveau, mais dont on connaissait mieux l'incertitude, au détriment d'une information plus précise dont on aurait difficilement pu évaluer l'incertitude. L'incertitude associée aux résultats qui suivent correspond donc à peu de choses près à celle produite par les simulations climatiques ayant servi de base au 4<sup>e</sup> rapport du GIEC (2007). Ce faisant, nous souhaitons aussi promouvoir la capacité des acteurs locaux à intégrer la notion d'incertitude et d'en distinguer les différentes sources.

Nous abordons quelque peu la question des extrêmes climatiques, mais seulement pour certaines variables simples puisque l'interprétation des valeurs extrêmes produites par les modèles climatiques requiert la prise en compte de processus physiques complexes ainsi que le recours à des analyses statistiques poussées qui dépassent la portée de cet exercice.

#### b. Projections de base - Température et précipitations

Nous avons d'abord choisi d'illustrer les projections pour la température annuelle moyenne, la température maximale estivale moyenne ainsi que les températures minimales hivernales moyennes. À partir de ces projections des températures, nous avons aussi dérivé la somme des degrés-jours de croissance au-dessus de 5°C, défini comme le cumul annuel des écarts positifs entre la température moyenne journalière et 5°C. Cet indice est souvent utilisé comme indicateur de l'effet de la température sur le potentiel de croissance de la végétation lorsque celle-ci n'est pas limitée par la disponibilité en

eau, et qui, particulièrement en zone tempérée et boréale, constitue l'horloge thermique qui détermine la phénologie des espèces. Nous avons aussi dérivé les degrés-jours de gel, à titre d'indicateur de l'intensité des hivers, et qui sont quant à eux définis comme le cumul annuel des écarts négatifs entre la température moyenne journalière et 0°C.

Nous présentons aussi les projections pour les précipitations: précipitations annuelles moyennes, précipitations estivales et précipitations sous forme de neige.

Pour simplifier la manipulation des données, tel qu'il est communément pratiqué avec ce type de données, les saisons ne sont pas délimitées par les équinoxes et solstices, mais plutôt par le début du mois: l'hiver débute le 1<sup>er</sup> décembre, le printemps le 1<sup>er</sup> mars, l'été le 1<sup>er</sup> juin et l'automne le 1<sup>er</sup> septembre.

### c. Indices composites, saisonnalité, durée et fréquence d'épisodes

L'indice de sécheresse canadien a été calculé. Cet indice représente l'effet net de l'évapotranspiration et des précipitations sur la disponibilité en eau dans les couches organiques profondes et compactes des sols forestiers. L'indice de sécheresse a été développé en tant que composante de l'indice forêt-météo (*fire weather index*; Van Wagner 1987) et est donc un indicateur utile des effets saisonniers des sécheresses sur les combustibles forestiers et du degré de latence du feu dans les épaisse couches organiques et les gros débris ligneux (Girardin et Wotton 2009). Cet indice varie théoriquement de 0 à 800, les faibles valeurs correspondant à une forte teneur en eau et inversement. Bien qu'il n'y ait pas de ligne directrice absolue en ce qui a trait à la signification exacte de ces valeurs sans unité, il est généralement accepté que les valeurs inférieures à 200 correspondent à une forte teneur en eau et que les valeurs supérieures à 400 correspondent à des valeurs très élevées, pouvant mener à des feux de grande sévérité pour les sols et les combustibles de forte dimension. Les valeurs autour de 300 sont ici considérées comme intermédiaires, mais peuvent aussi donner lieu à des incendies importants sous certaines conditions. Pour cet indice, nous présentons la distribution annuelle de probabilité d'observer des valeurs plus élevées que les valeurs-seuils énumérées précédemment (200, 300 et 400).

De façon similaire, nous avons calculé la probabilité d'observer un cycle journalier de gel-dégel, cycle qui est observé lorsque, pour une même journée, la température minimale est inférieure à 0°C et la température maximale est supérieure à 0°C. Il s'agit d'un indice très simple, mais les impacts potentiels qui en découlent sont nombreux, complexes et peuvent autant porter sur les processus physiologiques des plantes (e.g. Cox et Zhu 2003), la production de sirop d'érable (Duchesne *et al.* 2009) que sur les opérations forestières (e.g. Lafleur *et al.* 2010) et l'entretien des chemins forestiers, pour ne nommer que quelques exemples contrastés.

Enfin, nous présentons la distribution de fréquence d'épisode de grand froid ( $T_{\min} < -30^{\circ}\text{C}$ ), de grande chaleur ( $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) et de sécheresse (précipitation journalière  $< 1\text{mm}$ ). Ces valeurs-seuils ont été déterminées de façon subjective, mais permettent néanmoins d'établir des bases de comparaison entre les différentes périodes.

#### d. Climat de référence et horizon 2055

Pour chacune des variables et indices, nous comparons les projections pour le climat futur pour une période de 30 ans centrée autour de 2055 avec les normales climatiques observées pour le même territoire entre 1971 et 2000. Les normales climatiques proviennent d'un jeu de données publiques produit par le Service national d'information sur les terres et les eaux (Agriculture et agroalimentaire Canada 2012), et consiste en une interpolation des observations journalières faites dans les stations météorologiques modulées principalement par la topographie suivant la méthode ANUSPLIN (V4.3). Il s'agit d'une grille couvrant de façon intégrale le territoire canadien au sud du 60<sup>e</sup> parallèle avec une résolution de 10km.

Les projections pour le climat futur ont été obtenues des sorties journalières d'un ensemble de simulations de Modèles de circulation générale (MCG) rendus disponible par le Programme mondial de recherche sur le climat, *Coupled Model Intercomparison Project phase 3* (CMIP3) (Meehl *et al.* 2007). Ce jeu de données, qui a servi de base au 4<sup>e</sup> rapport du GIEC (2007), contient pour le territoire qui nous intéresse un total de 71 simulations représentant 3 familles de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A1b, A2 et B1), couvrant ainsi un large spectre de paramètres influençant nos émissions tels que la population humaine, l'activité économique, les structures de gouvernance, les valeurs sociales et les innovations technologiques (Nakicenovic *et al.* 2000). Un total de 14 MCG différents ont été mis à contribution par des équipes de partout dans le monde, et ceux-ci ont simulé le climat de une à cinq fois pour chacun des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Pour chaque projection climatique présentée, nous illustrons une enveloppe délimitée par les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> percentiles de ces 71 simulations, enveloppe à l'intérieur de laquelle se situe une plage de valeurs que nous considérons équiprobables, principalement puisque nous considérons sur un pied d'égalité chacun des scénarios d'émission et chaque modèle en terme de plausibilité (cf. Annan et Hargreaves 2010; Sanderson et Knutti 2012).

Comme tous les modèles climatiques sont dans une certaine mesure biaisés, nous avons appliqué une correction de biais afin d'obtenir une représentation la plus réaliste possible du climat futur. Nous avons utilisé la méthode par translation journalière (*daily translation*) proposée par Mpelasoka et Chiew (2009), qui établit tout d'abord une relation entre les distributions des valeurs observées et simulées pour une période de référence, dans le cas présent, 1971-2000. Ensuite, la correspondance entre les percentiles observés et simulés est utilisée pour corriger de façon non linéaire les séries simulées pour le futur. Dans le cas présent, nous avons utilisé 20 intervalles constants (résolution de 5%) et les relations entre les valeurs observées et simulées ont été établies sur une base mensuelle. Une correction de type "additive" a été appliquée aux séries journalières de température tandis qu'un facteur de correction multiplicatif a été appliqué aux valeurs journalières de précipitation.

## **Résultats - Normales (1971-2000) et projections climatiques (horizon 2055) pour l'Outaouais et l'est de l'Ontario**

### a. Température et indices thermiques

Les valeurs exactes décrivant les climats présent et futur, ainsi que les changements en termes de valeurs absolues, sont indiqués sur chacune des cartes et figures. Nous tentons dans le texte de dégager une information plus contextuelle complémentaire à celle, plus quantitative, que vous pouvez trouver sur les cartes

En se basant sur les simulations climatiques constituant la base de données CMIP3, un réchauffement **non-équivoque** est projeté pour la région de l'Outaouais, c'est-à-dire que les scénarios optimiste (10<sup>e</sup> percentile), médian et pessimiste (90<sup>e</sup> percentile), bien que présentant une assez grande incertitude, font consensus sur la tendance à la hausse (Figure 9). Le réchauffement est projeté pour toutes les saisons, mais son amplitude n'est pas constante tout au long de l'année. En effet, le réchauffement le plus important est prévu en hiver tandis que le réchauffement projeté en été est le moins important en termes absolus (Figure 10). De plus, le réchauffement affectera davantage les températures minimales que les températures maximales. La Figure 11, qui présente les températures maximales estivales et températures minimales hivernales, illustrent bien les deux extrêmes, tandis que la Figure 9 illustre les observations des températures annuelles moyennes historiques ainsi que les projections pour l'horizon 2055, dont les variations peuvent être assimilées à celles projetées pour le printemps et l'automne (Tableau 1). C'est aussi pour les saisons intermédiaires, printemps et automne, que l'enveloppe de projection est la plus étendue (Tableau 1).

Naturellement, les analogues spatiaux actuels permettant d'illustrer les températures projetées et autres indices thermiques pour l'Outaouais pour l'horizon 2055 se trouvent au sud. Dans l'éventualité d'un réchauffement faible, défini par le 10<sup>e</sup> percentile des simulations contenues dans la base de données CMIP3, les températures en 2055 seront similaires à ce qui est actuellement observé dans un territoire centré autour de Montréal, couvrant de la Montérégie aux Basses-Laurentides. Dans le cas d'un changement important, défini par le 90<sup>e</sup> percentile des simulations contenues dans CMIP3, c'est jusque dans la région de Toronto, voire même jusqu'à l'extrémité de l'Ontario, qu'il faille se déplacer pour observer des températures et indices thermiques similaires pour le climat de référence (1971-2000). Pour ce qui est du nombre de degrés-jours de croissance, la région de Gatineau pourrait connaître pour l'horizon 2055 des conditions similaires à ce qui est présentement observé sur la Pointe-Pelée, à l'extrémité sud de l'Ontario, dans le cas d'un fort réchauffement tel que suggéré par le 90<sup>e</sup> percentile.

#### À retenir :

- En moyenne, la température augmentera de 2.4 °C ;
- L'écart entre le scénario « Faible » et « Élevé » demeure tout de même de 2 °C !! : [+1.7 °C ; +3.7 °C] ;
- C'est au printemps que l'incertitude sur les T°C est la plus élevée (Tableau 1) ;
- Parmi les 4 saisons, c'est à l'hiver que les T°C augmenteront le plus (Tableau 1) ;



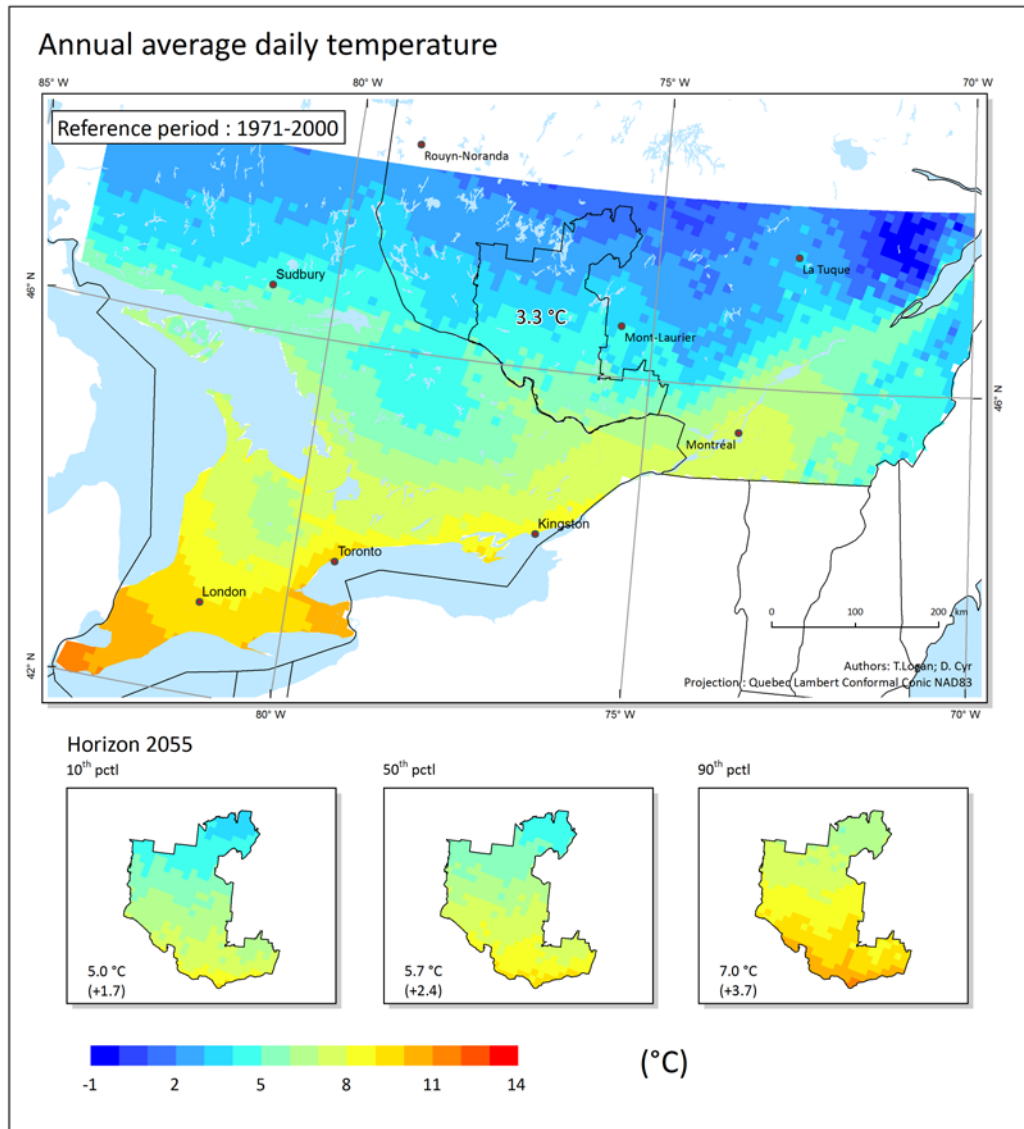


Figure 8. Température annuelle moyenne.

À retenir :

- En moyenne, la température augmentera de 2.4 °C ;
- L'incertitude demeure tout de même de 2 °C !! : [+1.7 °C ; +3.7 °C] ;

Température minimale et maximale quotidienne annuelle

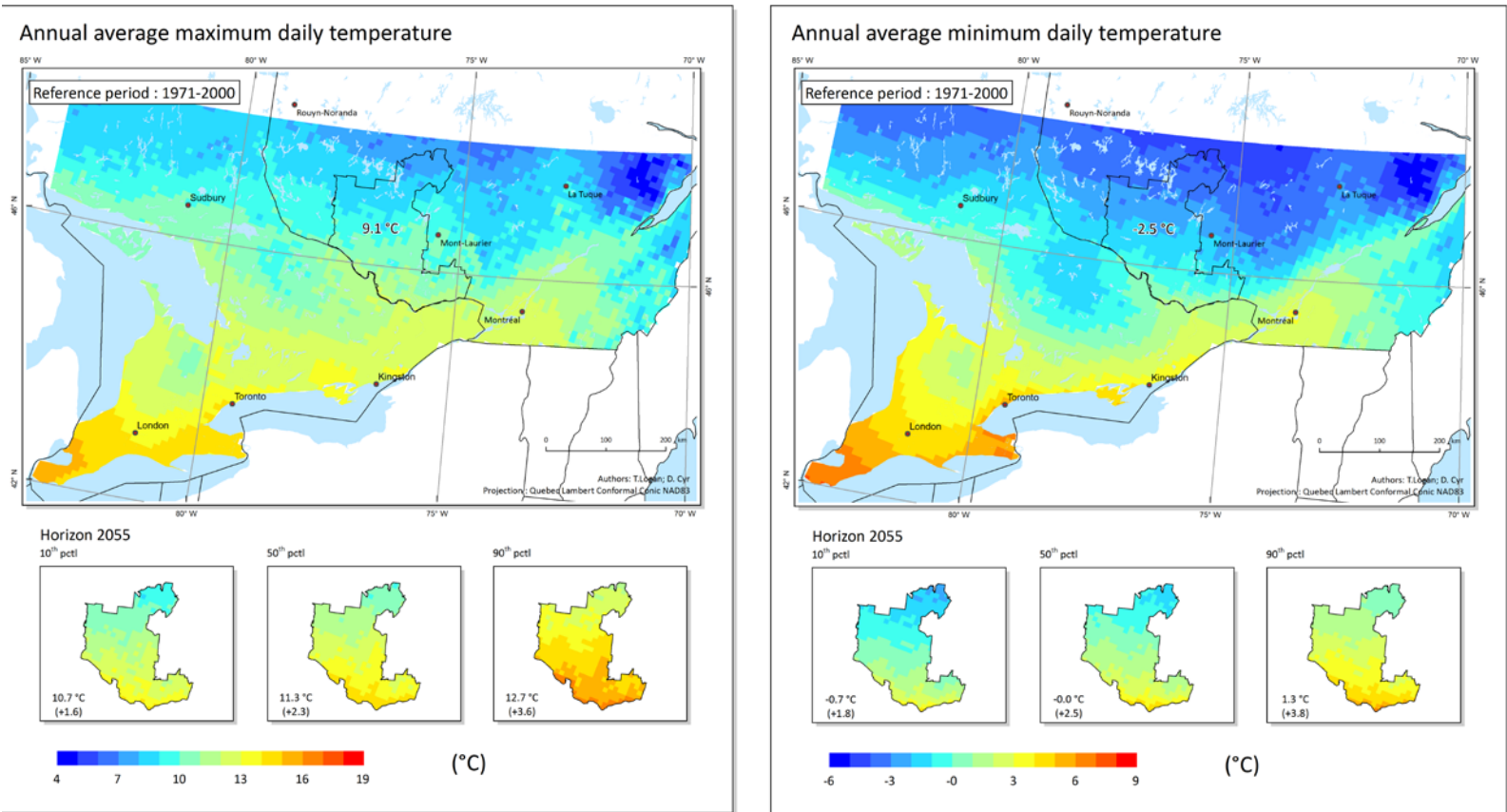


Figure 9. Température annuelle quotidienne a) maximale et b) minimale

À retenir :

- La T°C maximale quotidienne maximale (+2.3 °C [+1.6 °C ; +3.6 °C]) augmente moins que la T°C quotidienne minimale (+2.5 °C [+1.8 °C ; +3.8 °C]);
- Les oscillations autour du point de congélation (0 °C) seront plus fréquentes

Température maximale quotidienne en été (moyenne estivale; juin, juillet et août) et en hiver (moyenne hivernale; décembre, janvier et février)

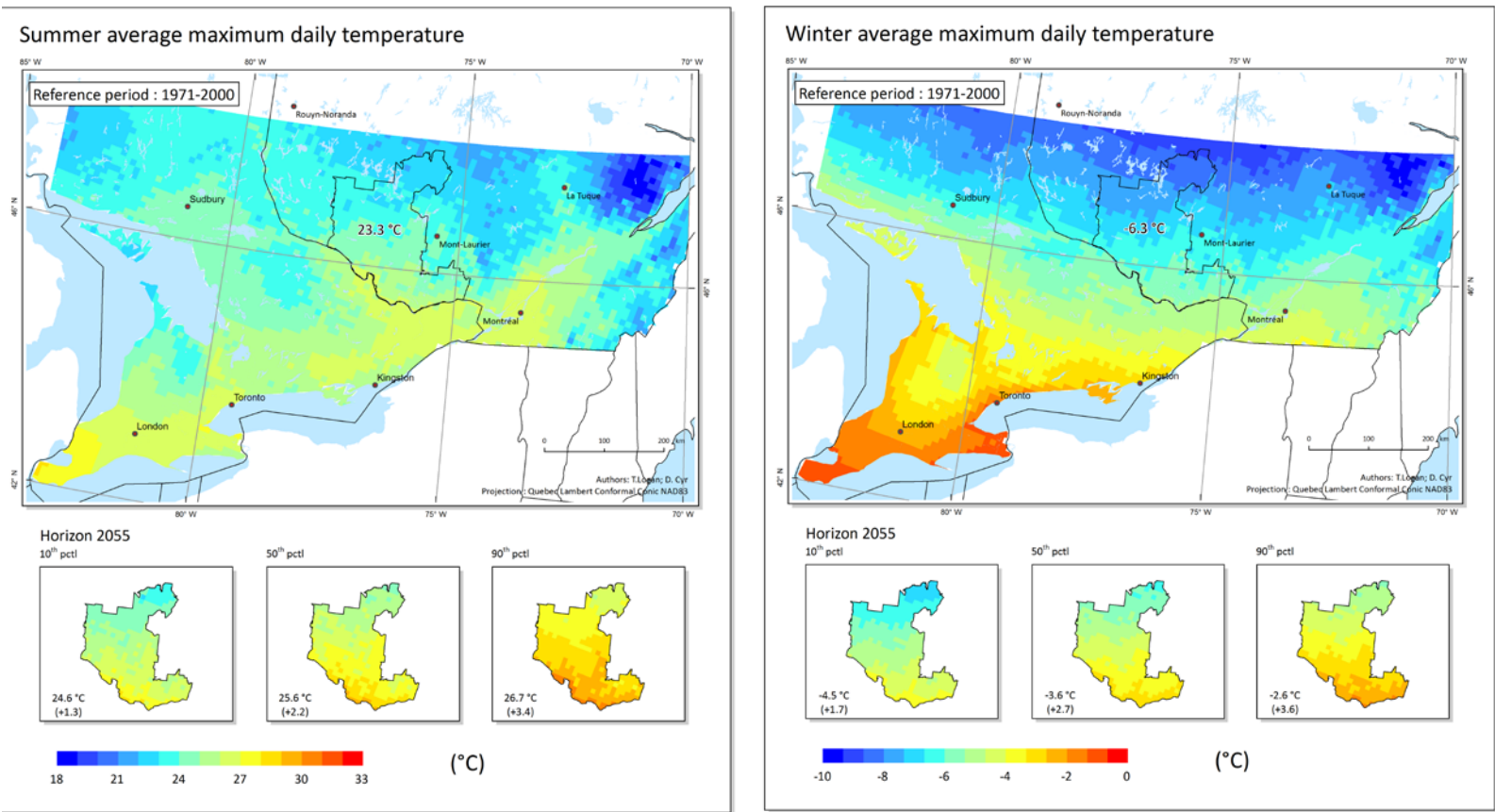


Figure 10. Température maximale quotidienne a) en été (moyenne estivale; juin, juillet et août) et b) en hiver (moyenne hivernale; décembre, janvier et février)

À retenir :

- La T°C Max quotidienne augmente moins en été (+2.2 °C [+1.3 °C ; +3.4 °C]) qu'en hiver (+2.7 °C [+1.7 °C ; +3.6 °C]);

Température minimale journalière en été (moyenne estivale; juin, juillet et août) et en hiver (moyenne hivernale; décembre, janvier et février)

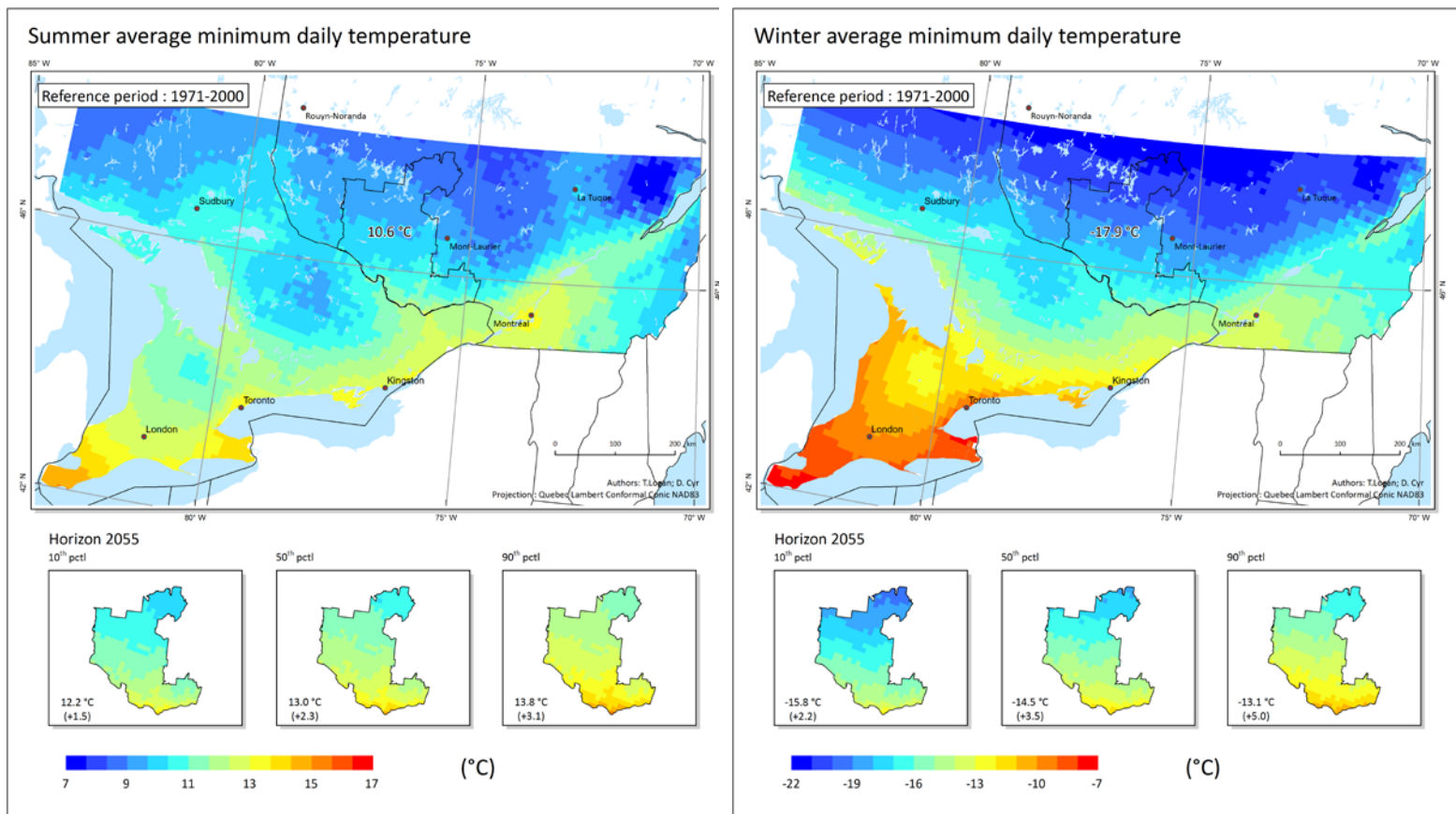


Figure 11. Température minimale journalière a) en été (moyenne estivale; juin, juillet et août) et b) en hiver (moyenne hivernale; décembre, janvier et février)

À retenir :

- Parmi les 4 saisons, c'est à l'hiver que les T°C minimales augmenteront le plus (Tableau 1) ;
- La T°C Min quotidienne augmente plus que la T°C Max quotidienne, autant pour l'été que pour l'hiver ;
- La T°C Min quotidienne augmente moins en été (+2.3 °C [+1.5 °C ; +3.1 °C]) qu'en hiver (+3.5 °C [+2.2 °C ; +5.0 °C]);
- L'augmentation de la T°C Min quotidienne en hiver est très importante (+3.5 °C [+2.2 °C ; +5.0 °C]. Ceci entraînera un changement important dans la forme des précipitations (voir la section sur les précipitations) ;
- C'est au printemps que l'incertitude sur les T°C est la plus élevée (Tableau 1) ;

Degrés-jours de croissance (>5°C) et saison de croissance

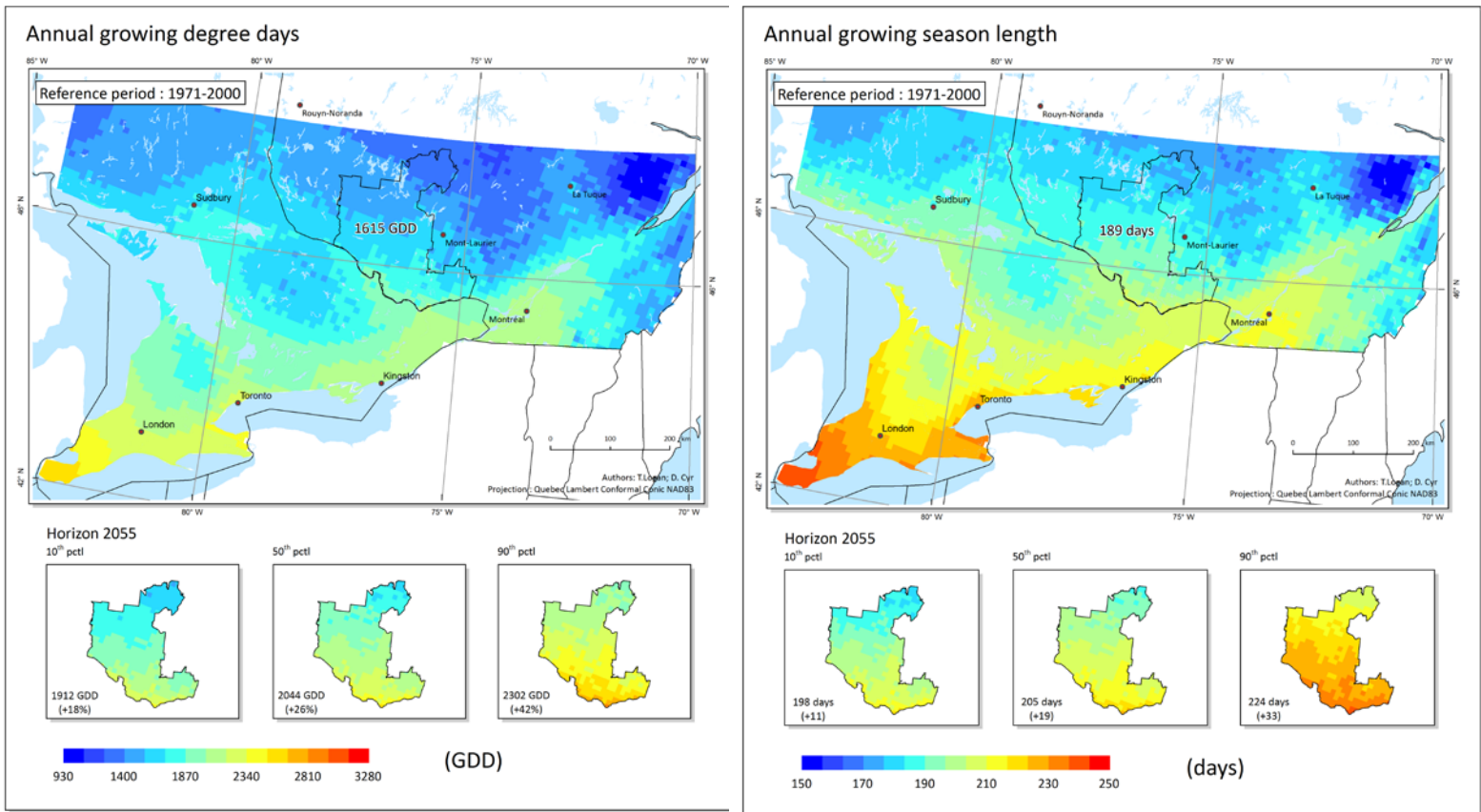


Figure 12. Degré-jours de croissance annuel et durée de la saison de croissance.

À retenir :

- La quantité d'énergie disponible durant la saison de croissance sera significativement plus importante (médiane=25%) ;
- La saison de croissance s'allongera de 11 à 33 jours (médiane de 19 jours), soit correspondant à celle observée actuellement entre Kinston et Toronto, pour la région d'Ottawa ;
- Selon les degrés-jours prédits, la zone de la sapinière ne couvrira plus qu'une partie minime de l'Outaouais;

Degrés-jours de gel ( $<0^{\circ}\text{C}$ )

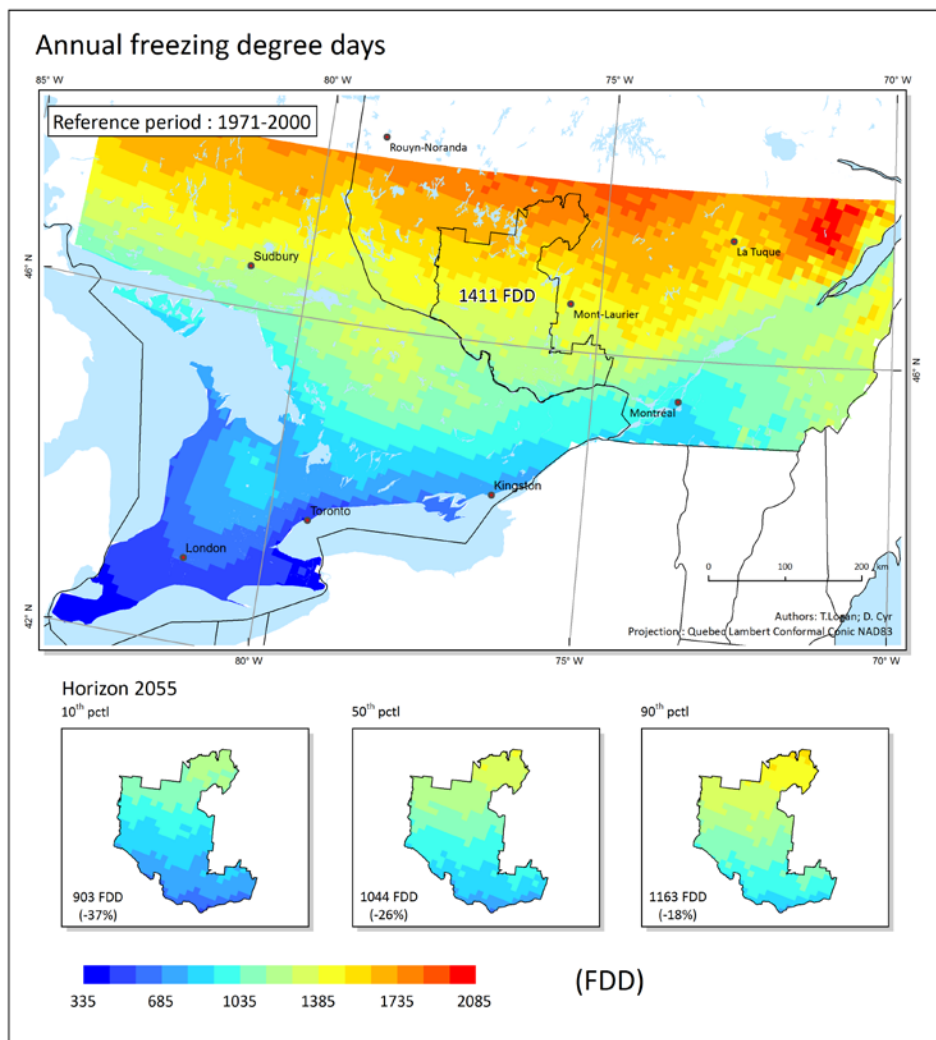


Figure 13. Degré-jours de gel annuel pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais.

À retenir :

- L'Outaouais aura à supporter beaucoup moins de degrés-jours de gel (26% moins). Par exemple, pour la région d'Ottawa, cela correspondra à ce qui est observé actuellement à Kingston;
- L'augmentation des degrés-jours de croissance est plus importante que la baisse des degrés-jours de gel ;

## b. Précipitations

Les signaux pouvant être dégagés des projections issues de CMIP3 pour les précipitations sont plus ambigus que pour les variables et indices thermiques présentés plus haut. Certaines tendances robustes peuvent néanmoins être dégagées, mais doivent être analysées en gardant à l'esprit que les projections des précipitations demeurent intrinsèquement liées à la température, notamment en ce qui a trait à la forme des précipitations (pluie ou neige). D'abord, une augmentation des précipitations annuelles totales (Figure 15) est projetée pour l'horizon 2055 en Outaouais, et ce, avec un consensus entre les simulations comprises entre le 10<sup>e</sup> et le 90<sup>e</sup> percentile de l'ensemble. La borne inférieure de l'enveloppe de projection (+3%; 10<sup>e</sup> percentile) suggère la possibilité d'un changement mineur, mais celui-ci pourrait tout aussi bien être substantiellement plus important s'il s'avère davantage similaire à la borne supérieure de l'enveloppe (+ 13%; 90<sup>e</sup> percentile).

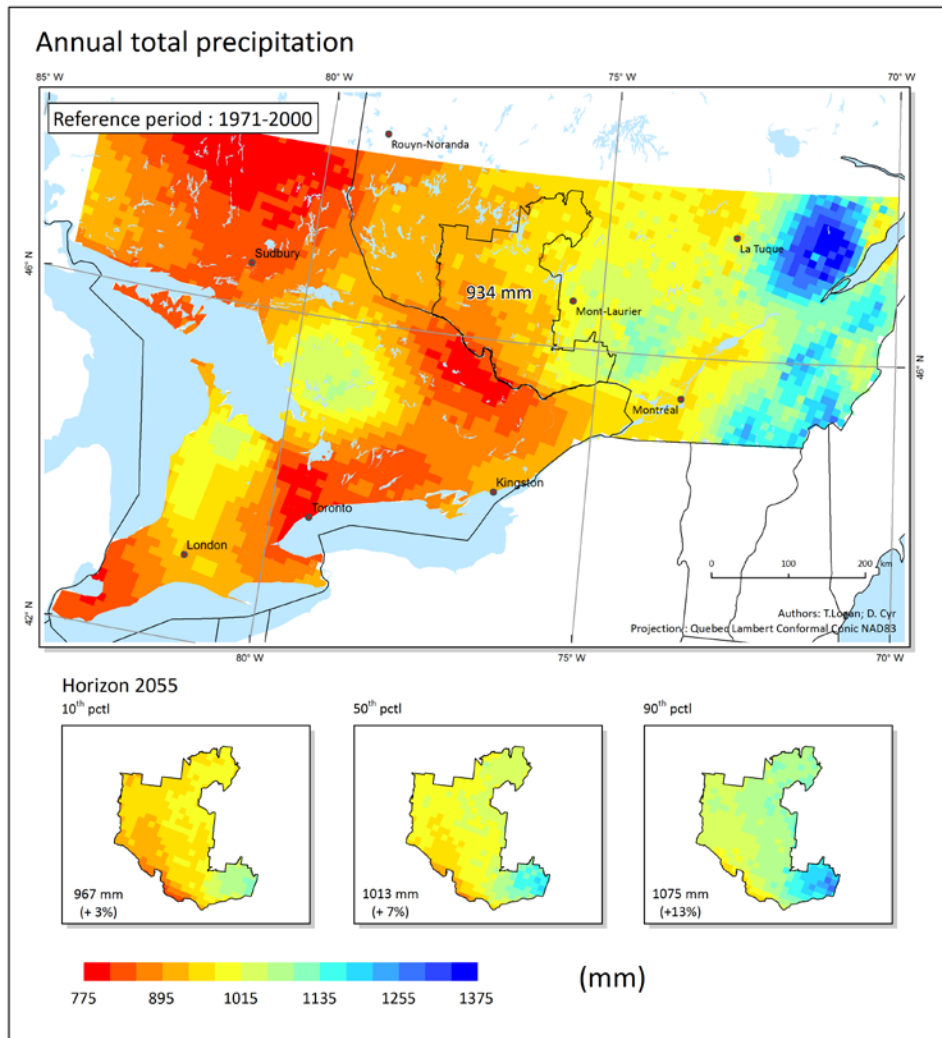


Figure 14. Précipitations annuelles (mm) actuelles et projetées pour la région de l'Outaouais.

À retenir :

- Une augmentation des précipitations sur une base annuelle est prévue pour la région de l'Outaouais (entre 3 et 13%) ;



Les impacts potentiels de telles variations de l'abondance des précipitations, par contre, dépendent pour la plupart du moment de l'année où elles tombent et/ou de la forme, notamment si elles tombent sous forme de pluie ou de neige. Les projections pour les précipitations estivales (Figure 16) présentent un signal médian neutre auquel est associée une enveloppe d'incertitude incluant autant la possibilité d'une augmentation que d'une réduction de leur abondance. En comparaison, les projections de l'abondance de précipitations sous forme de neige (Figure 17) est moins ambiguë et suggère une forte probabilité de réduction en dépit d'une augmentation des précipitations en hiver, pluie et neige cumulées (Figure 16). Cela s'explique bien évidemment par le réchauffement important et non-équivoque projeté tout au long de l'année, mais particulièrement en hiver, qui affectera les proportions relatives de précipitations qui tombent sous forme de pluie ou de neige. Cette baisse sera principalement observée durant le printemps et l'automne alors que pour les trois mois de l'hiver, ce sera sensiblement la même quantité (Tableau 1). Le recours à un modèle plus sophistiqué est nécessaire pour simuler le couvert de neige proprement dit. Il est en effet important de noter que les précipitations sous forme de neige relativement constantes en hiver ne se traduiront pas automatiquement par une constance de l'épaisseur et la persistance du couvert de neige, au contraire, puisque la vitesse de la fonte sera aussi affectée par des températures plus élevées et des précipitations liquides plus abondantes au cours des saisons froides.

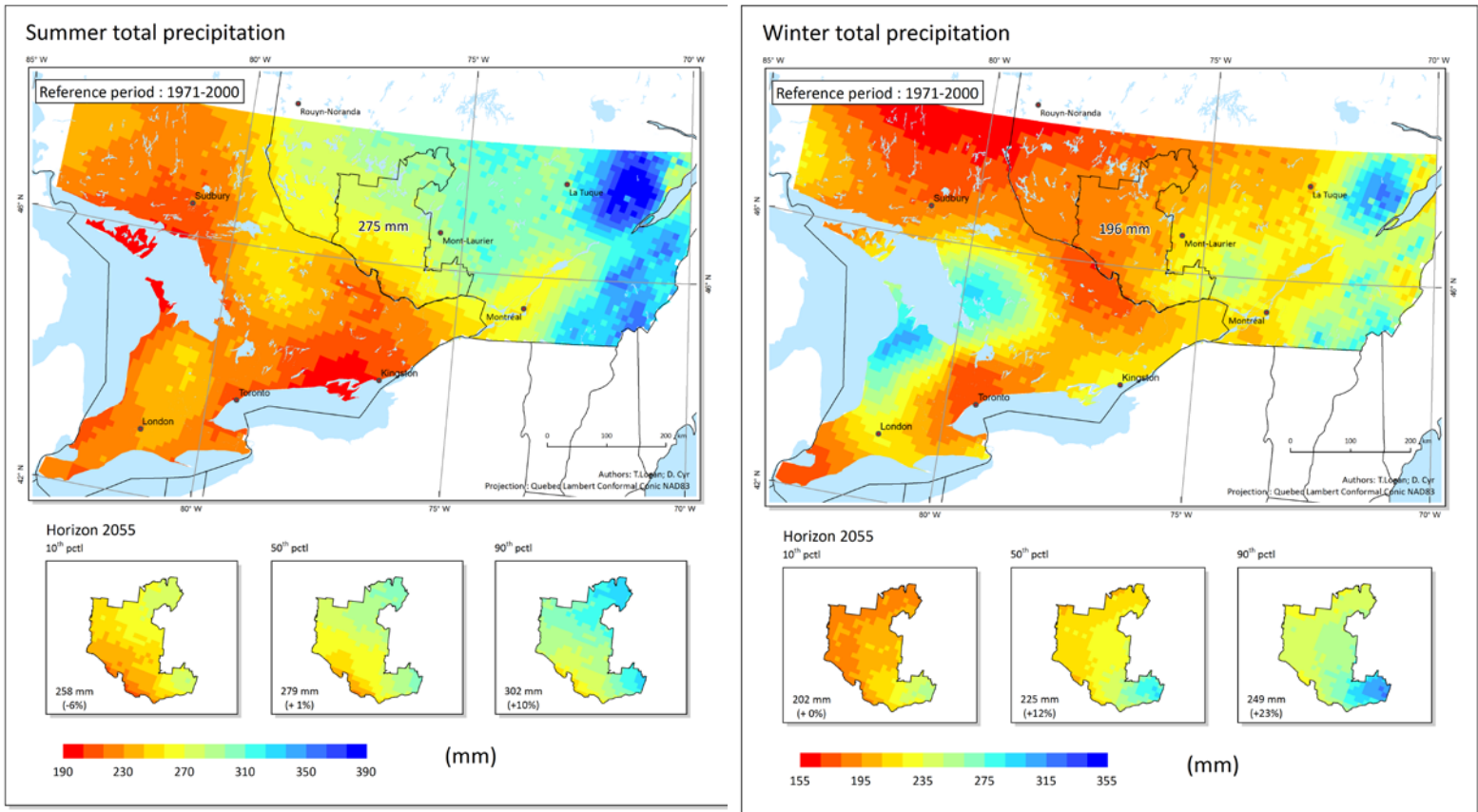


Figure 15. Précipitations estivales (juin, juillet et août) et hivernales (décembre, janvier, février).

**À retenir :**

- L'augmentation des précipitations se réalisera surtout durant l'hiver. En été, les précipitations seront sensiblement les mêmes ;

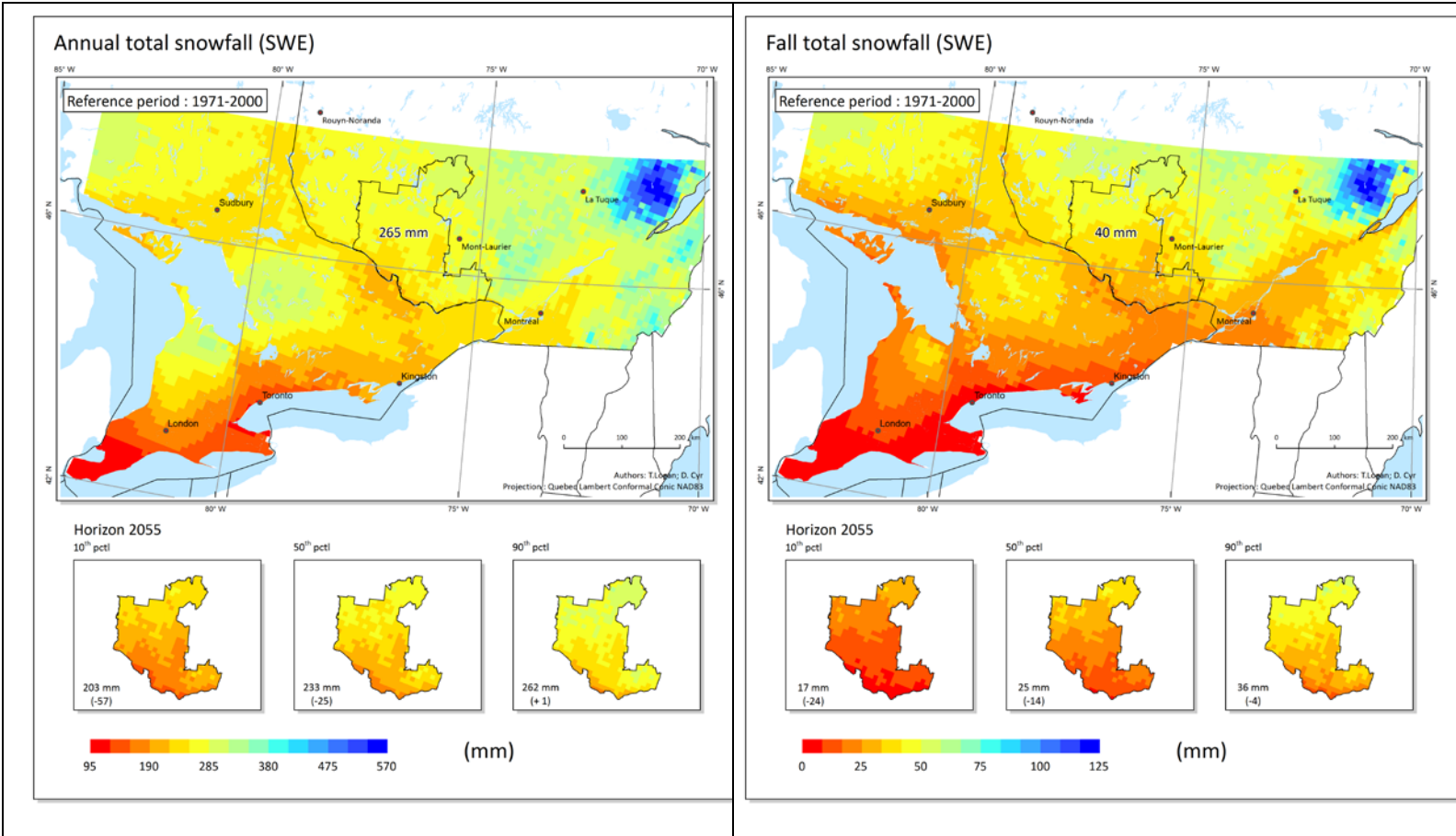


Figure 16. Précipitations sous forme de neige (équivalent en mm d'eau)

**À retenir :**

- Les précipitations neigeuses seront moins abondantes correspondant approximativement à 30 cm de moins ;
- En automne, la neige sera près de 2 fois moins abondante qu'actuellement;

## Synthèse

Le tableau (Tableau 1) suivant présente une synthèse de l'ensemble des informations présentées dans cette section. Pour les valeurs projetées, on peut penser que les valeurs du 10<sup>ème</sup> percentile correspondent à celles d'un scénario de changement climatique faible, les valeurs médiane à un scénario intermédiaire et les valeurs du 90<sup>ème</sup> percentile à un scénario fort. L'incertitude considérée ici correspond à l'écart entre le 10<sup>ème</sup> et le 90<sup>ème</sup> percentile.

Tableau 1. Tableau synthèse des projections des variables climatiques pour l'horizon 2040-2070 pour la région de l'Outaouais.

Variables	Acuel	Projeté			Incertitude
	Médiane	Médiane	10tiles	90tiles	
<b>Température et indices thermiques</b>					
Température quotidienne annuelle (°C)	3.3	2.4	1.7	3.7	2.0
Température quotidienne annuelle en été (°C)	17.0	2.3	1.5	3.2	1.7
Température quotidienne annuelle en automne (°C)	5.5	2.4	1.7	3.5	1.8
Température quotidienne annuelle en hiver (°C)	-12.1	<b>3.1</b>	2.1	<b>4.3</b>	2.2
Température quotidienne annuelle au printemps (°C)	2.7	2.0	1.2	<b>4.3</b>	<b>3.1</b>
Température quotidienne annuelle maximale (°C)	9.1	2.3	1.6	3.6	2.0
Température maximale quotidienne en été (°C)	23.3	2.2	1.3	3.4	2.1
Température maximale quotidienne en automne (°C)	10.3	2.4	1.6	3.5	1.9
Température maximale quotidienne en hiver (°C)	-6.3	<b>2.7</b>	1.7	3.6	1.9
Température maximale quotidienne au printemps (°C)	9	1.9	1.1	<b>4.2</b>	<b>3.1</b>
Température quotidienne annuelle minimale (°C)	-2.5	2.5	1.8	3.8	2.0
Température minimale quotidienne en été (°C)	10.5	2.3	1.5	3.1	1.6
Température minimale quotidienne en automne (°C)	0.7	2.4	1.8	3.5	1.7
Température minimale quotidienne en hiver (°C)	-14.5	<b>3.5</b>	2.2	<b>5.0</b>	<b>2.8</b>
Température minimale quotidienne au printemps (°C)	-3.6	2.1	1.3	<b>4.3</b>	<b>3.0</b>
Degrés-jours	1615	429	297	686	389
Durée de la saison de croissance (jours)	189	9	16	35	19
Degrés-jours de gel (<0°C)	1411	-367	-508	-248	260
<b>Précipitations</b>					
Précipitations annuelles moyennes (mm)	934	79	33	141	108
Précipitations moyennes en été (mm)	275	4	-17	27	44
Précipitations moyennes en automne (mm)	261	13	-12	46	58
Précipitations moyennes en hiver (mm)	202	32	12	56	44
Précipitations moyennes au printemps (mm)	196	29	6	53	47
Précipitations neigeuses (mm équivalent en eau)	265	-25	-57	1	58
Précipitations neigeuses en automne (mm équivalent en eau)	40	-14	-24	-4	20
Précipitations neigeuses en hiver (mm équivalent en eau)	175	0	-24	15	39
Précipitations neigeuses au printemps (mm équivalent en eau)	50	-11	-20	1	21
<b>Indices composite</b>					
Indice de sécheresse annuelle	157	7	-14	32	46
Indice de sécheresse annuelle au mois de juillet	212	8	-17	37	54
Indice de sécheresse annuelle au mois d'août	247	14	-19	48	67
Fréquence annuelle des événements de gel/dégel (#/an)	91	-8	-19	1	20
Fréquence annuelle des événements de gel/dégel en automne (#/an)	32	-9	-13	-4	9
Fréquence annuelle des événements de gel/dégel en hiver (#/an)	43	-6	-14	-3	11
Fréquence annuelle des événements de gel/dégel au printemps (#/an)	16	8	3	12	9

### c. Indices composites, saisonnalité, et épisodes de météo extrême

#### L'indice de sécheresse

Tout comme pour les précipitations à l'échelle annuelle, les projections de l'indice de sécheresse moyen présentent un signal ambigu. Les enveloppes de projection pour l'horizon 2055, définies par les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> percentiles, indiquent qu'une réduction ou une augmentation substantielle de la probabilité d'observer des valeurs élevées sont toutes deux possibles, et ce, autant pour l'ensemble de l'année que pour l'été (Figure 18, Figure 19, Figure 20).

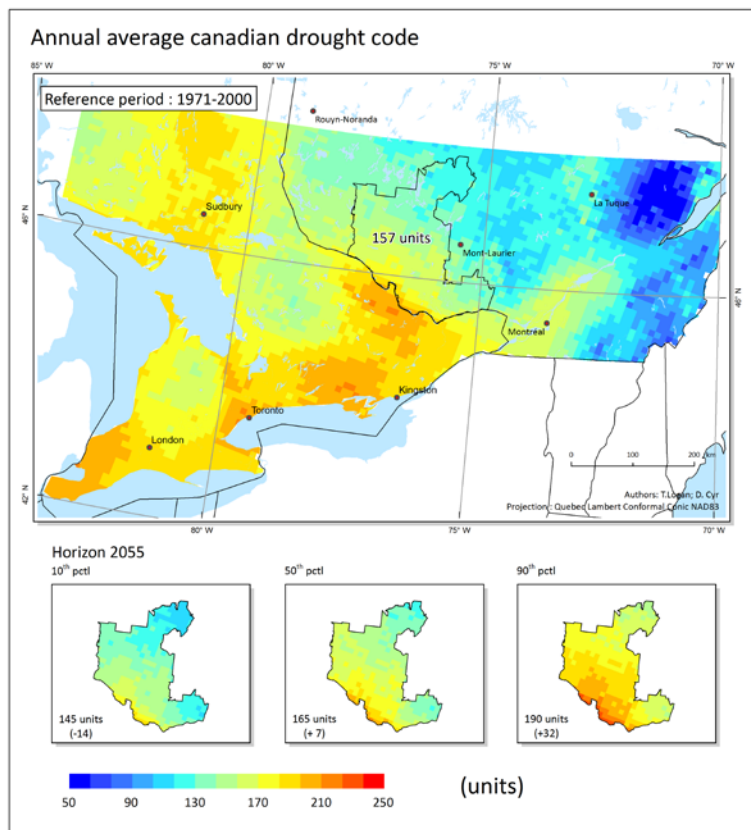


Figure 17. Indice de sécheresse annuelle projeté pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais.

#### À retenir :

- L'indice de sécheresse indique un risque important pour l'Outaouais que dans le cas plus sévère de changements climatiques (90<sup>ème</sup> percentile);

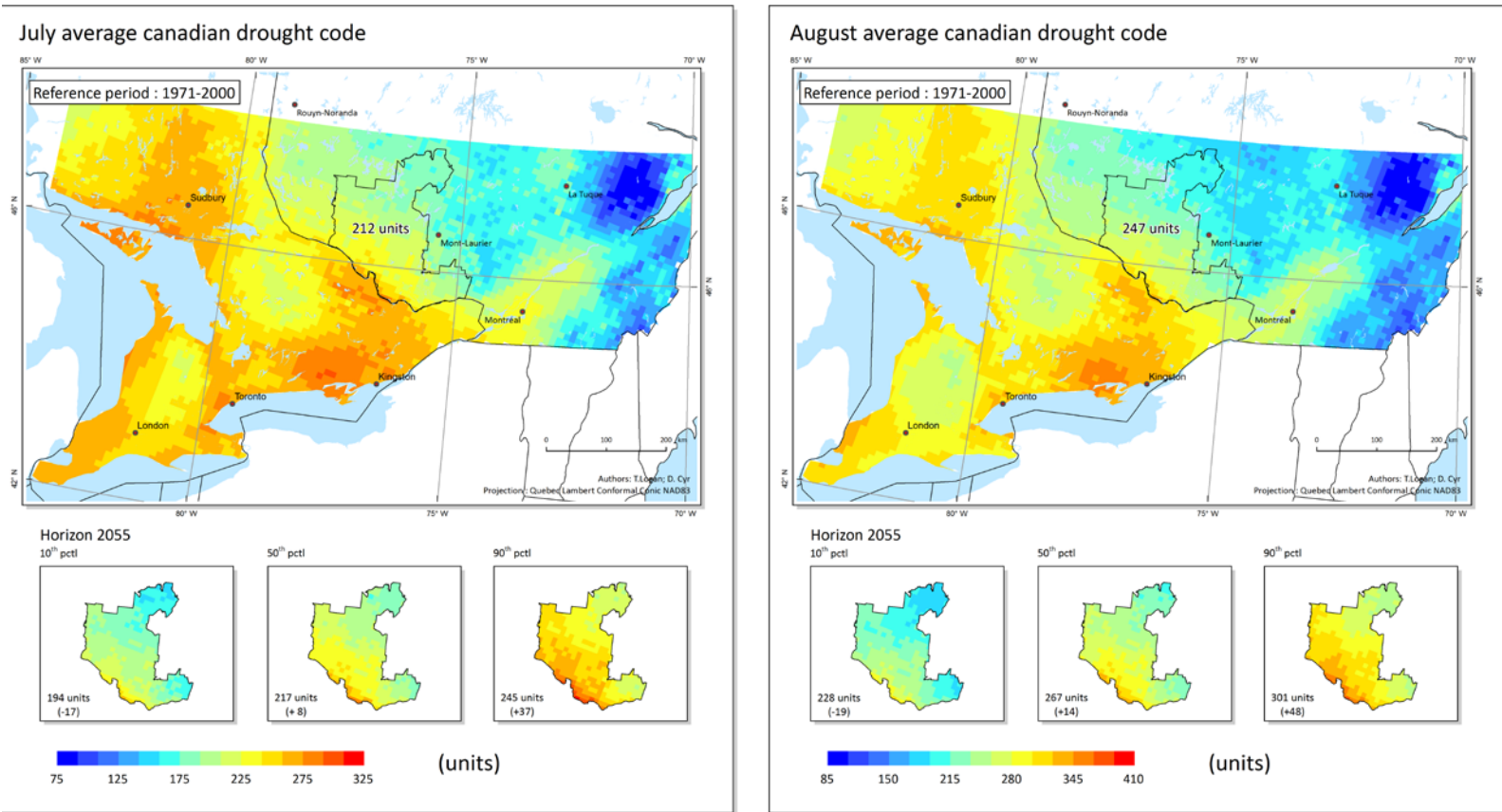


Figure 18. Indice de sécheresse projeté pour les mois de juillet et d'août pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais.

Par contre, un signal moins ambigu peut être dégagé pour l'horizon 2055 en ce qui a trait à la saisonnalité de cette variable. En effet, bien qu'aucun signal clair ne soit projeté en ce qui a trait aux valeurs saisonnières les plus élevées, généralement observées vers la fin août, il semble que les probabilités d'observer des valeurs élevées d'indices de sécheresse soient plus grandes en fin de saison et, dans une moindre mesure, au début de la saison (Figure 20). Ceci s'expliquerait principalement par une extension de la saison chaude.

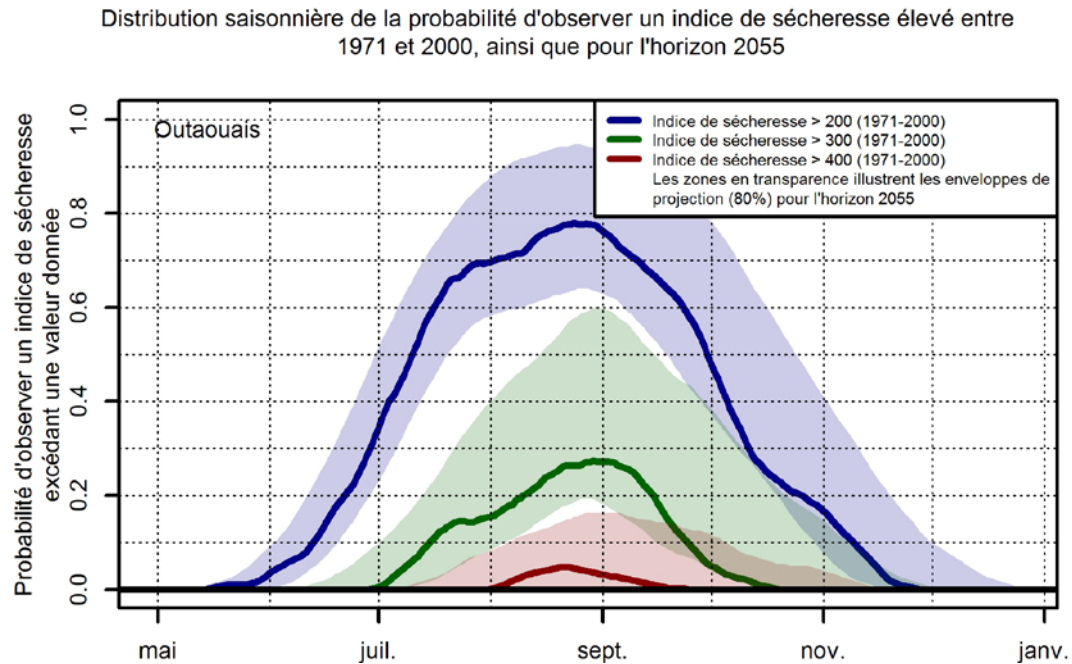


Figure 19. Variation saisonnière de la probabilité d'observer un indice de sécheresse d'un niveau modéré (200), élevé (300) et très élevé (400) pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais.

Néanmoins, après discussion avec des spécialistes, plusieurs attribuent ces valeurs à un effet trop important de la recharge en eau dans les sols de l'indice de sécheresse (T. Logan, comm. pers.), expliquant aussi pourquoi les modèles actuels semblent être trop conservateurs sur les probabilités des épisodes de sécheresse de moyenne et longue durée (Figure 20, Figure 25). Cette insensibilité proviendrait du manque de finesse dans le schéma du couvert de surface dans les modèles (Harvey 2012). Ainsi, d'après Harvey (2012), avec le nouveau schéma du couvert de surface de la prochaine génération du MRCC, on devrait observer plutôt une baisse de la disponibilité en eau de 30% dans les sols forestiers de l'Outaouais. Ces simulations sont appuyées par les expériences effectuées en forêt de réchauffement des sols à l'aide de fils chauffants (Houle 2012).

### Fréquence annuel des épisodes de gel/dégel

Peu ou pas de changement dans le nombre total d'épisodes de gel-dégels sont projetés en Outaouais pour l'horizon 2055 (Figure 21). C'est surtout la distribution annuelle de ces épisodes qui sera affectée, tel qu'illustré de façon non-équivoque par l'enveloppe de projection définie par les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> percentiles, qui suggère une réduction importante du nombre d'épisodes au printemps et en automne, réduction contrebalancée par une augmentation tout aussi importante tout au long de l'hiver. Conséquemment, la période sans gel estivale sera allongée. Bien que peu ou pas de changement ne soit projeté dans l'éventualité d'un réchauffement faible (10<sup>e</sup> percentile) pour l'horizon 2055, la période sans gel pourrait être allongée de plus d'un mois en début de saison, et jusqu'à deux ou trois semaines à la fin dans le cas d'un réchauffement intense (90<sup>e</sup> percentile). Ainsi, les probabilités maximales d'observer un cycle journalier de gel-dégel seront devancées d'environ deux semaines au printemps, tandis qu'elles seront retardées d'un peu plus d'une semaine à l'automne (Figure 22).

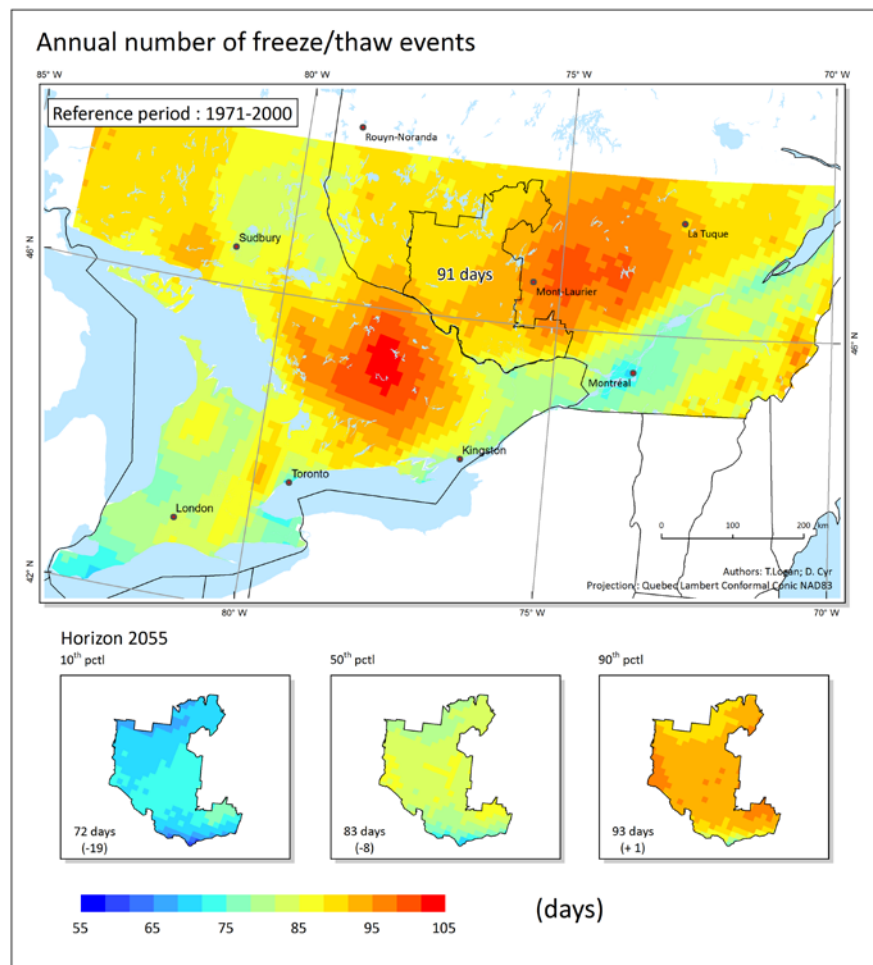


Figure 20. Fréquence annuelle des épisodes de gel/dégel pour la période 2040-2070 pour la région de l'Outaouais.



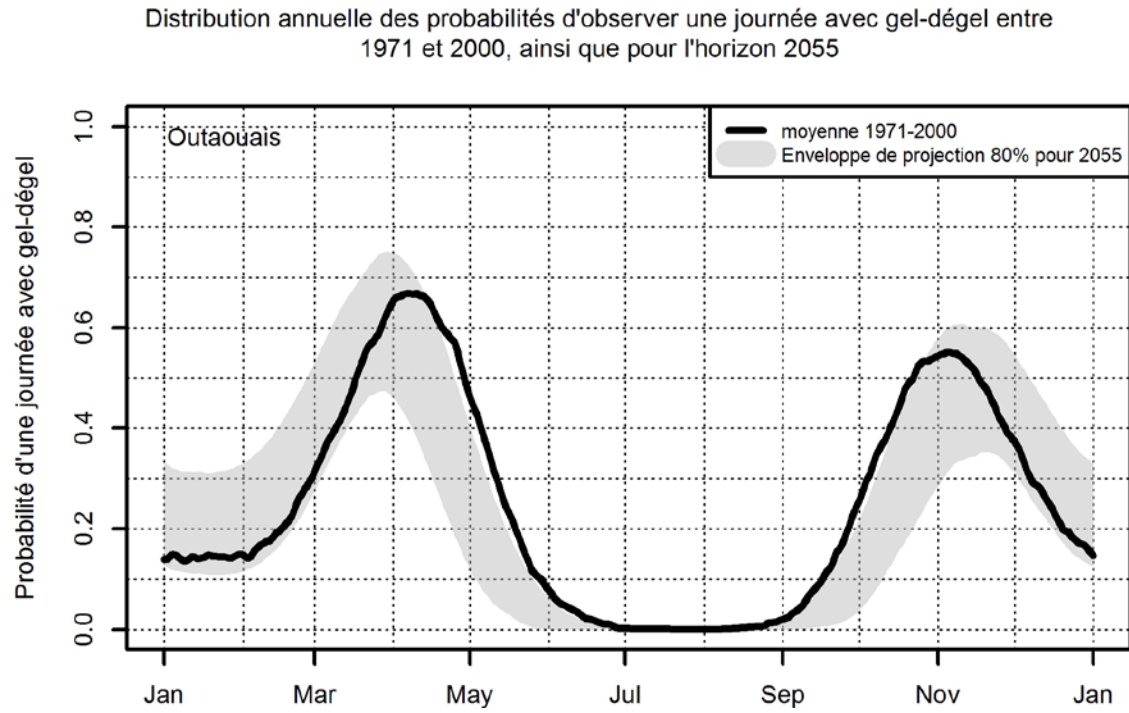


Figure 21. Distribution annuelle des probabilités d'observer une journée avec un épisode de gel-dégel pour la région de l'Outaouais.

### Épisode de chaleur intense

La durée et la fréquence des épisodes de chaleur intense ( $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ ; Figure 23) augmentera substantiellement en Outaouais pour l'horizon 2055, et ce, quel que soit l'ampleur du réchauffement. Même dans le cas d'un faible réchauffement, la fréquence de brefs épisodes de chaleur intense serait plus que doublée, tandis que les scénarios de réchauffement intense en multiplierait d'autant plus la fréquence, en plus de prolonger ces épisodes pour des durées n'ayant jamais été observées au cours de la période de référence.

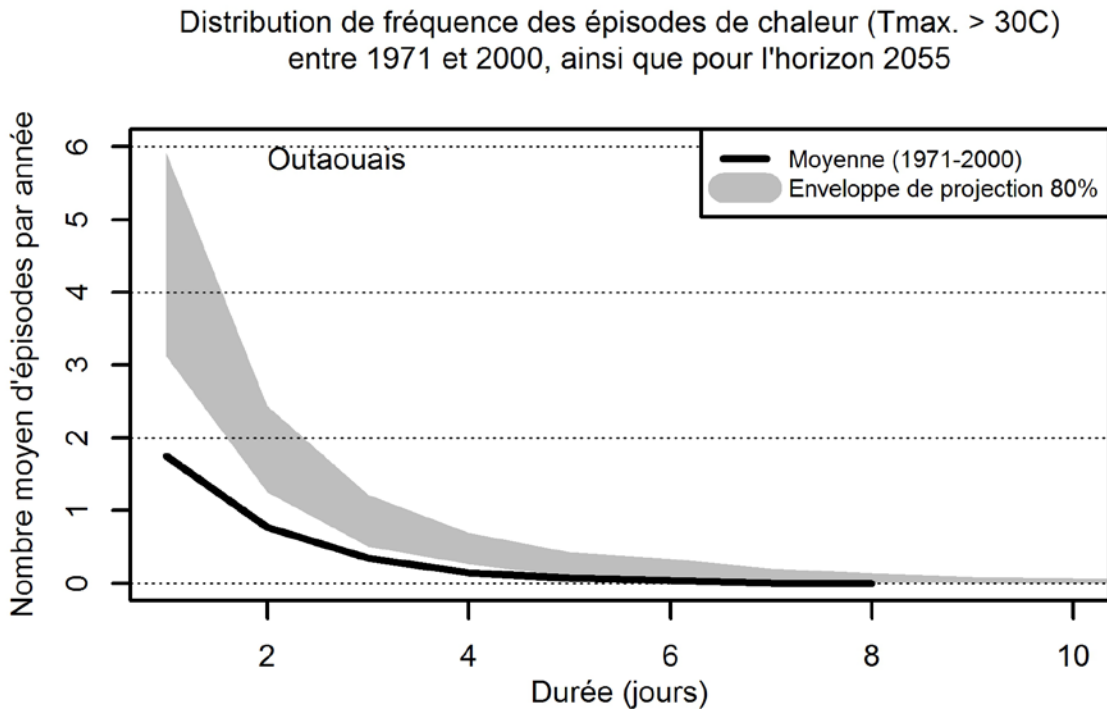


Figure 22. Distribution de fréquence des épisodes de chaleur intense ( $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) entre 1971 et 2000, ainsi que pour l'horizon 2055 pour la région de l'Outaouais.

### Fréquence des périodes de froid intense

Inversement, la durée et la fréquence des épisodes de froid intense ( $T_{\min} < -30^{\circ}\text{C}$ ; Figure 24) diminuera considérablement en Outaouais pour l'horizon 2055, et ce, quelle que soit l'ampleur du réchauffement. Dans le cas d'un réchauffement intense, ces épisodes, aujourd'hui nombreux et d'une durée pouvant s'étirer jusqu'à 4 ou 5 jours, pourraient être appelés à ne se produire qu'une fois par année ou moins, en moyenne.

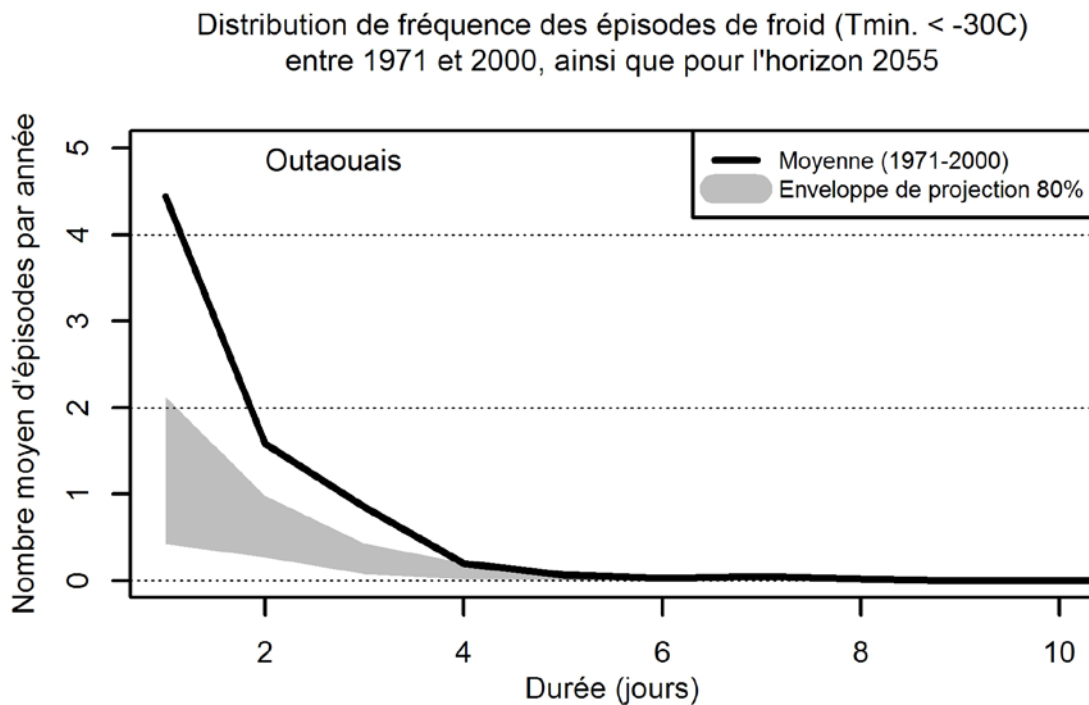


Figure 23. Distribution de fréquence des épisodes de froid intense ( $T_{\max} < -30^{\circ}\text{C}$ ) entre 1971 et 2000, ainsi que pour l'horizon 2055 pour la région de l'Outaouais.

### Fréquence des épisodes de sécheresse (Précip. < 1 mm)

Aucun changement substantiel ne semble être projeté en termes de fréquence et durée des épisodes de sécheresse pour l'horizon 2055 en se basant sur les simulations des modèles de circulation générale issues de CMIP3 (Figure 25). Par contre, il est important de rappeler que cette variable ne tient compte que de l'apport en eau par les précipitations. La disponibilité en eau dans les sols, par exemple, sera aussi fortement influencée par la température. Ainsi, par exemple, pour la région de l'Outaouais, Harvey (2012) prévoit un réchauffement du sol de 3.3 °C, ayant un impact direct sur la disponibilité en eau dans le sol.

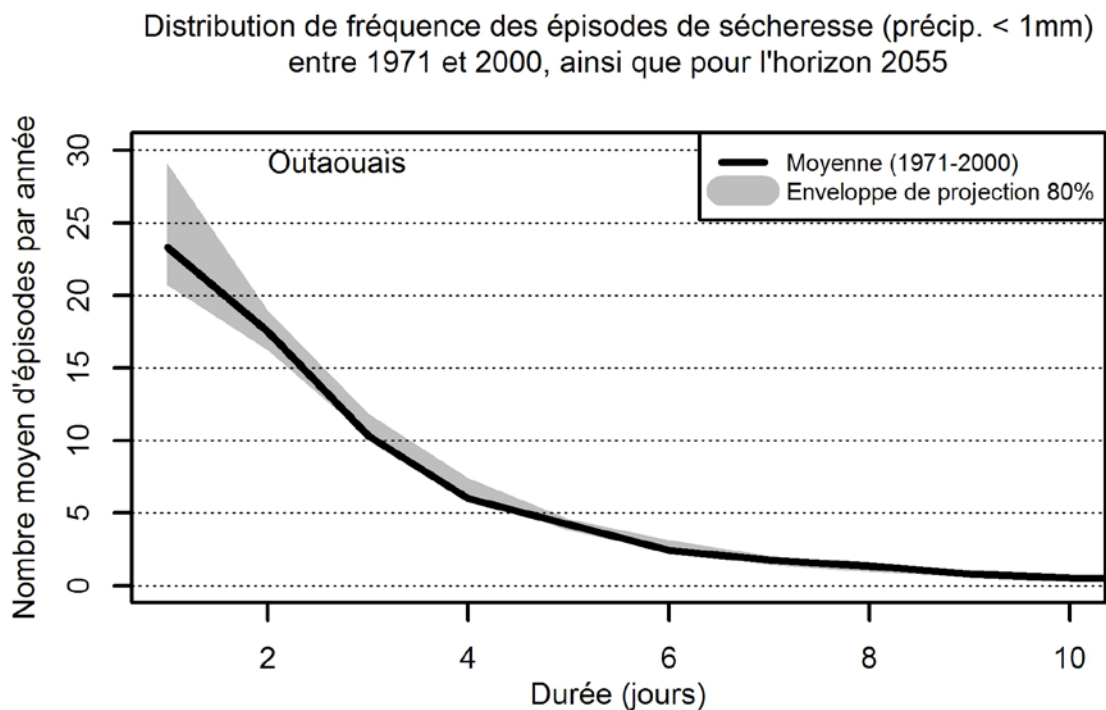


Figure 24. Distribution de fréquence des épisodes de sécheresse (Précip. < 1 mm) entre 1971 et 2000, ainsi que pour l'horizon 2055 pour la région de l'Outaouais.

#### d. Commentaire sur les épisodes de météo extrême.

La fréquence et l'intensité des événements de météo extrême ont de tout temps été déterminantes pour le fonctionnement des écosystèmes forestiers, pour les bénéfiques qui en sont tirés par les communautés humaines, et continueront de l'être dans le futur. Certaines variables et indices climatiques présentés plus haut fournissent certaines indications quant aux conditions futures de disponibilité en eau dans les couches profondes du sol (indice de sécheresse) ou des températures extrêmes (épisodes de grands froids ou de grandes chaleurs). L'utilité de ces indices simples a été démontrée à maintes reprises dans la littérature scientifique, l'indice de sécheresse étant couramment utilisé comme prédicteur de l'activité des feux et de la croissance des arbres sur certains types de stations (e.g. Girardin *et al.* 2006; Girardin et Wotton 2009; Hoffer et Tardif 2009), tandis que les épisodes de grands froids influencent grandement la dynamique d'importants ravageurs tels que le dendroctone du pin dans l'ouest du Canada (Bentz *et al.* 2010; Régnière *et al.* 2012; Safranyik *et al.* 2012), pour ne nommer que quelques exemples bien connus. De façon général toutefois, plus l'emphase est mise sur la portion extrême des projections, plus grande est l'incertitude qui lui est associée, et ce, pour plusieurs raisons. L'une des plus importantes d'entre elles touche particulièrement les extrêmes liés aux précipitations et aux vents en été, qui sont des phénomènes locaux beaucoup plus difficiles à simuler et, par conséquent, à projeter dans le futur puisqu'ils ont généralement cours à des échelles plus fines que celles imposées par la résolution spatiale des modèles climatiques globaux et régionaux. La projection des précipitations extrêmes et leurs conséquences sur l'hydrologie des bassins versants, et les infrastructures humaines en territoire forestier, par exemple, impliquent donc un traitement statistique de mise à l'échelle (*downscaling*) qui contribue à ajouter de l'incertitude souvent difficile à évaluer.

L'information disponible en ce qui a trait aux événements de météo extrême demeure donc limitée et l'incertitude qui lui est associée est grande, voire même indéfinie dans plusieurs cas. Évidemment, l'intensité et/ou la fréquence des extrêmes associés à la chaleur risquent d'augmenter tandis que celles des extrêmes associés au froid devraient diminuer, tel que l'indiquent les projections présentées plus haut. Il demeure toutefois que la variabilité climatique, et non seulement l'évolution des tendances centrales, est l'autre grand terme de l'équation dont on doit absolument tenir compte pour produire des projections valables de la probabilité d'observer des événements de météo extrême. Les progrès scientifiques récents ainsi qu'une importante accumulation d'observations empiriques supportent l'hypothèse selon laquelle le réchauffement du climat s'accompagne d'une augmentation de sa variabilité à l'échelle globale, autant en ce qui a trait aux températures journalières minimales et maximales que pour les précipitations, à l'échelle globale. Par contre, cela n'est pas nécessairement le cas partout dans le monde aux échelles régionales et locales, ni pour tous les types d'événements extrêmes (Peterson *et al.* 2012)..

## Références

- Aber, J., Ollinger, S., Fédérer, C. A., Reich, P., Goulden, M., Kicklighter, D., Melillo, J., et al. (1995). Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research*, 5(3), 207–222. doi:10.3354/cr005207
- Agriculture et agroalimentaire Canada. (2012). Données climatiques maillées. Retrieved September 28, 2012, from <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1227620138144&lang=eng>
- Annan, J. D., & Hargreaves, J. C. (2010). Reliability of the CMIP3 ensemble. *Geophysical Research Letters*, 37(2), 1–5. doi:10.1029/2009GL041994
- Arora, V. K., & Boer, G. J. (2005). A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. *Global Change Biology*, 11(1), 39–59. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00890.x
- Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C. J., Hansen, E. M., Hayes, J. L., Hicke, J. a., Kelsey, R. G., et al. (2010). Climate Change and Bark Beetles of the Western United States and Canada: Direct and Indirect Effects. *BioScience*, 60(8), 602–613. doi:10.1525/bio.2010.60.8.6
- Cox, R. M., & Zhu, X. B. (2003). Effects of simulated thaw on xylem cavitation, residual embolism, spring dieback and shoot growth in yellow birch. *Tree physiology*, 23(9), 615–24. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12750054>
- Duchesne, L., Houle, D., Côté, M.-A., & Logan, T. (2009). Modelling the effect of climate on maple syrup production in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 258(12), 2683–2689. doi:10.1016/j.foreco.2009.09.035
- GIEC. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. (R. Pachauri & A. Reisinger, Eds.) (p. 103). Genève, Suisse: GIEC.
- Girardin, M.P., Tardif, J. C., Flannigan, M. D., & Bergeron, Y. (2006). Forest Fire-Conducive Drought Variability in the Southern Canadian Boreal Forest and Associated Climatology Inferred from Tree Rings. *Canadian Water Resources Journal*, 31(4), 275–296. Retrieved from <http://www.freepatentsonline.com/article/Canadian-Water-Resources-Journal/163335572.html>
- Girardin, M.P., & Wotton, B. M. (2009). Summer Moisture and Wildfire Risks across Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3), 517–533. doi:10.1175/2008JAMC1996.1
- Harvey, R. 2012. Évolution future des régimes thermiques et hydrologiques des sols forestiers québécois telle que simulée par le MRCC. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Hoffer, M., & Tardif, J. C. (2009). False rings in jack pine and black spruce trees from eastern Manitoba as indicators of dry summers. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(9), 1722–1736. doi:10.1139/X09-088
- Houle, D. 2012. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc. Présentation orale présentée dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Symposium d'Ouranos sur les changements climatiques et l'adaptation. 19-21 novembre 2012, Montréal, Qc.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - Working Group II. (2007). *Climate Change 2007 - Impacts, adaptation and Vulnerability - Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the IPCC*. (M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, & C. E. Hanson, Eds.) (Cambridge., p. 976). Cambridge, UK.

Retrieved from

[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg2\\_report\\_impacts\\_adaptation\\_and\\_vulnerability.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm)

- Lafleur, B., Fenton, N. J., Paré, D., Simard, M., & Bergeron, Y. (2010). Contrasting Effects of Season and Method of Harvest on Soil Properties and the Growth of Black Spruce Regeneration in the Boreal Forested Peatlands of Eastern Canada. *Silva Fennica*, 44(5), 799–813.
- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., & Houle, D. (2011). *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise* (p. 124). Montréal. Retrieved from [http://www.ouranos.ca/media/publication/162\\_AtlasForet2011.pdf](http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011.pdf)
- Meehl, G. a., Covey, C., Taylor, K. E., Delworth, T., Stouffer, R. J., Latif, M., McAvaney, B., et al. (2007). The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383–1394. doi:10.1175/BAMS-88-9-1383
- Mpelasoka, F., & Chiew, F. (2009). Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10, 1168–1183. doi:10.1175/2009JHM1045.1
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., et al. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios by Working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 599). Cambridge, UK: Cambridge University Press. Retrieved from [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_sr/?src=/climate/ipcc/emission/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/)
- Ogden, A., & Innes, J. L. (2009). Application of structured decision making to an assessment of climate change vulnerabilities and adaptation options for sustainable forest management. *Ecology and Society*, 14(1). Retrieved from <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art11/>
- Peterson, T. C., Stott, P. A., & Herring, S. (2012). Explaining extreme events of 2011 from a climate perspective. *American Meteorological Society*, 93, 1041–1067. doi:10.1175/Bams-D-12-00021.1
- Régnière, J., St-Amant, R., & Duval, P. (2010). Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example. *Biological Invasions*, 14(8), 1571–1586. doi:10.1007/s10530-010-9918-1
- Safranyik, L., Carroll, A. L., Régnière, J., Langor, D. W., Riel, W. G., Shore, T. L., Peter, B., et al. (2012). Potential for range expansion of mountain pine beetle into the boreal forest of North America. *The Canadian Entomologist*, 142(5), 415–442. doi:10.4039/n08-CPA01
- Sanderson, B. M., & Knutti, R. (2012). On the interpretation of constrained climate model ensembles. *Geophysical Research Letters*, 39(16), L16708. doi:10.1029/2012GL052665
- Van Wagner, C. (1987). *Development and structure of the Canadian forest fire weather index system*. Forestry (p. 37). Ottawa. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Development+and+Structure+of+the+Canadian+Forest+Fire+Weather+Index+System#0>

## 4. Impacts appréhendés prioritaires

### *Introduction*

Après avoir décrit les impacts potentiels et caractérisé l'exposition aux conditions climatiques futures propres à la région de l'Outaouais, il est important de procéder à une analyse croisée avec les objectifs de développement et de protection des ressources naturelles et du territoire de la région. Pour ce faire, nous avons revu chacun des orientations/enjeux de développement pour le secteur forestier du PRDIRT sur la base 1) des risques que les impacts des changements climatiques les plus probables viennent mettre en péril l'atteinte de ceux-ci et 2) de l'importance des impacts qui en découlent sur les activités socio-économiques du secteur. Le croisement de ces informations permet alors d'identifier les impacts potentiels prioritaires.

### *Méthodes*

Objectifs de développement à risque du PRDIRT

Le PRDIRT de l'Outaouais fournit un cadre de référence intégré et des balises qui guident les interventions sectorielles des différentes parties prenantes en matière de mise en valeur et conservation des ressources naturelles et du territoire public de l'Outaouais (Commission régionale des Ressources naturelles et du Territoire de l'Outaouais 2011). Ses enjeux et orientations sont déclinés en 4 défis, en référence à la Stratégie d'Aménagement Forestier durable du Ministère des Ressources naturelles du Québec:

- Défi 1 : Des forêts et un secteur forestier qui contribuent à la lutte contre les changements climatiques;
- Défi 2 : Un milieu naturel productif et créateur de richesses diversifiées;
- Défi 3 : Une gestion des ressources naturelles du territoire qui intègre les valeurs et les besoins de la population outaouaise et des communautés autochtones;
- Défi 4 : Un aménagement du territoire qui assure la durabilité des écosystèmes.

À la lumière de la lecture des orientations et enjeux déclinés pour chacun des 4 défis, on constate que les changements climatiques pourraient poser un défi à l'atteinte des objectifs établis. Il convenait donc de reprendre chacun des objectifs des enjeux du PRDIRT pour évaluer le risque de non-atteinte de celui-ci. Pour ce faire, nous avons construit une grille d'analyse qui permet d'aligner les orientations, enjeux, priorités et objectifs du PRDIRT avec les impacts potentiels des changements climatiques, les activités de mise en valeur concernées et les mécanismes qui permettent d'expliquer la vulnérabilité du secteur forestier (Annexe 1 à 4). Cette grille reprend donc chacun objectif du PRDIRT et le croise avec les impacts



potentiels recensés (Section 2 précédente) qui sont jugés probables selon l'exposition aux changements climatiques projetés (Section 3 précédente). Ainsi exposées, il est possible de poser un diagnostic sur l'évaluation du risque. Le Tableau 2 suivant montre la séquence d'évaluation pour un objectif de l'enjeu 2.2.2 qui concernent les coûts d'approvisionnement, plus spécifiquement concernant les activités de planification forestière stratégique.

Tableau 2. Exemple d'évaluation du risque à la non-atteinte de l'objectif d'un enjeu.

Défi	2	Un milieu naturel productif et créateur de richesses diversifiées
Orientations du PRDIRT	2.2	Favoriser une industrie de mise en valeur des ressources naturelles et du territoire performante, productive et compétitive
Enjeux	2.2.2	Les coûts d'approvisionnement
Priorité		1
Objectifs		a) Contrôler l'ensemble des coûts de planification, de voirie, de récolte, de transport et de suivi.
Phénomène		Les phénomènes extrêmes et les perturbations catastrophiques seront plus fréquents. Plusieurs incertitudes existent aussi quant à la croissance et la mortalité et le recrutement des espèces.
Type d'impact		Climat sur les perturbations de la forêt.
Valeur		Matière ligneuse
Activités de mise en valeur		Planification stratégique
Impact		Perte de revenus et coûts accrus. Risque de ne pas respecter le rendement soutenu. Diminution de la possibilité forestière.
Mécanisme		Les CC amène plus de variabilité dans la disponibilité des volumes. Des incertitudes existent aussi quant à la croissance et la mortalité et le recrutement des espèces
Vulnérabilités/Opportunités		La replanification sera plus fréquente et moins ajustées à la réalité. La capacité d'ajustement à cette plus grande variabilité est limitée par les ressources, les expertises, les connaissances et les technologies à la disponibilité de la région.
Évaluation du risque		Très élevé

Il est donc vivement recommandé au lecteur d'y faire référence fréquemment pour la suite du texte.

## **Résultats**

- a. Défi 1 : Des forêts et un secteur forestier qui contribuent à la lutte contre les changements climatiques

À ce défi, on identifie deux enjeux pour lesquels les changements climatiques peuvent poser un problème dans l'atteinte des objectifs qui leur sont associés (Annexe 1).

### Enjeu 1.1.1 Optimisation et développement de la filière forêt-bois-énergie

Ce premier enjeu vise à contribuer davantage à la réduction des émissions de gaz à effet de serre au Québec via le développement accru d'une industrie forestière axée sur la biomasse à des fins énergétiques et les produits forestiers de longue durée de vie. L'objectif est de favoriser l'émergence de nouvelles entreprises ou de projet de valorisation de la biomasse à des fins énergétiques. Cet enjeu a été identifié comme une priorité de niveau un. Trois impacts potentiels pouvant nuire à l'atteinte de cet objectif ont retenu notre attention :

#### *Impact 1 : Augmentation des bois de récupération*

Une augmentation des phénomènes naturels extrêmes provoquera une augmentation de la disponibilité des bois de trituration. Ces bois sont généralement associés à des plans spéciaux de récupération et sont mis en priorité dans la cédule d'approvisionnement. Bien que la qualité de ces bois soit appropriée pour la filière biomasse, les coûts de récupération de cette matière première pourront s'avérer plus élevés. De plus, cela s'accompagnera aussi avec des coûts de planification accrus à mesure que des ajustements dans la planification opérationnelle seront requis. Néanmoins, cet impact n'annulera pas les efforts réalisés pour favoriser l'émergence de nouvelles entreprises en valorisation de la biomasse énergétique. C'est pourquoi nous évaluerons le risque en lien avec cet objectif de niveau faible.

#### *Impact 2 : Une mortalité diffuse accrue*

Le découplage entre la niche climatique et la distribution des espèces d'arbre est susceptible de provoquer une mortalité diffuse accrue (van Mantgem et Stephenson 2007, van Mantgem *et al.* 2009). Plusieurs des mécanismes impliqués dans cette mortalité diffuse accrue sont reliés à la sécheresse et à la chaleur (Allen *et al.* 2010). Ce type de mortalité rend extrêmement difficile, voire impossible, la récupération des bois morts. Une augmentation de la mortalité entraînera plus d'émissions de carbone dans l'atmosphère, qui viendra contrecarrer les efforts de stockage. Malgré l'importance de cet impact, nous estimons que le risque demeure modéré en regard de l'objectif de cet enjeu.

#### *Impact 3 : Dommages aux infrastructures accrues et ruptures d'accès au territoire*

Pour favoriser l'émergence d'une optimisation de la filière bois, de la production à la transformation, il est important d'avoir un réseau routier permettant l'accès à la ressource au moment opportun. Or, les perturbations, les événements naturels extrêmes comme les crues subites printanières, produiront des dommages importants aux infrastructures et risqueront de contraindre fortement l'accès au territoire. Nous évaluons ce risque de niveau modéré à élevé car il n'empêche pas l'atteinte de l'objectif mais rend beaucoup plus difficile l'optimisation de la filière bois/biomasse/énergie.

### Enjeu 1.2.1 Les impacts des changements climatiques

Pour cet enjeu, nous voyons que l'objectif de développer des modalités d'intervention carbone-neutre et de faire reconnaître la valeur des crédits carbone des forêts de l'Outaouais pourrait être à risque, compte tenu de certains impacts. Nous retenons qu'un seul impact susceptible de mettre en péril l'atteinte des objectifs associés à cet enjeu :

*Impact 1 : Augmentation des pertes en biomasse des zones certifiées*

Une variabilité plus grande dans les phénomènes naturels extrêmes (conditions climatiques et perturbations naturelles) pourra mettre en péril le maintien à long terme des zones de production de biomasse certifiées pour les crédits de carbone. Les phénomènes naturels extrêmes pourront anéantir les investissements verts. Cette perte de garantie de stockage pourra provoquer une perte de crédibilité et de la valeur des crédits carbone pour la région. Néanmoins, comme cet enjeu est associé à une priorité de niveau trois dans le PRDIRT (Commission régionale des Ressources naturelles et du Territoire de l'Outaouais 2011), nous estimons l'évaluation du risque à faible.

b. Défi 2 : Un milieu naturel productif et créateur de richesses diversifiées;

Ce défi comporte trois orientations et plusieurs enjeux pour lesquels les changements climatiques peuvent poser un problème dans l'atteinte des objectifs qui leur sont associés (Annexe 2).

**Orientation 2.1 : Accroître et diversifier l'offre de produits et services issus de la mise en valeur intégrée des ressources et du territoire**

Enjeu 2.1.1 Mise en valeur des ressources naturelles au profit de l'ensemble des utilisateurs et des communautés

Pour cet enjeu, nous voyons que l'objectif d'optimiser les retombées pour la population lors de la mise en valeur des ressources naturelles des forêts de l'Outaouais pourrait être à risque compte tenu de l'impact suivant :

*Impact 1 : Les connaissances sur la distribution et la dynamique des ressources moins fiables*

Les connaissances sur la distribution des ressources et sur la dynamique de la forêt seront moins fiables. Les changements climatiques amèneront des modifications au niveau de la dynamique de la forêt et des interactions entre les espèces; la production des espèces sera changée, de même que leur distribution et leur abondance. Cela entraînera des risques accrus pour les investissements et la planification territoriale parce que le niveau de connaissance sera moins fiable. Nous jugeons ce risque de niveau modéré à élevé compte tenu habituellement de l'importance des investissements en connaissance du territoire et de ses ressources et en planification forestière.

Enjeu 2.1.2 Le développement de la mise en valeur des PFNL

Pour cet enjeu, l'objectif principal consiste à évaluer le potentiel de développement et les retombées économiques des produits forestiers non ligneux :

*Impact 1 : Interruption des processus phénologiques menant à la maturation des PFNL*

Des variations climatiques saisonnières (épisodes de gel/dégel, de pluies abondantes durant l'été, épisodes de sécheresse prolongés et plus fréquents) et interannuelles plus fréquentes affecteront la

production (quantité) et la saisonnalité. En effet, les conditions extrêmes affectent la phénologie (floraison, pollinisation et fructification) des espèces végétales productrices de PFNL (ex: petits fruits, champignons). Il sera ainsi plus difficile d'ajuster la saison de récolte avec la production. Néanmoins, pour certains produits, une saison de croissance plus longue pourra favoriser la croissance des PFNL et ainsi permettre une production accrue (opportunité). Considérant tout cela, nous estimons le risque de non-atteinte de l'objectif de niveau faible à modéré.

*Impact 2 : Réduction de la fructification des champignons comestibles*

Les champignons ont besoin de pluie pour leur fructification. La réduction de la disponibilité en eau dans le sol est estimée importante en Outaouais. Cela risque d'entraîner une réduction de la production de champignons, dont ceux comestibles. On observe effectivement un gradient d'augmentation de la production du sud de la forêt tempérée au nord de la forêt boréale. Cependant, aucune étude ne nous permet de prédire avec certitude cet impact sur l'objectif de mise en valeur de cette ressource en Outaouais. Nous l'estimons de niveau modéré.

Enjeu 2.1.3 La prospection et le développement d'une activité économique découlant de la mise en valeur des potentiels récréatifs

Pour cet enjeu, l'objectif principal consiste à développer et promouvoir le secteur récréotouristique. Les impacts associés à cet objectif concernent l'offre hivernale et l'accès au territoire :

*Impact 1 : Durée de la saison hivernale réduite / Incertitude sur la période et sa durée*

Un couvert nival moins épais défavorisera les activités récréotouristiques hivernales (motoneige, ski de fond, raquette, etc.) entraînant une diminution de l'activité économique (diminution des accès des véhicules hors-route, diminution de l'achalandage des pourvoiries). Néanmoins, cette perte pourra être compensée par une durée prolongée de la période estivale. L'impact économique se fera donc sur le différentiel de valeur d'une journée d'activité récréotouristique selon la saison. Nous estimons donc comme faible à modéré le risque associé à cet objectif pour l'Outaouais.

*Impact 2 : Rupture d'accès au territoire*

L'accès au territoire pour les activités récréotouristiques est une composante cruciale de sous-secteur. Une diminution de la durée durant laquelle l'épaisseur de la glace sur les lacs permet de s'y déplacer en motoneige pourra entraîner une diminution de l'activité économique de ce secteur (diminution des accès VHR, motoneige, pêche sur glace). Cet impact est néanmoins estimé comme faible pour l'Outaouais. En contrepartie, le risque de rupture d'accès durée la saison estivale pour des raisons de bris d'infrastructures routières (coup d'eau détruisant une traverse de cours d'eau) aura des conséquences majeurs sur le sous-secteur, tout comme pour le secteur de l'approvisionnement en matière ligneuse (voir enjeu 2.2.2, impact 2). Compte tenu de l'importance du récréotourisme en Outaouais, le risque est donc jugé de niveau très élevé.

### *Impact 3 : Sécurité civile*

L'augmentation de la fréquence / intensité / sévérité / étendue des feux catastrophiques découlant de l'effet des changements du climat sur les perturbations pourra faire augmenter les risques pour la sécurité des usagers en forêt. Les perturbations peuvent mettre en péril la vie des gens qui se trouvent en forêt ou y habitent. Ceci pourra entraîner des coûts accrus d'opération de sauvetage et parfois une perte d'attrait pour les activités en forêt à cause du risque (durant la saison des feux). Pour la région de l'Outaouais, le consensus sur le régime de feux n'est pas encore très certain mais des augmentations sont prévues à cause d'une augmentation de la durée de la saison de feu et des conditions de sécheresse plus fréquente. Néanmoins, la végétation feuillue étant peu inflammable, il est difficile d'entrevoir le résultat final. Pour cette raison, nous avons estimé ce risque comme étant de niveau faible.

#### Enjeu 2.1.5 L'amélioration de l'offre de produits et services récréatifs de qualité

L'objectif de cet enjeu vise à développer et promouvoir le secteur récréotouristique.

### *Impact 1 : Diminution de la qualité esthétique des paysages*

Une augmentation de la fréquence / intensité / sévérité / étendue des perturbations catastrophiques (chablis, épidémies d'insectes, feux) aura des répercussions sur l'esthétisme du paysage. Les récréationnistes ont tendance à moins apprécier les paysages jeunes ou perturbés pour y réaliser des activités de récréation en forêt (camping, VHR, chasse & pêche, canoe kayak, écotourisme, randonnée, villégiature). Les pertes d'attrait pour le territoire pourront occasionner des pertes de revenus. Bien que les probabilités que les effets des perturbations soient accrues sur les paysages, nous estimons que l'impact sur l'objectif demeure faible à modéré.

### **Orientation 2.2 Favoriser une industrie de mise en valeur des ressources naturelles et du territoire performante, productive et compétitive**

#### Enjeu 2.2.2 et Enjeu 2.2.3. Les coûts d'approvisionnement et l'approvisionnement en volume de matière ligneuse

Ces deux enjeux sont traités ici en même temps car les impacts sont intimement liés dans leurs mécanismes. Ainsi, l'objectif de l'enjeu 2.2.2 est de contrôler l'ensemble des coûts de planification, de voirie, de récolte, de transport et de suivi afin de pouvoir optimiser la chaîne de production des produits forestiers alors que l'objectif de l'enjeu 2.2.3 est de maintenir ou d'augmenter les volumes disponibles sur les superficies destinées à la production ligneuse. Les changements climatiques limitent hautement l'atteinte de ceux-ci à cause des impacts suivants :

*Impact 1 : Un moins bon contrôle sur les coûts associés à la récolte de la matière ligneuse*

Les changements climatiques risquent d'entraîner des augmentations dans la variabilité, que ce soit saisonnière ou interannuelle. De plus, les phénomènes extrêmes et les perturbations catastrophiques pourront devenir plus fréquents. Conséquemment, plusieurs incertitudes existent quant à la croissance et la mortalité et le recrutement des espèces. Ainsi, l'objectif de contrôler l'ensemble des coûts de planification, de voirie, de récolte, de transport et de suivi afin de pouvoir optimiser la chaîne de production des produits forestiers est sérieusement compromis dans un contexte où les stocks de matière ligneuse seront moins prévisibles. Ces impacts pourront donc occasionner des pertes de revenus et accroissements des coûts importants. De plus, le risque de ne pas respecter le rendement soutenu et d'observer des fluctuations et des diminutions de la possibilité forestière n'offre pas un environnement d'affaires favorable au secteur forestier. Cet enjeu a été jugé prioritaire dans le contexte de l'aménagement de la forêt de l'Outaouais compte tenu de la situation économique du secteur; la marge bénéficiaire des transformateurs est très mince actuellement compte tenu des contraintes et des exigences d'aménagement. La capacité d'ajustement à une plus grande variabilité du contexte décisionnel est déjà limitée par les ressources, les expertises, les connaissances et les technologies disponible en région. Nous estimons donc que ce risque de perte de contrôle des coûts aura un impact très important sur cet enjeu et la vitalité économique du secteur de la région.

*Impact 2 : Un réseau routier plus fréquemment interrompue entraînant une perte d'accès au territoire*

Le PRDIRT traite à plusieurs reprises de l'importance du réseau routier. Il fixe même l'objectif d'améliorer la qualité des chemins forestiers. Or, l'augmentation des crues subites aura un impact important sur les infrastructures d'accès au territoire. En effet, les dégels printaniers hâtifs accompagnés de précipitations sous forme liquide accrues en hiver et au printemps provoqueront des crues subites avec des débits de pointe supérieurs à la capacité des ouvrages de traverse de cours d'eau. Les perturbations pourront détruire aussi certaines de ces infrastructures ou faire tomber des arbres sur celles-ci. Les bris plus fréquents de ces infrastructures qui demandent à être remplacées entraîneront une augmentation des coûts. Mais plus important encore seront les pertes occasionnées par la rupture d'accès au territoire pendant les périodes d'activités de récolte prévues. De plus, cet impact concerne plusieurs enjeux et est donc considéré trans-sectoriel (par exemple, l'enjeu 2.3.1, qui vise le maintien de l'accessibilité aux ressources naturelles par un réseau routier stratégique durable). Nous estimons donc que cet impact pourra limiter fortement l'atteinte de cet objectif et il est jugé de niveau très élevé.

Enjeu 2.2.4 L'approvisionnement en bois de qualité

Cet enjeu a pour objectif dans le PRDIRT d'augmenter le volume de bois de qualité livré aux usines à court, moyen et long termes.

*Impact 1 : Perte de qualité du bois et d'espèce de bois de qualité*

Bien que la biologie de la qualité des tiges et du bois des arbres soit très peu connue et très complexe, on peut penser que l'augmentation de la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes et des perturbations catastrophiques, l'arrivée potentielle de nouveaux pathogènes, le changement dans la croissance et la mortalité des espèces, tout cela puissent entraîner des risques de blessures aux arbres et des pertes de qualité à court et moyen terme. Outre les effets directs du climat sur la qualité des tiges et du bois, à plus long terme, le changement de composition des espèces pourra réduire le pourcentage des espèces de grande valeur en forêt. Par exemple, une réduction de l'importance du bouleau jaune au profit d'autres espèces de moindres valeurs (peuplier et bouleau à papier) est attendue. C'est deux phénomènes pourront entraîner une baisse du ratio bois de qualité/bois de trituration dans le panier de produits issus des opérations de récolte en forêt. Compte tenu des enjeux économiques associés à cette question pour la région, nous estimons le risque de ne pas atteindre cet objectif de niveau très élevé.

Enjeu 2.2.5 L'optimisation et le développement de la filière forêt-bois

L'objectif de cet enjeu est de valoriser la filière des bois de trituration.

Les impacts associés à cet enjeu sont déjà couverts dans les enjeux sur les coûts (2.2.2) et la stabilité de l'approvisionnement (2.2.3) en matière ligneuse. Il est même à prévoir que cette filière pourra bénéficier d'une augmentation de disponibilité en bois compte tenu de l'importance des bois de récupération, du changement de ratio bois de qualité/bois de trituration. Pour cette raison, nous estimons le risque de ne pas atteindre cet objectif de niveau faible à modéré.

Enjeu 2.2.6 Le développement d'une relève dans les domaines traditionnels des activités de prélèvement de la faune

L'objectif de cet enjeu est d'augmenter le nombre de personnes qui pratiquent de façon récurrente des activités cynégétiques (chasse, pêche, trappage).

*Impact 1 : Diminution de la saison de trappage*

La diminution de la durée de la saison hivernale due à l'effet direct des changements climatiques aura des répercussions sur la qualité des fourrures et la durée de la saison de trappage. De plus, une réduction du couvert nival et sa durée aura un impact sur les déplacements en motoneige le long des lignes de trappe, souvent avantagés par l'utilisation de la glace des lacs et cours d'eau. Cette réflexion peut s'appliquer aussi sur le mode de vie ancestral des autochtones (Enjeu 3.1.4) et sera traité plus loin. Tous ces impacts risquent de diminuer l'activité de trappage. Néanmoins, il se peut que cette diminution soit compensée par une augmentation de la durée estivale et favorise le développement d'une clientèle pratiquant la pêche. Nous estimons donc le risque de ne pas atteindre cet objectif comme faible.

### Enjeu 2.2.7 Le maintien d'une activité économique viable découlant de la mise en valeur des ressources fauniques

Cet enjeu est estimé crucial pour la région de l'Outaouais car les revenus provenant de ce secteur d'activité sont très importants. L'objectif qui lui est associé dans le PRDIRT est de favoriser le développement des activités de mise en valeur des ressources dans un principe de viabilité économique à long terme. Deux impacts des changements climatiques peuvent lui être associés d'après nous :

*Impact 1 : Un changement important dans l'offre des espèces sportives est à prévoir, autant en matière de gibiers, de taux de prélèvement que de saisons de prélèvement.*

Les changements climatiques auront des impacts importants sur la distribution des espèces, leur comportement, la dynamique des populations et leurs réponses phénologiques. De plus, leur habitat et les ressources qu'elles y puisent pour réaliser leurs activités vitales risquent de changer. Il se pourrait donc que certaines espèces sportives ne puissent s'adapter à ces nouvelles conditions. Un changement dans la distribution de l'espèce peut changer la position concurrentielle de la région par rapport aux autres régions à ce qui concerne une offre exclusive. Par exemple, le dindon sauvage pourra s'étendre à d'autres régions, qui pourront en faire une offre concurrentielle à celle de l'Outaouais. Mentionnons que tout cela pourra néanmoins être compensé par l'arrivée de nouvelles espèces sportives prisées (comme ce fut le cas pour le dindon qui est arrivé récemment en Outaouais). Nous estimons cet impact comme très élevé en lien avec l'objectif de cet enjeu.

*Impact 2 : Des conditions moins optimales pour les salmonidés.*

Pour les salmonidés, plusieurs habitats n'offriront plus les conditions requises pour des populations en santé. Par exemple, plusieurs lacs à truite pourraient ne plus être l'habitat adéquat pour cette espèce sportive suite à un réchauffement de l'eau du lac. De plus, les crues subites pourront augmenter l'érosion et la sédimentation, ce qui pourrait amener un colmatage des frayères, ou du moins une variabilité spatio-temporelle de la qualité des frayères compromettant le recrutement des alevins. Ainsi, les investissements pour le maintien des populations de truites risquent d'être accrus et les efforts réalisés jusqu'à présent en ensemencement en truite dans les lacs annulés. Le risque à la non-atteinte de cet objectif est évalué de niveau modéré car des espèces sportives alternatives pourront être offertes à la clientèle.

### Enjeux de gestion du secteur récréotouristique (2.2.8 à 2.2.11)

Les changements climatiques pourront avoir des impacts indirects non-marginaux sur les enjeux de gestion du secteur récréotouristique (La méconnaissance de l'offre récréotouristique en Outaouais (2.2.8), Le maintien de l'interconnexion des réseaux de sentiers récréatifs (2.2.9), Le maintien d'une activité économique découlant du développement de la villégiature individuelle (2.2.10), L'insuffisance des emplacements disponibles pour le développement de la villégiature traditionnelle (2.2.11)). Néanmoins, ceux-ci demeurent difficilement discernables sans une étude de vulnérabilité approfondie. Pour cette raison, ses enjeux ne sont pas traités ici.



### **Orientation 2.3 Maintenir l'accessibilité aux ressources naturelles par un réseau routier adéquat**

#### Enjeu 2.2.2 Le maintien de l'accessibilité aux ressources naturelles par un réseau routier stratégique durable

Cet enjeu est la nature trans-sectoriel, les impacts associés à cet enjeu sont sensiblement les mêmes que ceux identifiés aux enjeux 1.1.1, 2.1.3, 2.2.2 et 2.2.3.

- c. Défi 3 : Une gestion des ressources naturelles du territoire qui intègre les valeurs et les besoins de la population outaouaise et des communautés autochtones;

Ce défi comporte des orientations qui visent à favoriser la gestion participative des communautés et l'intégration de leurs valeurs et besoins de celles-ci dans la planification. Ainsi, plusieurs des orientations associées à ce défi touchent plutôt les aspects de la capacité d'adaptation de la communauté d'acteurs du secteur (Enjeux 3.1.5 à 3.1.8, par exemple). Nous retenons ici seulement les orientations qui seront impactées par les changements climatiques. Néanmoins, ce défi et ses orientations ouvre la réflexion sur les questions de la capacité d'adaptation et des barrières à la mise en œuvre des mesures d'adaptation, des questions qui ne peuvent être explorées que dans une analyse explicite de la vulnérabilité et de l'adaptation aux changements climatiques et qui ne peut être couverte par cet avis scientifique.

On retient une orientation et deux enjeux pour lesquels les changements climatiques peuvent poser un problème dans l'atteinte des objectifs qui leur sont associés (Annexe 3).

#### Orientations 3.1 Accentuer le dialogue avec la population et rapprocher les lieux de décision des citoyens, des collectivités et des communautés autochtones

##### *Enjeu 3.1.3 Le maintien de la qualité des paysages en milieu forestier*

Les impacts associés à cet enjeu sont couverts via l'enjeu 2.1.5. L'objectif associé à cet enjeu, qui consiste à identifier, classifier et cartographier les secteurs d'intérêt majeur et les paysages sensibles, supporte celui de la protection des paysages sensibles. Or, comme discuté via l'enjeu 2.1.5, l'augmentation de la fréquence et de l'importance de perturbations naturelles pourra avoir un impact sur la valeur esthétique des paysages, leur capacité d'attrait et leur valeur patrimoniale (identité paysagère). Nous considérerons le risque associé à la non-atteinte des objectifs de cet enjeu de niveau faible à modéré.

*Enjeu 3.1.4 La reconnaissance de l'identité, de la culture et des intérêts des Premières Nations dans une démarche solidaire de développement durable*

Le mode de vie traditionnel des premières nations est intimement lié avec les cycles vitaux des différents organismes, et cela dans leurs différents niveaux d'organisation. Les changements climatiques menacent les activités traditionnelles autant que la valeur du savoir traditionnel des autochtones. En effet, plusieurs des activités sont réglées sur les variations saisonnières des réponses phénologiques des organismes et les patrons récurrents du comportement des organismes. Par exemple, comme mentionné pour l'enjeu 2.1.5 en lien avec la durée de saison de trappage, l'accès au territoire pour les autochtones passe beaucoup par l'utilisation de la motoneige. La réduction de la période de couvert nival et de glace influencera le mode de vie traditionnel des autochtones. Compte tenu de leur dépendance au territoire et à son fonctionnement naturel tel qu'expérimenté par le passé, nous estimons la menace des changements climatiques sur le patrimoine culturel et de savoir autochtone traditionnel comme un risque élevé de ne pas atteindre les objectifs de cet enjeu.

d. Défi 4 : Un aménagement du territoire qui assure la durabilité des écosystèmes;

Compte tenu des orientations plus écocentriques exprimées dans le nouveau projet de loi forestière, les enjeux de durabilité des écosystèmes deviennent centraux pour le développement du territoire. En effet, l'aménagement écosystémique demande de considérer des dimensions visant à maintenir, voire restaurer la naturalité du territoire forestier. Conséquemment, plusieurs objectifs découlant des orientations et enjeux du PRDIRT pourront donc être compromis par les impacts potentiels appréhendés décrits dans la première partie de cet avis scientifique (Annexe 4). Compte tenu de la complexité de fonctionnement des écosystèmes, nous ne pouvons évaluer les répercussions et l'ampleur de ces impacts. Ainsi, pour cet exercice, nous nous en tiendrons donc aux mécanismes plus directs.

**Orientation 4.1 Aménager les forêts de manière à conserver les principaux attributs des forêts naturelles**

Cette orientation est associée au paradigme de l'aménagement écosystémique, qui est basé essentiellement sur la reproduction des patrons naturels découlant de la dynamique forestière sans intervention de l'homme. Les balises écologiques servant à borner les conditions à reproduire par nos aménagements forestiers ont été identifiées sur la base de la dynamique forestière passée, dans un climat qui est très différent de celui que nos forêts expérimenteront dans le futur. Ainsi, un impact général peut en découler pour l'ensemble des enjeux associés à cette orientation :

*Impact général : La dynamique forestière, qui est régit par le régime de perturbations et par les mécanismes de succession des peuplements, sera différente de celle ayant généré les patrons servant de référence à l'aménagement écosystémique.*

Ainsi, avec les changements climatiques, les conditions du passé doivent être considérées avec une certaine circonspection et prudence pour baliser nos aménagements forestiers futurs. Il en demeure néanmoins que les références aux conditions forestières historiques ont une valeur très importante dans le contexte des changements climatiques car elles nous permettent d'apprécier la variabilité de la forêt en fonction du climat. Dans l'état actuel des connaissances, l'aménagement écosystémique peut représenter la meilleure approche lorsque l'emphase est mise sur la résilience des écosystèmes forestiers plutôt que la reproduction des patrons passés. Néanmoins, nous évaluons le risque que les impacts des changements climatiques nuisent à l'atteinte des objectifs des enjeux de cette orientation de niveau très élevé.

#### Enjeu 4.1.1 L'amélioration de la connaissance des impacts des activités de récoltes passées sur les écosystèmes et le renouvellement des peuplements

*Impact 1 : Les connaissances sur les dynamiques forestières pourraient être plus complexes et moins fiables*

Cet enjeu a pour objectif d'établir un portrait des résultats des traitements sylvicoles réalisés dans le passé par rapport à une évolution naturelle. Les nouvelles conditions climatiques amèneront des modifications au niveau des perturbations et des interactions entre les espèces. Ainsi, les connaissances sur les dynamiques forestières pourraient être plus complexes et moins fiables. La planification écologique devra intégrer les conditions futures et les compilations des connaissances sur le territoire confronté au potentiel de changement de celles-ci. Des modifications et des ajustements devront être apportés par rapport aux solutions traditionnelles d'aménagement et de sylviculture utilisées pour intégrer ces changements. Il existe un risque d'avoir des connaissances biaisées des perturbations ou des modifications de dynamiques forestières dues aux changements climatiques. Nous estimons le risque associé à cet impact de niveau très élevé, car en plus de ne pas utiliser les solutions adaptées, ce qui rendraient les investissements importants en planification et en mise en valeur des ressources forestières inutiles, il est même possible que ceux-ci amplifient les impacts négatifs (maladaptation).

#### 4.1.2 La simplification des structures internes des peuplements

Deux sous-enjeux ont été identifiés à cet enjeu. Le premier vise à rétablir la distribution des différents stades de développement (4.1.2.1) et le deuxième est associé à la distribution des classes de surface terrière dans le paysage (4.1.2.2). Dans les deux sous-enjeux, l'objectif est de réduire l'écart entre les conditions forestières actuelles et celles observées par le passé en conditions naturelles des forêts préindustrielles.

*Impact 1 : La dynamique forestière sera différente de celle ayant généré les patrons servant de référence à l'aménagement écosystémique.*

L'impact général identifié pour cette orientation s'applique à cet enjeu et a un impact important sur la planification stratégique. Un changement dans la dynamique forestière apportera un changement dans la composition forestière. De plus, une mortalité sélective (et peut-être accrue) chez certaines espèces et selon l'âge de l'arbre (différences ontogéniques), modifiera les patrons de répartition de stades de développement. Un changement dans la proportion des perturbations ou l'arrivée de nouvelles pestes qui sont sélectives quant à la composition ou l'âge des peuplements risque d'accroître l'écart entre les stades de développement actuels et ceux des forêts préindustrielles. Pour ce qui est des classes en surface terrière, la mortalité accrue découlant du découplage entre la niche climatique et la distribution des espèces résultera en une diminution de la surface terrière à moyen terme. À long terme, il se peut même que la production soit supérieure et favorise l'atteinte de l'objectif.

#### *Enjeu 4.1.3 La modification de la composition végétale des forêts*

Cet enjeu comporte 13 sous-enjeux, chacun étant sujet à l'impact général précédemment présenté avec l'orientation 4.1. Les paragraphes qui suivent expriment la justification des niveaux de risques associés à chacun d'eux.

##### *4.1.3.1 La raréfaction des îlots et massifs de résineux comme habitats*

Les changements climatiques défavoriseront la présence de résineux boréaux, mais pourront favoriser d'autres espèces résineuses, plus tolérantes à la sécheresse comme le pin blanc. Néanmoins, il est attendu que les îlots et massifs de résineux comme habitats soient encore moins abondants dans le futur que maintenant. Nous estimons donc le risque de ne pas atteindre cet objectif de niveau élevé.

##### *4.1.3.2 La régénération déficiente des résineux dans les ravages de cerfs*

Sous changements climatiques, les conditions hivernales seront amplement adoucies. Les besoins du cerf de Virginie en abri de protection et un refuge thermal seront beaucoup moins importants pour la survie des populations. Nous estimons donc les risques associés à ce sous-enjeu comme bas. Cependant, il est fort possible que la déprédation sur la régénération résineuse par le cerf de Virginie sera augmentée à mesure que l'abondance de ce cervidé s'accroîtra dans le futur.

##### *4.1.3.3 L'enfeuillage des peuplements résineux*

L'argumentaire utilisé pour le sous enjeu 4.1.3.1 est le même ici. Les prédictions de changement de niche climatique suggèrent que ce sous-enjeu devrait être revu sous l'angle des changements climatiques.

##### *4.1.3.4 L'enfeuillage en feuillus intolérants*

Les travaux de prédiction de changements d'aires de distribution montrent que les espèces de feuillus intolérants seront avantagées par les changements climatiques. Cependant, ces évaluations ne considère pas de changement dans le régime de perturbations. Or, l'augmentation des phénomènes

extrêmes et catastrophiques favoriseront d'autant plus l'établissement des espèces intolérantes. Il est donc à prévoir que les espèces intolérantes occuperont une proportion plus importante dans le paysage. Nous évaluons donc le risque de ne pas atteindre cet objectif de niveau élevé.

#### 4.1.3.5 La raréfaction du pin blanc et des grands massifs de pins blancs

À prime abord, les conditions futures sous changements climatiques seront avantageuses, tant pour la croissance que pour l'établissement du pin blanc. La seule menace qui semble se profiler avec les changements climatiques concerne l'arrivée potentielle du dendroctone du pin. Très peu d'information est actuellement disponible pour prédire ce qu'il arrivera des ennemis naturels actuels du pin blanc, soit la rouille vésiculeuse et le charançon du pin blanc. Nous estimons donc le risque de ne pas atteindre cet objectif à cause des changements climatiques comme bas. Les changements climatiques nous indiquent même plutôt qu'une opportunité pourrait être avantageusement exploitée en réorientant nos aménagements pour favoriser l'expansion de cette espèce.

#### 4.1.3.6 La raréfaction du pin rouge

Comme pour le pin blanc, il est attendu que les nouvelles conditions sous les changements climatiques seront favorables au déploiement de l'aire de distribution de cette espèce. Nous estimons donc le risque de ne pas atteindre cet objectif à cause des changements climatiques de niveau faible.

#### 4.1.3.7 La régénération du bouleau blanc

L'évaluation de la modification de la niche climatique des espèces suggère que le bouleau blanc sera désavantagé par les nouvelles conditions sous changements climatiques. Cette espèce est reconnue pour sa faible tolérance aux conditions de sécheresse et pour sa fragilité vis-à-vis les fluctuations autour du point de congélation, qui sont susceptibles de réduire la conductivité hydraulique et de générer des embolies. Ainsi, nous estimons donc le risque de ne pas atteindre cet objectif à cause des changements climatiques de niveau élevé.

#### 4.1.3.8 La régénération du bouleau jaune

Le PRDIRT indique qu'il se dote des objectifs de a) corriger la stratégie de régénération du bouleau jaune; et b) d'augmenter la présence du bouleau jaune sur le territoire. Or, tous les indicateurs qui proviennent des exercices de modélisation dans lesquels on évalue l'environnement climatique du bouleau jaune dans le futur suggèrent que cette espèce sera extrêmement vulnérable aux changements climatiques, et particulièrement aux conditions plus sèches en été. Nous estimons ici le niveau de risque de non atteinte de l'objectif comme très élevé.

#### 4.1.3.9 La régénération du thuya d'Amérique

Cette espèce ne semble pas à être à risque sous changements climatiques pour la région de l'Outaouais.

#### 4.1.3.10 L'envahissement par le hêtre dans les érablières

Le hêtre à grandes feuilles sera moins vulnérable aux conditions plus sèches des stations sous changements climatiques; nous devrions donc observer une augmentation du hêtre au détriment

d'autres espèces comme le bouleau jaune ou l'érable à sucre, puisque des sols plus secs favoriseraient la régénération du hêtre. On peut aussi s'attendre à une augmentation de la propagation de la maladie corticale du hêtre (MCH). Comme la MCH accélère la régénération végétative du hêtre à grandes feuilles, une boucle de rétroaction positive peut être attendue entre ces deux phénomènes, ce qui posera un risque élevé de baisse de la possibilité forestière, particulièrement en ce qui concerne le bois de qualité.

#### 4.1.3.11 L'envahissement par le sapin dans les pessières

Les connaissances sur les conditions de l'habitat du sapin baumier dans le futur laissent présager que celui-ci sera plus vulnérable, compte tenu des conditions plus sèches. En effet, le sapin baumier est beaucoup moins performant dans des conditions où la disponibilité en eau dans le sol est moins importante. Par exemple, en Alberta, la longévité du sapin ne dépasse guère 50 ans. Ainsi, le risque que le sapin continue d'envahir les pessières sera probablement moins élevé que précédemment. Cependant, il est probable que nous ayons à faire face à une mortalité accrue des populations de sapin baumier.

#### 4.1.3.12 La raréfaction d'autres essences forestières

Avec les changements climatiques, il est fort probable que de nouvelles pestes et maladies viennent affecter des espèces considérées en raréfaction. Par exemple, l'augmentation de la prolifération de maladies telles que le chancre du noyer, la maladie hollandaise de l'orme ou l'arrivée d'insectes tel le puceron lanigère ou l'Agrile du frêne pourrait affecter les essences plus rares comme la Pruche du Canada, le Noyer cendré, l'Orme d'Amérique et les frênes. Cependant, les connaissances sur ces risques sont très limitées et permettent très mal d'en évaluer leur importance.

#### 4.1.3.13 La raréfaction du chêne rouge

Sous changements climatiques, le chêne rouge sera l'une des espèces avantagées par les nouvelles conditions forestières. La menace la plus évidente concerne l'arrivée de la spongieuse, qui est en progression déjà dans le sud de l'Outaouais. Les changements climatiques devraient donc faciliter l'atteinte de cet objectif.

### Enjeu 4.1.4 La modification de l'organisation spatiale des forêts

Mentionnons que cet enjeu est très mal documenté pour définir actuellement des balises écologiques fiables en forêt feuillue. Les objectifs retenus pour cet enjeu sont de a) diminuer la fragmentation globale du territoire et b) atténuer les effets de la fragmentation sur les espèces cibles. Il est clair qu'avec les changements climatiques, nous observerons une homogénéisation de la matrice due à une augmentation de la proportion des espèces feuillues dans le paysage. D'un autre côté, la probabilité d'observer des perturbations catastrophiques venant percer la matrice pourra être augmentée. De plus, certains phénomènes indirects associés aux changements climatiques pourront contribuer à la fragmentation. Nous estimons, somme toute, le risque associé à la non-atteinte de ces deux objectifs comme faible. Néanmoins, en ce qui concerne la connectivité des massifs résineux et mixtes à dominance d'espèces résineuses, il est à prévoir que celle-ci diminuera fortement.

#### Enjeu 4.1.5 La raréfaction des chicots et débris ligneux

Très peu de documentation nous permet de présager quels seront les impacts des changements climatiques sur cette dimension. D'un côté, l'augmentation de mortalité diffuse et de la mortalité due à des perturbations catastrophiques augmenteront la disponibilité en bois mort, autant sous forme de chicots que de débris ligneux. De l'autre côté, si le régime de feu augmente et que les conditions de sécheresse augmentent elles aussi, le bois mort deviendra un combustible qui contribuera à augmenter la fréquence et l'intensité des feux, ce qui, en revanche, diminuera la quantité de bois mort. Compte tenu de l'incertitude sur la dynamique du bois mort en lien avec les changements climatiques, nous ne pouvons évaluer les risques.

#### Enjeu 4.1.6 La diminution des proportions de forêts mûres et surannées

Cet aspect a déjà été abordé via le sous-enjeu des stades de développement (4.1.2.1). L'augmentation des perturbations catastrophiques pourrait faire diminuer l'importance des forêts mûres et surannées. Nous évaluons ce risque de niveau modéré à élevé.

#### Enjeu 4.1.7 La méconnaissance de l'impact environnemental des sentiers récréatifs actuels

Cet enjeu est sujet aux mêmes risques que ceux qui avaient été identifiés pour l'enjeu 4.1.1 (L'amélioration de la connaissance des impacts des activités de récoltes passées sur les écosystèmes et le renouvellement des peuplements). Mais comme cela ne considère que l'impact des sentiers récréatifs, nous évaluons ce risque comme faible.

### **Orientation 4.2 Maintenir des habitats adéquats pour les espèces nécessitant une attention particulière et pour celles qui sont sensibles à l'aménagement forestier.**

#### Enjeu 4.2.1 La conservation des milieux humides et habitats fragiles

Sous changements climatiques, il est prévu que la conservation des milieux humides et des habitats fragiles sera plus difficile. En effet, avec les conditions plus sèches en été, on observerait un assèchement des milieux humides et des micro-cuvettes en milieu forestier. De plus, les fluctuations importantes associées aux augmentations des précipitations près du point de congélation risqueraient d'entraîner des débits de pointe beaucoup plus forts, modifiant ainsi la stabilité des conditions d'habitats. Les milieux fragiles sont souvent conditionnés par des enveloppes environnementales particulières. L'augmentation de la variabilité des conditions climatiques et de la fréquence des extrêmes rendent la pérennité de ceux-ci vulnérables. Nous estimons donc ce risque comme élevé.

#### Enjeu 4.2.2 La protection et le rétablissement des espèces en situation précaire

La distribution et l'abondance des espèces seront modifiées par l'arrivée d'autres espèces mieux adaptées. Il est plausible que le réseau des aires protégées ne soit plus représentatif et ne permettrait

plus de conserver les populations, communautés, peuplements ou écosystèmes rares. De plus, les variations climatiques peuvent causer de la mortalité chez les populations des espèces protégées et entraîner une perte importante de biodiversité. D'un autre côté, les travaux effectués jusqu'à présent sur les changements climatiques et la biodiversité suggère que, bien qu'il soit possible de perdre des espèces, l'arrivée de nouvelles espèces plus méridionales pourrait compenser ces pertes. Mais si l'on se ramène aux objectifs de cet enjeu qui sont a) d'assurer la mise en œuvre des plans de protection et de restauration actuels du MRNF et du MDDEP; et b) d'améliorer l'identification et la connaissance des espèces en situation précaire, les changements climatiques risquent de réduire considérablement notre capacité à favoriser le maintien de ces espèces, qui sont souvent déjà associées à des conditions environnementales marginales. Les plans de protection pourraient être voués à l'échec si les espèces à protéger sont particulièrement sensibles au climat et à ces variations. Il faut donc recommander que ces plans considèrent les changements climatiques. Nous évaluons donc le risque comme très élevé.

**Orientation 4.3 Mettre au point des pratiques forestières et des mesures de protection aptes à maintenir l'intégrité des sols forestiers, des écosystèmes aquatiques et forestiers, ainsi que leurs fonctions écologiques.**

Enjeu 4.3.1 La protection du milieu aquatique et de l'habitat du poisson

Cet enjeu vise à a) assurer le respect de la capacité de support du milieu et des lacs lors de nouveaux projets et b) à protéger l'ensemble des milieux aquatiques et les habitats du poisson. Plusieurs conditions des milieux aquatiques sont à risque d'être modifiées avec les changements climatiques. Le réchauffement de l'eau provoque un changement de la qualité de l'eau (souvent moins oxygénée) et est plus propice au développement d'algues myriophylles, algues bleues, et à l'eutrophisation des lacs. Le réchauffement des lacs et des cours d'eau modifie les habitats des espèces aquatiques qui y vivent, pouvant entraîner une perte de biodiversité et d'attrait pour la pêche sportive, une réduction de la valeur foncière des propriétés et une perte d'attrait pour les milieux naturels. L'augmentation de la période d'occupation de la forêt par l'homme associée avec une augmentation de la période estivale de récréation augmente la pression sur la biodiversité. Nous estimons donc le risque de ne pas respecter la capacité de support du milieu comme modéré à élevé selon les plans d'eau.

Enjeu 4.3.2 Les maladies de la faune et la prolifération des espèces exotiques envahissantes

L'objectif de cet enjeu vise à freiner la prolifération des maladies de la faune et des espèces exotiques envahissantes. En effet, les invasions biologiques sont une menace importante à l'intégrité écologique. Or, plusieurs espèces envahissantes sont susceptibles d'être favorisées par les changements climatiques. De plus, le découplage des relations trophiques est susceptible de favoriser des dynamiques épidémiques, et cela même pour des espèces indigènes. Nous évaluons donc ce risque comme étant très élevé.



#### Enjeu 4.3.3 Le maintien de l'intégrité des écosystèmes pour leur rôle écologique et la conservation de la biodiversité

Les objectifs associés à cet enjeu visent à a) maintenir ou restaurer les processus écologiques clés qui reflètent les conditions naturelles et b) favoriser l'implantation de nouvelles aires de conservation et de mise en valeur des milieux naturels. Il est évident que des conditions climatiques instables ne seront pas favorables à l'atteinte de ces objectifs via moult mécanismes. Bien que cela soit très mal compris, on peut penser que les écosystèmes naturels qui sont plus diversifiés possèdent des mécanismes de rétroaction négative qui favorisent leur résistance et résilience. Pour cette raison, nous estimons le risque à la non-atteinte de ces objectifs comme modéré à élevé.

#### 4.3.5 Le maintien de l'intégrité des sols forestiers

Le maintien de l'intégrité des sols forestiers pourra être affecté par les changements climatiques. En effet, les processus pédogénétiques sont fortement influencés par la température, les précipitations et la nature de l'apport en matière organique de la végétation. Comme tous ces facteurs peuvent changer en quantité, qualité et en variabilité avec les changements climatiques, il est fort à parier que les processus physico-chimiques, microbiologiques, et biologiques associés à la pédogénèse seront fortement modifiés. Des sols plus chauds favoriseront-ils une disponibilité en nutriments accru pour les arbres? Quelle sera l'impact de la réduction de la disponibilité en eau sur les relations sol-plante? En quoi les relations biologiques associées à la rhizosphère seront modifiées? Voilà des questions auxquelles notre revue de littérature ne permet pas de répondre. De plus, il est difficile pour cette raison de distinguer les effets propres à la pollution atmosphérique de ceux associés aux changements climatiques. Compte tenu de cette incertitude, nous ne nous prononçons pas sur les risques de ne pas rencontrer les objectifs de cet enjeu à cause des changements climatiques.

### **Références**

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E H (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259 (4) : 660–684, doi:10.1016/j.foreco.2009.09.001
- Commission régionale sur les ressources naturelles et le territoire public de l'Outaouais. 2011. Plan régional de développement intégré des ressources naturelles et du territoire public de l'Outaouais. Gatineau.
- van Mantgem, P.J. et Stephenson, N.L. 2007. Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest. *Ecology Letters* 10: 909–916.
- van Mantgem, P.J., Stephenson, N.L., Byrne, J.C., Daniels, L.D., Franklin, J.F., Fule, P.Z., Harmon, M.E., Larson, A.J., Smith, J.M., Taylor, A.H., et Veblen, T.T. 2009. Widespread increase of tree mortality rates in the western United States. *Science* 323:521–524.

## 5. Revue de littérature sur les mesures d'adaptation

### ***Introduction***

Les sections précédentes ont fait ressortir les impacts potentiels des changements climatiques susceptibles d'être les plus importants compte tenu des objectifs de développement secteur forestier de la région de l'Outaouais. La compréhension des mécanismes de vulnérabilité qui ont été présentées constituent la base de la réflexion qui vise à identifier des mesures d'adaptation qui atténueraient ces impacts ou bien rendraient la communauté des acteurs forestiers de l'Outaouais moins vulnérable. Pour identifier ces mesures d'adaptation, nous avons dans un premier temps fait une revue de littérature sur le sujet afin de mieux comprendre la pertinence de celles-ci et leur adéquation à des problématiques d'impacts spécifiques.

De façon générale, deux types de stratégies sont mises de l'avant pour faire face aux changements climatiques. D'abord, les mesures d'atténuation visant à limiter l'ampleur des changements climatiques. L'exemple le plus connu est le protocole de Kyoto, qui vise à réduire les émissions globales de gaz à effet de serre et à réduire les hausses de température prévues. Toutefois, même si ce type de mesure est essentiel, Arora *et al.* (2011) ont démontré que pour limiter la hausse globale prévue de température de 2°C (niveau pour lequel on pourrait perdre le contrôle des effets engendrés), il faudrait revenir aux niveaux d'émissions de gaz à effet de serre de 1970. Cette avenue semble difficilement réalisable. C'est ainsi que le deuxième type de stratégie, qui consiste à élaborer des mesures d'adaptation (MA), est introduit. Cette stratégie vient du constat que les changements climatiques sont bien présents et qu'ils se poursuivront malgré les efforts d'atténuation entrepris. Comme le terme le suggère, l'adaptation est un processus continu et évolutif puisqu'il faut constamment ajuster les mesures aux réalités vécues et à leurs répercussions sur la société.

Les mesures d'adaptation peuvent être soit réactives ou préventives. Les mesures d'adaptation réactives se basent sur des expériences du passé face à des événements extrêmes ayant exigé de changer les pratiques usuelles du modèle d'affaire. Les mesures d'adaptation préventives s'intéressent davantage à identifier les mécanismes de vulnérabilité face des impacts appréhendés, pour lesquels le système d'intérêt a peu ou pas d'expérience avec ceux-ci. Dans l'approche Vulnérabilités & Adaptation aux changements climatiques, les mesures d'adaptation réactive basée sur le passé observé peuvent servir d'amorce afin de mieux comprendre les mécanismes de vulnérabilité et ainsi permettre d'identifier quelles seraient les mesures d'adaptation préventive à privilégier. Néanmoins, compte tenu de l'ampleur des impacts appréhendés, dans plusieurs cas, les expériences du passé n'offrent qu'un aperçu modeste des impacts qui pourront sévir.

### ***Méthode***

Pour cette étude, nous nous sommes centrés sur les mesures visant à s'adapter aux impacts potentiels des changements climatiques qui ont été reconnues et identifiées dans la littérature (Lemmen *et al.*

2003, Williamson *et al.* 2009, Ogden et Innes 2007, Ministère de l'Environnement de l'Ontario (s.d.)). À cette collecte s'ajoutent les MA qui ont été identifiées dans les travaux de Doyon *et al.* (2012) et de Chiasson *et al.* (2012), en collaboration avec la Collectivité Forestière du Projet le Bourdon ainsi que celles identifiées dans Le Goff *et al.* (2012). Les mesures relevées ont été séparées en trois catégories distinctes : (1) les MA de suivi (surveillance, monitoring), (2) les MA visant à changer les pratiques et/ou les procédures, et (3) les mesures de renforcement de la capacité d'adaptation. Trois tableaux résumant les MA pour chacune des catégories identifiées ont ainsi été créés (Tableau 3, Tableau 4, Tableau 5 et Tableau 6).

Il convient de préciser quelques détails sur chacun des tableaux. D'abord, il nous est apparu essentiel de séparer les MA de suivi des autres mesures. La raison qui motive ce choix est que lors de l'étude de cas qui s'est déroulée dans la collectivité forestière du Projet Le Bourdon (Doyon *et al.* 2011, Doyon *et al.* 2012), plusieurs intervenants ont souligné l'importance d'investir dans des outils ou méthodes qui permettraient d'améliorer le suivi. Cette volonté découle du désir de mieux comprendre les impacts réels des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers. Plusieurs MA de suivi, de surveillance ou encore d'incitation à la recherche ont ainsi été mises de l'avant. Il nous apparaissait donc pertinent de faire ressortir l'importance de ces mesures en leur assignant un tableau individuel.

Ensuite, le tableau des mesures d'adaptation visant un changement de pratique ou de procédure a été divisé de façon à classer les mesures selon le type d'impact des changements climatiques sur les forêts (feux de forêt, insectes et maladies, croissance et productivité, migration des espèces et biodiversité, phénomènes météorologiques extrêmes, et impacts socio-économiques). On note aussi que certaines mesures revêtent plutôt une dimension d'ordre stratégique et sont, par conséquent, plus générales.

Enfin, avant d'aborder les MA de renforcement de la capacité d'adaptation, il est essentiel de souligner l'importance de s'attarder sur de telles mesures. Ce type de mesure vise avant tout à renforcer la capacité des intervenants à s'adapter aux changements à venir. Ces mesures impliquent donc une réflexion sur l'évaluation des forces et des faiblesses du système dans lequel les intervenants évoluent, ainsi qu'une connaissance des facteurs à évaluer. Il est important de noter que ce genre de MA s'avère utile quelle que soit la nature des impacts, qu'ils soient d'origine climatique ou autre et constitue donc un bon investissement étant donné l'incertitude. Dans la littérature, on dit de telles mesures qu'elles sont alors « sans regret » car peu importe les conditions futures, ces mesures seront utiles.

Les travaux sur l'adaptation de Williamson et Johnston (2007), Ogden et Innes (2007), et Isaac et Williamson (n.d.) ont servi de référence pour repérer ces critères. Ces attributs sont expliqués dans le Tableau 2. Pour leur part, les mesures de renforcement de la capacité d'adaptation qui ont été relevées dans la littérature sont représentées au Tableau 6. Notons ici que le peu d'exemples de mesures que l'on retrouve dans la littérature ne diminue en rien l'importance de ce type de mesure. Bien au contraire, nous sommes d'avis que les mesures de renforcement de la capacité d'adaptation sont essentielles au processus d'adaptation.

Tableau 3 . Attributs qui confèrent de la résilience à un système

**Connaissance, savoir, éducation**

- Bonne connaissance des changements climatiques et des impacts sur les activités de la région
- Accessibilité des connaissances et du savoir lié aux changements climatiques
- Disponibilité et accessibilité de formations sur l'adaptation aux changements climatiques
- Incorporation des connaissances des dynamiques du système

**Reconnaissance de la nécessité de s'adapter**

- Urgence d'adopter des mesures pour s'adapter aux impacts des changements climatiques
- Considération de l'adaptation dans la planification
- Prise en considération des changements climatiques dans les préoccupations collectives

**Contexte**

- Accessibilité et disponibilité des ressources humaines et financières
- Caractéristiques socio-économiques de la région

**Capital social**

- Processus collaboratif entre les intervenants
- Partage et production de connaissances et d'outils
- Relation de confiance entre les intervenants
- Existence de mécanismes de gestion des conflits

**Capital politique**

- Répartition des pouvoirs entre les différentes échelles des acteurs
- Connaissance du rôle des acteurs en place et de la structure de gouvernance régionale

**Innovation**

- Modifications apportées au niveau technologique, organisationnel ou social

Les MA qui sont présentées dans les tableaux 3 à 6 correspondent à celles qui ont été relevées dans la littérature pertinente sur le sujet. Il faut donc souligner d'emblée que certaines de ces MA ne font pas l'unanimité ou encore, pourraient ne pas être adaptées aux conditions spécifiques de l'Outaouais.

Tableau 4 . Mesures d'adaptation de suivi/surveillance/monitoring<sup>3</sup>

- Anticiper les variabilités et changements, et conduire des évaluations de vulnérabilités à l'échelle régionale (4)
- Établir des partenariats pour la recherche sur la modélisation climatique (5)
- Informer les collectivités des risques de feux au moyen de l'indice forêt-météo (1)
- S'entendre sur des scénarios climatiques normalisés aux fins d'analyse (3)
- Étudier les répercussions du changements climatiques sur la pêche (5)
- Exercer une surveillance pour connaître la nature et le moment des changements (2,3)
- Faire l'étude des indicateurs climatiques (5)
- Améliorer la surveillance du climat (5)
- Faire un suivi de la croissance des arbres (croissance des arbres) (6)
- Faire un suivi des coupes partielles (croissance des arbres) (6)
- Suivre les populations d'insectes, acquérir de meilleures connaissances sur l'influence du climat sur elles (insectes, maladies) (6)
- Faire des études sur le comportement des espèces (biodiversité, récréotourisme) (7)
- Déployer un réseau de surveillance des plans d'eau (récréotourisme, biodiversité) (7)
- Faire l'inventaire phénologique printanier (biodiversité) (7)
- Faire un suivi sur l'invasion d'espèces exotiques (7)
- Faire un suivi des traverses de cours d'eau (débits de pointe) (7)

<sup>3</sup> Les numéros indiqués entre parenthèses dans le tableau correspondent aux travaux dont les mesures d'adaptation sont tirées.

- (1) Lemmen, Warren, Lacroix, et Bush (2008)
- (2) Spittlehouse et Stewart (2003)
- (3) Williamson *et al.* (2009)
- (4) Ogden et Innes (2007)
- (5) Ministère de l'Environnement de l'Ontario (s.d.)
- (6) Le Goff *et al.* (2012)
- (7) Doyon *et al.* (2012)

Tableau 5 . Mesures d'adaptation visant un changement de pratique et/ou procédure concernant les impacts associés aux feux de forêt, aux épidémies d'insectes et de maladies et au changement de la croissance et la productivité <sup>4</sup>

Feux de forêt	Insectes et maladies	Croissance et productivité
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliser le brûlage pour réduire les risques de feux et pour réduire la vulnérabilité des épidémies d'insectes (4)</li> <li>• Modifier la structure des forêts (densité des arbres, nombre d'arbres morts toujours en place, ou débris ligneux sur la surface forestière) pour réduire le risque et l'étendue des perturbations (Dale <i>et al.</i> 2001) (2)</li> <li>• Accroître l'utilisation du brûlage dirigé pour minimiser l'accumulation de combustible (Wheaton 2001) (2)</li> <li>• Améliorer la capacité de récupération après un incendie (Wheaton 2001) (2)</li> <li>• Développer des paysages et des communautés de type Intelli-feu et le zonage fonctionnel (2,3, 6)</li> <li>• Protéger du feu les zones à haute valeur par des techniques Intelli-feu (4)</li> <li>• Maintenir les régimes de feux naturels (4)</li> <li>• Se préparer à l'augmentation des incendies de forêt (3)</li> <li>• Inclure le risque de feu dans la possibilité forestière (6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Créer des génotypes résistants aux pestes, aux maladies et épidémies d'insectes, et ayant une meilleure tolérance aux stress climatiques (4)</li> <li>• Réduire les pertes liées aux maladies par des coupes d'assainissement qui visent à enlever les arbres infectés (4)</li> <li>• Utiliser des techniques sylvicoles pour promouvoir la productivité des forêts et accroître la vigueur des peuplements (4)</li> <li>• Raccourcir la durée de rotation pour réduire la période de vulnérabilité d'un peuplement et pour faciliter le changement vers d'autres espèces mieux appropriées (4)</li> <li>• Utilisation d'insecticides ou de fongicides dans des situations pour lesquelles les activités sylvicoles de gestion des pathogènes ne sont pas encore inappropriées (Parker <i>et al.</i> 2000) (2)</li> <li>• Ajuster la période de récolte pour récolter les peuplements les plus vulnérables (3)</li> <li>• Contrôler les espèces indésirables qui deviendront plus compétitives dans un climat changeant (4)</li> <li>• Prévoir des paysages visant à minimiser la prolifération d'insectes et de maladies (3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifier les zones de transfert des semences (2,3)</li> <li>• Planter des génotypes de remplacement ou de nouvelles espèces en prévision du climat futur (2,3,4)</li> <li>• Réduire la durée de rotation (2,3,4)</li> <li>• Utilisation de semences mieux adaptées aux nouvelles conditions (2)</li> <li>• Effectuer des activités forestières de haute intensité dans des zones sélectionnées, spécialement celles où une hausse des perturbations est attendue</li> <li>• Assister la régénération des arbres</li> <li>• Utiliser des techniques de contrôle de la végétation pour annuler les effets de la sécheresse (4)</li> <li>• Améliorer la croissance des forêts par l'utilisation d'engrais (4)</li> <li>• Pratiquer des activités forestières de haute intensité pour promouvoir la croissance des espèces d'arbres commercialisables (4)</li> <li>• Planter d'autres espèces ou génotypes par étapes (ou couches successives), là où la régénération amorcée est inappropriée pour la future forêt (4, 6)</li> <li>• Assainissement pré-commercial ou sélection des arbres endommagés ou de piètre qualité pour accroître la disponibilité des ressources pour les autres arbres (4)</li> <li>• Alléger les lois qui régissent les déplacements de semences d'une région à une autre (4,6)</li> <li>• Réguler les polluants atmosphériques (4)</li> <li>• Planter des semences provenant de différents sites (Ledig et Kizmiller 1992) (2)</li> <li>• Faire entrer les effets des changements climatiques dans les analyses à long terme des stocks de bois et dans les plans d'aménagement forestier (3)</li> <li>• Tenir compte des variables du climat dans les modèles de croissance et de rendement (2,3)</li> </ul>

<sup>4</sup> *Ibid.*

**Tableau 6 . Mesures d'adaptation visant un changement de pratique et/ou procédure concernant les impacts associés aux phénomènes météorologiques extrêmes de forêt, à la migration des espèces et biodiversité et aux impacts socio-économiques <sup>5</sup>**

Phénomènes météorologiques extrêmes	Migration des espèces et biodiversité	Socio-économiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmenter les coupes de récupération (2,3)</li> <li>• S'assurer contre les pertes dues au mauvais temps et dérivés climatiques (1)</li> <li>• Mettre en place des plans d'urgence, d'intervention et d'évacuation (1)</li> <li>• Changer la pressurisation des pneus en fonction de la traficabilité du terrain (6)</li> <li>• Augmenter la taille des ponceaux et faire des calculs de débits de pointes appropriés aux CC pour trouver une marge de précaution (6.7)</li> <li>• Avoir des secteurs de coupes de bois en réserve près des chemins solides durant les périodes à risques et favoriser un accès aux sites éloignés en été (opérations forestières) (7)</li> <li>• Préparer une planification stratégique fonctionnelle du réseau routier forestier (7)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartographier les niches écologiques et évaluer les changements (1)</li> <li>• Maintenir une représentation faunique et floristique régionale, création de parc (aires protégées) (1,4)</li> <li>• Gérer la pêche en fonction des habitats pour assurer la viabilité des ressources (1)</li> <li>• Gestion active des parcs et zones protégées pour s'ajuster face aux espèces compatibles aux nouvelles conditions (2)</li> <li>• Maintenir la connectivité dans un paysage varié et dynamique (2,3,4)</li> <li>• Minimiser la fragmentation (4)</li> <li>• Protéger les refuges climatiques aux différentes échelles (4)</li> <li>• Identifier et protéger les groupes fonctionnels et les espèces clés</li> <li>• Laisser des zones tampons pour permettre l'ajustement des limites de réserves (4)</li> <li>• Créer des réserves artificielles pour préserver les espèces rares (4)</li> <li>• Protection <i>ex situ</i> des espèces les plus menacées (4)</li> <li>• Développer un programme de gestion des gènes et réaliser des tests de provenance sur de grands gradients latitudinaux (4, 6)</li> <li>• Permettre à la forêt de se régénérer suite aux perturbations (4)</li> <li>• Appuyer les changements dans la distribution des espèces en les introduisant sur d'autres territoires (4)</li> <li>• Restaurer et préserver les milieux humides (1), et restaurer les milieux dégradés (4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rehausser les critères de conception des ponts et ponceaux de 10% (génie civil, MTQ) (1)</li> <li>• Mise à jour et entretien des infrastructures (2)</li> <li>• Entretien et réhabiliter le réseau routier pour réduire la sédimentation (2)</li> <li>• Développer des technologies pour utiliser le bois selon ses nouvelles qualités et dimensions (2,3)</li> <li>• Mettre au point et implanter des systèmes et des pratiques de remplacement pour la récolte (3)</li> <li>• Prendre en considération les CC dans la planification, la construction et le remplacement des infrastructures (3)</li> <li>• Se préparer à un approvisionnement forestier marqué par les variations (3)</li> <li>• Se préparer à la réduction des travaux forestiers en hiver (3)</li> <li>• Accroître la quantité de bois de récupération provenant de peuplements endommagés par le feu ou les insectes (4)</li> <li>• Pratiquer une foresterie de faible intensité (4)</li> <li>• Minimiser la perturbation des sols par des activités de récolte à faible impact</li> <li>• Minimiser la densité du réseau de routes permanentes pour maximiser la productivité des zones forestières et des puits forestiers (4)</li> <li>• Limiter les opérations de coupe à l'hiver afin de minimiser la construction de routes et la perturbation des sols (4)</li> <li>• Mettre en place des institutions restructurées ou nouvelles qui favorisent les mesures d'adaptation économiquement rentables et efficaces et qui fournissent aux responsables de l'aménagement forestier les outils nécessaires pour atteindre leurs objectifs (3)</li> <li>• Diversifier l'économie forestière (4)</li> </ul>

<sup>5</sup> *Ibid.*

- Protection des espèces et des habitats (1)
- Conserver la biodiversité (2,5) et favoriser la résilience des écosystèmes (5)
- Protéger la forêt primaire (5)
- Migration assistée des espèces et des géotypes (6)
- Diversifier l'éventail des actifs forestiers de la société (3)
- Gérer les impacts du tourisme et du plein-air
- Diversifier l'offre récréotouristique afin de minimiser le risque climatique (1)
- Mettre en œuvre des pratiques de récolte alternatives (2)
- Inclure une certaine flexibilité pour déterminer les périodes de chasse (récréotourisme) (7)
- Opter pour un changement de créneau (plus de VTT et moins de motoneige) (7)
- Dévier les sentiers de motoneige pour qu'ils ne passent pas sur les lacs (récréotourisme) (7)
- Concentrer la saison hivernale (ski, motoneige, plein-air d'hiver) sur une plus courte période et concentrer l'offre disponible (récréotourisme) (7)
- Travailler sur l'aménagement des sentiers multifonctionnels (7)
- Faire valoir les avantages concurrentiels de la région par rapport aux villes en hiver (conditions de neige) et en été (période de canicule) (7)
- Partage des ressources humaines à expertise multiple (saisonnalité variable par période de production) (7)
- Ajuster les droits de prélèvements par rapport à la distribution de la ressource (7)
- Établir un plan de mesure d'urgence en cas de dommages aux infrastructures et de feux de forêt (sécurité civile) (7)
- Meilleur encadrement des activités récréotouristiques : pression accrue venant d'une saison estivale prolongée (7)



Tableau 7. Mesures d'adaptation visant à renforcer la capacité d'adaptation<sup>6</sup>

- Diversifier l'économie régionale (pas juste basée sur le secteur forestier) (4)
- Tenir compte des CC dans les plans d'affectation du territoire et envisager des modifications à certains endroits (forêt pour agriculture et vice versa) (3)
- Améliorer le dialogue parmi les groupes d'acteurs et établir des priorités pour les actions d'adaptation au climat propres au secteur forestier (4)
- Prise en considération de l'adaptation dans la planification stratégique de l'aménagement forestier (2)
- Engager un dialogue avec le public sur les valeurs et la gestion en période de CC (3)
- Sensibiliser, éduquer, transférer des connaissances spécialisées et pertinentes aux partenaires régionaux. Sensibiliser les intervenants pour s'assurer que la question des CC soit discutée avec sérieux et considérée comme un enjeu réel (6)
- S'assurer que les tables de gestion intégrée des ressources et du territoire (GIRT) ont accès à une expertise adéquate sur les CC (6)
- Développer des outils pour guider les tables GIRT lors de la planification (6)
- S'assurer que les gestionnaires du gouvernement responsables de l'aménagement forestier envoient un message clair aux intervenants régionaux sur la nécessité de l'adaptation aux CC et de sa prise en compte dans la planification (6)
- Développer une évaluation des vulnérabilités aux CC des systèmes naturels et humains impliqués (et développer les moyens pour y parvenir) (6)
- Estimer les incertitudes reliées aux projections climatiques et à leurs conséquences potentielles (6)
- Promouvoir les approches de gestion qui permettent de prendre des décisions dans un contexte d'incertitudes (6)
- Améliorer l'accès à l'expertise sur les CC (6)
- Favoriser l'innovation et la recherche pour déterminer quand et où mettre en œuvre des MA (6)
- Encourager et faciliter la participation des populations autochtones dans les consultations (7)

## Références

- Arora, V., Scinocca, J., Boer, G., Christian, J., Denman, K., Flato, G., Merryfield, W. 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(5), L05805.
- Chiasson, G., S. Boukendour, F. Doyon, É. Plassin, et A. Montpetit. 2012. Gouvernance et adaptation dans le secteur de la forêt: le cas de la Collectivité Forestière du Projet Le Bourdon. Remis à La Collectivité Forestière du Projet Le Bourdon et au Consortium Ouranos sur les Changements Climatiques. 55p. + 12 annexes.
- Doyon, F., Cyr, D., Poirier, J., Chiasson, G., & Boukendour, S. 2011. Évaluation des vulnérabilités du secteur forestier dans les Hautes-Laurentides face aux impacts biophysiques des changements climatiques: IQAFF.
- Doyon, F., D. Cyr, A. Montpetit, G. Chiasson et É. Plassin. 2012. Évaluation des vulnérabilités et de l'adaptation face aux changements climatiques sur le territoire de la collectivité forestière du Projet Le Bourdon (Canada). Rapport de l'Institut des Sciences de la Forêt tempérée (UQO), Ripon, Qc et du Centre de recherche sur la Gouvernance des Ressources naturelles et du territoire (UQO), Gatineau, Qc. Septembre 2012. 1007p. + 10 annexes.

---

<sup>6</sup> *Ibid.*

- Le Goff, H., Leduc, A. & Jayen, K. 2012. Évaluation des vulnérabilités aux changements climatiques de trois projets d'aménagement forestier écosystémique et implications pour le développement d'une stratégie d'adaptation pour l'aménagement forestier au Québec.
- Lemmen, D. S., Warren, F. J., Lacroix, J., & Bush, E. 2008. *Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007*. Ottawa (Ontario).
- Ministère de l'environnement de l'Ontario. (s.d.). *Faire face au changement climatique: Stratégie d'adaptation et plan d'action de l'Ontario 2011-2014*. Retrieved from [http://www.ene.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@ene/@resources/documents/resource/stdprod\\_085426.pdf](http://www.ene.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@ene/@resources/documents/resource/stdprod_085426.pdf).
- Ogden, A., & Innes, J. 2007. Perspectives of forest practitioners on climate change adaptation in the Yukon and Northwest Territories of Canada. *The Forestry Chronicle*, 83(4), 557-569.
- Spittlehouse, D. L., & Stewart, R. B. 2003. Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of ecosystems and management*, 4(1), 1-11.
- Williamson, T. B., Colombo, S. J., Duinker, P. N., Gray, P. A., Hennessey, R. J., Houle, D., . . . Spittlehouse, D. L. 2009. *Les changements climatiques et les forêts du Canada: des impacts à l'adaptation*. Edmonton (Alberta).
- Yamasaki, S., M. Hernandez, J. Louvel, & M. Olar. 2012. Première étude en vue de développer une méthodologie pour évaluer les vulnérabilités socio-économiques des communautés forestières du Québec aux changements climatiques. Rapoport remis à Ouranos. 55p. + 2 annexes.

## 6. Sélection des mesures d'adaptation prioritaires

### ***Introduction***

L'objet central de ce mandat consiste à développer un argumentaire justificatif basé sur les connaissances les plus récentes sur les changements climatiques pour en arriver à proposer des mesures d'adaptation et de renforcement de la capacité d'adaptation de la communauté des acteurs forestiers de la région de l'Outaouais. Pour ce mandat, nous devons en arriver à sélectionner trois mesures d'adaptation. Il s'agit d'un choix difficile car, comme on peut le constater à partir des chapitres précédents, et cela même après avoir mis en priorité les impacts potentiels appréhendés, les besoins sont énormes, nombreux et les moyens (mesures) sont multiples, mêmes pour chacun des impacts. Ce choix doit donc être appuyé par des critères associés à de l'information disponible.

De plus, dans un deuxième temps, une fois le choix des mesures d'adaptation réalisé, nous devons évaluer sommairement les expertises et les ressources financières nécessaires pour en arriver à l'implantation des mesures.

### ***Méthode***

#### a. La sélection des mesures d'adaptation

Notre approche pour effectuer notre choix passe par deux étapes :

1) La première étape vise à identifier les impacts potentiels appréhendés susceptibles de rendre la région la plus vulnérable aux changements climatiques. Ce choix est motivé par les critères suivants :

- le niveau de risque à la non-atteinte des objectifs associés aux impacts potentiels appréhendés (tel qu'évalué au chapitre 4);
- le niveau de certitude quant au risque appréhendé et l'horizon temporel sur lequel celui se manifestera ;
- la priorité des enjeux et orientations du PRDIRT ;
- la nature trans-sectorielle de l'impact ;
- l'importance de la vulnérabilité estimée de la région à l'impact

En ce qui concerne le premier critère (niveau de risque), seuls les impacts associés à un risque de niveau élevé de compromettre l'atteinte des objectifs des enjeux du PRDIRT ont été retenus. Le deuxième critère inclut la notion de certitude quant à l'impact appréhendé et la vitesse à laquelle celui-ci aura des répercussions importantes pour la communauté outaouaise. La priorité des enjeux et orientations est celle qui avait été identifiée dans le PRDIRT. Pour le quatrième critère, nous évaluons dans quelle mesure les différents secteurs d'activités associées à la mise en valeur des ressources et du territoire forestier sont touchés par l'impact. On favorisera le choix des mesures d'adaptation venant atténuer les

impacts trans-sectoriels. Nous avons par la suite estimé la vulnérabilité de la région compte tenu de notre connaissance de la sensibilité et de la capacité d'adaptation des acteurs de la région associée à ceux-ci. L'importance de l'impact, sa nature générale au niveau des secteurs touchés, et son ampleur géographique viennent supporter le choix du niveau de vulnérabilité associé à cet impact. Mentionnons qu'une analyse des vulnérabilités demanderait de mieux détailler les mécanismes de vulnérabilité et de mieux comprendre les caractéristiques qui confèrent la capacité d'adaptation à la communauté des acteurs forestiers de l'Outaouais. Il s'agit donc d'un choix subjectif, effectué à la lumière de notre meilleure connaissance. Idéalement, une validation par les acteurs de la communauté serait donc requise et nous le reconnaissons.

Les forêts de l'Outaouais sont essentiellement dans le biome de la forêt tempérée et se répartissent dans deux domaines bioclimatiques, soit celui de l'érablière et celui de la sapinière. Comme le fonctionnement des écosystèmes est très différent entre ces deux domaines, et que celui-ci s'articule spatialement selon un gradient Nord-Sud, cette évaluation est réalisée séparément pour chacun des deux domaines bioclimatiques. Les résultats de cette évaluation sont présentés dans un tableau de l'Annexe 5. Le lecteur est fortement invité à le consulter pour bien comprendre les résultats qui sont présentés dans la section suivante.

2) La deuxième étape associe aux impacts potentiels appréhendés prioritaires des mesures d'adaptation jugées pertinentes pour atténuer leur effet et diminuer la vulnérabilité des acteurs. Ainsi, pour chaque impact potentiel appréhendé jugé prioritaire, des mesures d'adaptation, de renforcement de la capacité d'adaptation, et des mesures de surveillance sont proposées sur la base de leur pertinence à atténuer la vulnérabilité de la région à l'impact.

b. L'évaluation des expertises et des ressources nécessaires à la mise en œuvre des mesures d'adaptation

Pour chaque mesure d'adaptation identifiée, les étapes de mise en œuvre sont présentées sommairement afin d'y associer les expertises et les ressources nécessaires.

## **Résultats**

### a. La sélection des mesures d'adaptation

#### Impacts potentiels appréhendés prioritaires

Des 61 impacts potentiels appréhendés (Annexes 1 à 4), 23 sont de niveau de risque élevé ou plus et peuvent compromettre l'atteinte d'un des objectifs associés à un enjeu (retenus dans la liste de l'Annexe 5). Parmi ceux-ci, 5 n'ont pas été associés à un niveau de priorité requérant une action immédiate dans le PRDIRT et 13 sont des impacts qui interviennent sur les objectifs de mise en valeur de plus d'un secteur (trans-sectoriel) (Annexe 5). De ces 13, la majorité touchera autant le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune que de la sapinière à bouleau jaune. Cependant, certains impacts sont plus spécifiques géographiquement quant à l'importance de leur exposition. C'est le cas, par exemple, de l'approvisionnement en feuillus durs de qualité pour l'industrie du sciage du déroulage; il est clair que les risques sont plus importants dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune que dans celui de la sapinière à bouleau jaune (Annexe 5).

Nous avons croisé l'ensemble de ces informations avec le niveau d'incertitude et l'horizon de manifestation de l'impact pour en estimer un niveau de vulnérabilité pour les acteurs secteur forestiers de l'Outaouais. La vulnérabilité est estimée *très élevée* pour 6 impacts potentiels appréhendés, *élevée* pour 5, *modérée* pour 8, *faible* pour 4 (Annexe 5). Parmi les impacts potentiels appréhendés de niveau très élevé, nous avons retenu les impacts suivants pour passer à la phase d'identification des mesures d'adaptation (ceux-ci ne sont pas nécessairement en ordre d'importance)

- I : Les changements climatiques auront des impacts importants sur la distribution des ressources (espèces et milieux) et sur la dynamique écologique de la forêt. Conséquemment, les connaissances des impacts des activités forestières sur les écosystèmes seront moins fiables ;
- II : Une perte d'accès au territoire due aux perturbations, crues subites et la réduction de l'usage de chemins d'hiver ;
- III : L'augmentation de la variabilité spatio-temporelle de la matière ligneuse entraînent des coûts accrus d'approvisionnement et rendent les garanties d'approvisionnement plus incertaines;

## Les stratégies d'adaptation

### *Stratégie d'adaptation pour atténuer l'impact potentiel appréhendé prioritaire I*

#### Mesures pratiques d'adaptation

"Mainstreamer" l'adaptation dans la planification : Il est capital de revoir les stratégies d'aménagement associées à la production des ressources naturelles (matière ligneuse, produits forestiers non ligneux, ressources fauniques) et à la conservation (biodiversité, qualité de l'environnement, intégrité écologique) sous le prisme des changements climatiques. Les changements de stratégie devront alors inclure les changements anticipés sur l'écologie des espèces et des écosystèmes forestiers dans la planification de l'aménagement des ressources naturelles et du territoire.

De plus, il sera important d'avoir une approche prudente avec les interventions forestières en vue de limiter les impacts négatifs pouvant être amplifiés par les changements climatiques.

Sous cette ombrelle générale, on retient les mesures concrètes suivantes :

- Revoir le potentiel des sites pour les différentes espèces en fonction des caractéristiques climatiques futures (niches climatiques).

Actions : - Identifier les espèces sensibles à la sécheresse;

- Identifier les peuplements qui sont vulnérables à sécheresse en fonction de sites et des espèces d'arbres;
  - Identifier les refuges d'humidité sur le territoire pour les espèces sensibles à la sécheresse;
  - Identifier les peuplements pouvant être convertis, grâce à la sylviculture, au profit d'espèces plus adaptées;
  - Identifier les secteurs qui seraient propices pour mettre en œuvre la migration assistée des espèces (ou provenance) méridionales plus robustes;
  - Évaluer la vulnérabilité des populations d'espèces végétales protégées en Outaouais et identifier des sites qui pourraient constituer des refuges climatiques pour le futur;
- Changer les stratégies sylvicoles pour mettre en valeur dès maintenant les espèces qui seront avantagées (chêne rouge et pins, caryers, noyers) par les nouvelles conditions et développer des pratiques forestières appropriée pour celles qui seraient jugées mésadaptées (bouleau jaune, érable à sucre, résineux – dont le sapin).

Actions : - Favoriser par la sylviculture les espèces jugées adaptées aux conditions futures au nord de la région;

- Développer des approches sylvicoles favorisant la résilience des forêts selon les principes promues dans Messier *et al.* (2013) tel que le maintien d'une grande diversité d'espèces et de conditions structurales dans un même peuplement et tel qu'expérimenté par Keaton 2006 (du type « complex structure enhancement silviculture »);
- Utiliser une sylviculture de maintien de couvert d'abri sur les sites sensibles à l'assèchement des sols forestiers;
- Inclure la susceptibilité aux conditions climatiques futures dans les critères de priorité de récolte pour le martelage des arbres lors de la prescription de coupes partielles, particulièrement sur les sites jugés plus sensibles aux conditions critiques futures tels les sommets et les hauts de pente ;
- Réaliser de la migration assistée des espèces (ou provenances) jugées adaptées aux conditions futures et utiliser une portion du territoire en régénération pour l'établissement des ces individus plus adaptés (voir le numéro spécial sur le sujet dans Forestry Chronicles).
- Évaluer le potentiel des espèces exotiques à l'Outaouais présentant une opportunité économique sur une base expérimentale à la lumière des connaissances sur le changement de l'aire de la niche climatique projetée.

#### Mesures de renforcement de la capacité d'adaptation

Cet avis scientifique constitue une première étape vers l'évaluation des vulnérabilités de l'adaptation changements climatiques. Il est crucial de continuer la réflexion en décrivant maintenant le « système humain » à l'aide de processus consultatifs à l'échelle régionale pour évaluer les mécanismes de vulnérabilité et la capacité d'adaptation des acteurs forestiers de l'Outaouais. La mise en place d'une telle approche suppose de se pencher sur la question des acquis, des forces et des faiblesses au sein des différentes échelles (locale et régionale) et axes décisionnels de la gouvernance (horizontal et vertical) pour en venir à élaborer des mesures de renforcement de la capacité d'adaptation. Ce type de mesure permettrait de mieux réagir en cas d'impact des changements climatiques non-anticipés. Une telle approche a été promue par le GIEC (2007) et a servi de canevas pour établir le cadre d'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation par le Conseil Canadien des Ministres des Forêts (2013).

Sous cette ombrelle générale, on retient les mesures concrètes suivantes :

- Actions :
- Diffuser les informations sur les changements climatiques et leurs impacts potentiels afin favoriser l'appropriation de la problématique par les acteurs et accroître le niveau d'alerte et de vigilance des acteurs ;

- Mettre en œuvre une approche ascendante d'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation. Les tables locales de la GIRT pourraient servir de plate-forme pour une évaluation locale et régionale des impacts biophysiques et socioéconomiques en lien avec les changements climatiques touchant les acteurs tel que réalisé avec les partenaires de la Collectivité Forestière du Projet Le Bourdon ( Doyon *et al.* 2012)
- Identifier à l'aide des différentes parties prenantes :
  - les mécanismes de vulnérabilités associés aux impacts des changements climatiques;
  - les opportunités de développement économique associées aux impacts des changements climatiques pour les différents sous-secteurs du secteur forestier;
  - les MA permettant de renforcer leur capacité d'adaptation ;
  - les barrières à la mise en œuvre de ces mesures d'adaptation.

#### Mesures de surveillance et d'acquisition de connaissances

Les effets des changements climatiques sur les forêts sont déjà perceptibles. Plusieurs travaux en forêt boréale en montrent les signaux (Houle 2013). Il est important de mettre en place un réseau de surveillance pour détecter précocement les effets des changements climatiques et de former les acteurs du milieu forestier pour accroître notre capacité de vigilance.

Sous cette ombrelle générale, on retient les mesures concrètes suivantes :

Actions : - Mettre en place un réseau de surveillance des changements climatiques en collaboration avec les partenaires (fédéraux, provinciaux, régionaux et locaux). Un tel plan de surveillance peut se baser sur les indicateurs de monitoring des effets changements climatiques sur la forêt proposés par Gauthier *et al.* (2013).

- Accroître le niveau d'alerte et de vigilance des acteurs du milieu en les informant sur les signaux importants à surveiller et à documenter et en les impliquant dans les activités de surveillance ;
- Favoriser la recherche sur la réponse des arbres et des forêts de l'Outaouais aux effets des changements climatiques. Lors de l'*Atelier sur l'adaptation du secteur forestier aux changements climatiques* tenu à Québec en mars 2013, un constat de manque de recherche sur les effets des changements climatiques sur la forêt feuillue tempérée a été fait.



### *Stratégie d'adaptation pour atténuer l'impact potentiel appréhendé prioritaire II*

L'accès au territoire est une valeur partagée par l'ensemble des sous-secteurs. Elle est jugée de très haute priorité et les impacts qui touchent le réseau routier rendent les acteurs très vulnérables dans leurs activités de mise en valeur.

#### Mesures pratiques d'adaptation

- Actions :
- Procéder à une évaluation fonctionnelle du réseau routier visant à identifier les segments de tronçons les plus cruciaux pour les activités sur le territoire. Pour ce faire, nous recommandons de procéder avec une analyse de réseau de graphes. Cette approche analytique est éprouvée dans le domaine du génie du transport et a été utilisée pour l'évaluation du réseau routier forestier des Hautes-Laurentides par la Conférence Régionale des Élus des Laurentides ;
  - Évaluer les tronçons de chemins les plus vulnérables aux changements climatiques en combinant un modèle de drainage synthétique au modèle de réseau routier tel que développé par Cabral de Vasconcellos et Doyon (2012);
  - Augmenter les standards de dimension des ponceaux afin d'inclure une marge de manœuvre de 15 % additionnels sur les débits de pointe sous changements climatiques (Mailhot 2007);
  - Intensifier les opérations sur des périodes plus courtes;
  - Lors de la planification, préparer plusieurs secteurs opérationnels alternatifs qui ne seraient pas vulnérables aux mêmes problèmes de rupture d'accès ;
  - Pérenniser une proportion plus importante du réseau routier.

#### Mesures de renforcement de la capacité d'adaptation

- Actions :
- Informer les acteurs sur les risques associés aux crues subites sur le bris de traverse de cours d'eau et à la réduction de la période hivernale pour l'utilisation des chemins d'hiver sous changements climatiques ;
  - Mettre en place un comité trans-sectoriel de gestion opérationnelle du réseau routier. Celui-ci comprendrait un service d'alerte permanent ;
  - Développer un modèle de gestion coopératif du réseau routier ;

#### Mesures de surveillance et d'acquisition de connaissances

- Actions :
- Faire un suivi des débits de pointe sur un échantillon de traverse de cours d'eau stratégiquement sélectionné ;
  - Établir, avec les acteurs locaux, l'historique des bris de traverses de cours d'eau afin de mieux cerner les conditions sensibles;

- Faire un inventaire des ponceaux et autres ouvrages de traverses pour vérifier leur adéquation aux exigences de débit de pointe sous changements climatiques (+15% selon Mailhot (2007)).

### *Stratégie d'adaptation pour atténuer l'impact potentiel appréhendé prioritaire III*

L'incertitude qu'amèneront les changements climatiques sur la répartition spatio-temporelle de la matière ligneuse entraînera des coûts accrus d'approvisionnement et rendra les garanties d'approvisionnement plus incertaines. Une partie importante de cette incertitude est reliée à la mortalité diffuse occasionnée par un dépérissement et à la mortalité subite occasionnée par des phénomènes climatiques extrêmes et des perturbations catastrophiques. La stratégie d'adaptation visant à contrecarrer ces impacts devra, d'une part, inclure cette incertitude dans le mode de gestion et, d'autre part, mieux gérer la mortalité des arbres dans les stratégies d'aménagement forestier.

#### Mesures pratiques d'adaptation

- Actions :
- Évaluer l'incertitude de perturbations naturelles sur la possibilité forestière et dégager des marges de manœuvre en vue d'en limiter la rupture de stock. Évaluer la sensibilité de ces marges de manœuvre en faisant fluctuer à la hausse les régimes de perturbations ;
  - Prévoir et développer des stratégies de récupération qui pourront être rapidement déployées sur le territoire. Pour ce faire, une garantie d'accès au territoire doit être considérée (voir impact prioritaire précédent);
  - Évaluer les menaces des pestes potentielles sous changements climatiques et développer des stratégies de protection en conséquence

#### Mesures de renforcement de la capacité d'adaptation

- Actions :
- Inclure des formations en gestion du risque appliqué aux ressources naturelles pour les gestionnaires;
  - Diffuser l'information sur les pestes et leurs impacts les plus probables;
  - Former des équipes opérationnelles spécialisées sur la récupération du bois morts.

#### Mesures de surveillance et d'acquisition de connaissances

- Actions :
- Développer un lien de collaboration étroit avec la SOPFIM et la SOPFEU. Un suivi particulier doit être exercé en ce qui concerne la maladie corticale du hêtre et de son effet exacerbant sur la régénération végétative du hêtre;
  - Faire appel à des méthodes de détection précoce des forêts stressées et perturbées à l'aide de la télédétection (avec le capteur MODIS par exemple (Wan *et al.* 2004));

**b. L'évaluation des expertises et des ressources nécessaires à la mise en œuvre des mesures d'adaptation**

Les tableaux suivants présentent les expertises et les ressources financières requises pour la mise en place des mesures d'adaptation des stratégies développées pour chacun des impacts potentiels appréhendés prioritaires (I, II, III). Cette stratégie d'adaptation propose un programme d'activités qui impliquent les gestionnaires, accompagnés d'experts, et aussi les acteurs de la mise en valeur des ressources du territoire. Les chercheurs sont aussi sollicités pour favoriser l'innovation en réponse aux besoins futurs. L'ensemble de cette programmation demande un budget total de 772 K\$. La programmation est réfléchie pour s'échelonner sur les deux prochains décennaux, à raison de 38,6 K\$/an.

Stratégie d'adaptation pour atténuer l'impact potentiel appréhendé prioritaire I

Tableau 8. Estimation des expertises et des ressources financières requises pour la mise en œuvre des stratégies d'adaptation associée à l'impact potentiel appréhendé prioritaire <sup>1</sup>

<b>Mesures</b>		
<b>Mesures pratiques d'adaptation</b>		
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières
Formation des gestionnaires pour « mainstreamer » l'adaptation dans la planification	Gestionnaires & Experts	3 K\$
Revoir le potentiel des sites pour les différentes espèces en fonction des caractéristiques climatiques futures	Gestionnaires & Experts	40 K\$
Revoir les stratégies d'aménagement et sylvicoles	Gestionnaires & Experts	15 K\$
Développer des approches sylvicoles de la résilience des forêts et des mesures de précaution pour les interventions forestières	Gestionnaires & Experts	10 K\$
Étudier le potentiel d'utilisation de la migration assistée pour la région de l'Outaouais	Chercheurs	15 K\$
Évaluer le potentiel des espèces exotiques et expérimenter des plantations	Chercheurs & Experts	50 K\$
<b>Mesures de renforcement de la capacité d'adaptation</b>		
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières
Évaluation de la capacité d'adaptation du secteur	Chercheurs & Experts	40 K\$
Consultation des acteurs	Atelier avec les TLGIRT & Experts	15 K\$
Diffusion de l'information sur les impacts des changements climatiques	CRRNT-O	2 K\$
<b>Surveillance et acquisition de connaissances</b>		
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières
Mettre en place un réseau de surveillance des changements climatiques	Gestionnaires & Experts	30 K\$
<b>TOTAL</b>		<b>220 K\$</b>

<sup>1</sup> fait référence à la liste identifiée dans la section précédente

Tableau 9. Estimation des expertises et des ressources financières requises pour la mise en œuvre des stratégies d'adaptation associée à l'impact potentiel appréhendé prioritaire II

<b>Mesures pratiques d'adaptation</b>		
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières
Évaluation fonctionnelle du réseau routier	Gestionnaires & Chercheurs & Acteurs	35 K\$
Évaluation la vulnérabilité à la rupture d'accès des tronçons de chemins causer par le bris des traverses de cours d'eau	Chercheurs & Gestionnaires	55 K\$
Augmenter les standards de dimension des ponceaux	Gestionnaires & Acteurs	5 K\$ ( + coûts suppl. importants/ponceau
Concentrer les opérations de récolte dans le temps	Gestionnaires	5 K\$ (+ planification )
Planifier des secteurs opérationnels alternatifs	Gestionnaires	10 K\$
Pérenniser une proportion plus importante du réseau routier	Gestionnaires & Experts	100 K\$ (ou plus)
<b>Mesures de renforcement de la capacité d'adaptation</b>		
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières
Informers les acteurs sur les risques de bris de traverse et sur l'utilisation des chemins d'hiver	Gestionnaires & acteurs	2 K\$
Mettre en place un comité trans-sectoriel de gestion opérationnelle du réseau routier	Gestionnaires & acteurs	5 K\$
Développer un modèle gestion coopératif du réseau routier	Gestionnaires & acteurs	5 K\$
<b>Surveillance et acquisition de connaissances</b>		
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières
Suivi des débits de pointe	Gestionnaires & CGBV	20 K\$
Réaliser un historique des bris de traverses de cours d'eau		15 K\$
Faire un inventaire des ponceaux		15 K\$
<b>TOTAL</b>		<b>272 K\$</b>

<sup>1</sup> impact potentiel appréhendé prioritaire; <sup>2</sup> fait référence à la liste identifiée dans la section précédente

Tableau 10. Estimation des expertises et des ressources financières requises pour la mise en œuvre des stratégies d'adaptation associée à l'impact potentiel appréhendé prioritaire III

<b>Mesures pratiques d'adaptation</b>			
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières	
Évaluer l'incertitude de perturbations naturelles sur la possibilité forestière	Chercheurs & gestionnaires	60 K\$	
Prévoir et développer des stratégies de récupération rapide et efficace	Gestionnaires	35 K\$	
Évaluer les menaces des pestes potentielles et développer des stratégies de protection	Chercheurs & experts & gestionnaires	60 K\$	
<b>Mesures de renforcement de la capacité d'adaptation</b>			
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières	
Donner des formations en gestion du risque appliquée aux ressources naturelles	Formateur & gestionnaires & acteurs	10 K\$	
Diffuser l'information sur les pestes et leurs impacts les plus probables	Gestionnaires & acteurs	5 K\$	
Former des équipes opérationnelles spécialisées sur la récupération du bois morts	Gestionnaires	15 K\$	
<b>Surveillance et acquisition de connaissances</b>			
Activités	Expertises impliquées	Ressources financières	
Développer un lien de collaboration étroit avec la SOPFIM et la SOPFEU;	Gestionnaires	5 K\$	
Détection précoce des forêts stressées et perturbées	Chercheurs & experts	90 K\$	
<b>TOTAL</b>		<b>280 K\$</b>	

<sup>1</sup> impact potentiel appréhendé prioritaire; <sup>2</sup> fait référence à la liste identifiée dans la section précédente

## **Références**

- Cabral de Vasconcellos, F. et F. Doyon. 2012. Développement d'un outil pour l'évaluation et la gestion des risques de rupture de l'accès au territoire forestier associés aux effets des crues subites sur le drainage routier dans un contexte de changements climatiques. In Doyon, F., D. Cyr, A. Montpetit, G. Chiasson et É. Plassin. Évaluation des vulnérabilités et de l'adaptation face aux changements climatiques sur le territoire de la collectivité forestière du Projet Le Bourdon (Canada). Rapport de l'Institut des Sciences de la Forêt tempérée (UQO), Ripon, Qc. et du Centre de recherche sur la Gouvernance des Ressources naturelles et du territoire (UQO), Gatineau, Qc. Septembre 2012.
- Gauthier, S., Lorente, M., De Grandpré, L., Aubin, I., Burton P.J., Hogg, E.H., Nelson, E.A. & Taylor, A. 2012. Towards a set of indicators of climate change effects on Canada's forests and forest sector. Discussion paper. Canadian Forest Service. 78 p.
- Messier, C., K. J. Puettman, K. D. Coates. 2013. Managing forests as complex adaptive systems. Building resilience to the challenge of global change. Série Earthscan Forest Library, Routledge, New York, NY, USA. 353p.
- Keeton, W. 2006. Balancing ecological and economic objectives while managing for old-growth forest characteristics. Proceedings of the International Conference: Ecologisation of Economy as a Prerequisite for Sustainable Development. Ukrainian National Forestry University, L'viv, Ukraine.
- Ste-Marie, C. 2011. Chasing Climate Change—Exploring the Option of Assisted Migration. *In* Special Issue on Assisted Tree Migration and Climate Change. *The Forestry Chronicle* 87(6): 707-710.
- Wan, Z., Wang, P., et Li, X. (2004). Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the Southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing* 25(1) :61–72.

## 7. Annexes

Annexe 1. Évaluation des impacts climatiques pouvant mettre en péril l'atteinte des objectifs associés aux enjeux du Défi 1 : Des forêts et un secteur forestier qui contribuent à la lutte contre les changements climatiques.

(Voir le fichier XL ci-joint : Enjeux PRDIRT vs impacts potentiels, onglet Défi 1)

Annexe 2. Évaluation des impacts climatiques pouvant mettre en péril l'atteinte des objectifs associés aux enjeux du Défi 2 : Un milieu naturel productif et créateur de richesses diversifiées.

(Voir le fichier XL ci-joint : Enjeux PRDIRT vs impacts potentiels, onglet Défi 2)

Annexe 3. Évaluation des impacts climatiques pouvant mettre en péril l'atteinte des objectifs associés aux enjeux du Défi 3 : Une gestion des ressources naturelles et du territoire qui intègre les valeurs et les besoins de la population outaouaise et des communautés autochtones.

(Voir le fichier XL ci-joint : Enjeux PRDIRT vs impacts potentiels, onglet Défi 3)

Annexe 4. Évaluation des impacts climatiques pouvant mettre en péril l'atteinte des objectifs associés aux enjeux du Défi 4 : Un aménagement du territoire qui assure la durabilité des écosystèmes.

(Voir le fichier XL ci-joint : Enjeux PRDIRT vs impacts potentiels, onglet Défi 4)

Annexe 5. Évaluation des impacts climatiques pouvant mettre en péril l'atteinte des objectifs associés aux enjeux du Défi 1 : Des forêts et un secteur forestier qui contribuent à la lutte contre les changements climatiques.

(Voir le fichier XL ci-joint : Enjeux PRDIRT vs impacts potentiels, onglet Impacts prioritaires)